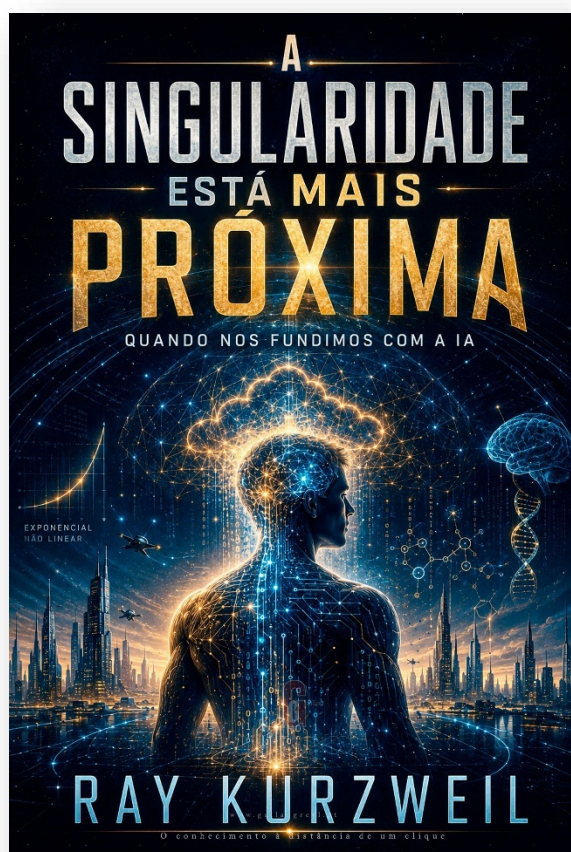


A SINGULARIDADE ESTÁ MAIS PRÓXIMA

Quando Nos Fundimos Com a IA



Autor: Ray Kurzweil

Edição e Preparação Digital: Gullan Greyl

Edição original: The Singularity Is Nearer: When Humans We Merge with AI, 2024.

Edição portuguesa concluída em 18-05-2025



Livroteca Gullan Greyl

Sinopse

O que significará viver livre dos limites do nosso corpo? Quem nos tornaremos se a nossa mente puder ser arquivada e replicada? Como lidaremos com os riscos inerentes a uma tecnologia tão incrivelmente poderosa? Para o futurista, inventor e guru do tecno-otimismo Ray Kurzweil, as inovações das próximas décadas mudarão a vida humana para sempre: mais potente que a orgânica, a inteligência artificial irá fundir-se com o cérebro biológico, expandindo enormemente a nossa consciência e as nossas capacidades cognitivas. Kurzweil prevê, ainda, uma Era de abundância em que os avanços na tecnologia da informação tornarão bens e serviços essenciais cada vez mais acessíveis — da produção de alimentos e vestuário à eficiência de utensílios e moradias; da geração de energia limpa e sustentável ao tratamento de doenças e prolongamento da vida. Este livro trata, portanto, da nossa aproximação final com esse ponto de Singularidade, e das oportunidades e dos perigos que isso representa. E profetiza: se conseguirmos enfrentar os desafios científicos, éticos, sociais e políticos que tamanho avanço nos coloca, transformaremos profundamente, e para melhor, a vida na Terra

“Livre do confinamento do nosso crânio, e processando em um substrato milhões de vezes mais rápido do que o tecido biológico, a mente humana será capacitada para crescer de maneira exponencial, em última análise expandindo a nossa inteligência milhões de vezes. Esse é o cerne da minha definição de Singularidade.”

Esta edição foi preparada para formato digital, com intervenção ao nível da organização, revisão e uniformização do texto, de forma a assegurar clareza, consistência e legibilidade em ambiente de leitura eletrónica.

Foram realizadas correções pontuais sempre que necessário, respeitando integralmente o conteúdo e a estrutura da obra original.

O objetivo desta preparação é preservar a fidelidade ao texto, garantindo simultaneamente uma experiência de leitura fluida e acessível.

Gullan Greyl

*Não se trata de saber mais,
mas de ver melhor*

Para Sonya Rosenwald Kurzweil.
Há alguns dias,
completei cinquenta anos de convivência com ela
(e do seu amor)!

Índice

Agradecimentos	1
Introdução	3
CAPÍTULO 1	8
Onde Estamos nos Seis Estágios?	8
CAPÍTULO 2	13
Reinventar a Inteligência.....	13
1. O Que Significa Reinventar a Inteligência?.....	13
2. O Nascimento da Ia	14
3. O Cerebelo: Uma Estrutura Modular	38
4. O Neocórtex: Uma Estrutura Autorregulável, Hierárquica e Flexível.....	45
5. Aprendizagem Profunda: Recriando as Capacidades do Neocórtex	54
6. O Que é Que a Ia Ainda Precisa de Alcançar?	76
7. Superando o Teste de Turing.....	89
8. Estendendo o Neocórtex para a Nuvem	98
CAPÍTULO 3	106
Quem Sou Eu?	106
1. O Que É a Consciência?	106
2. Zombis, Qualia e o Problema Difícil da Consciência.....	112
3. Determinismo, Emergência, e o Dilema do Livre-Arbitrio	116
4. O Dilema do Livre-Arbitrio com Mais de Um Cérebro por Humano	125
5. O “Você 2” É Consciente. É Você?	127
6. A Incrível Improbabilidade de Existir	135
7. Depois da Vida	141
8. Quem Posso Ser	155
CAPÍTULO 4	157
A Vida está a Ficar Exponencialmente Melhor	157
1. O Consenso Público é o Oposto	157
2. A Realidade é Que Praticamente Todos os Aspectos da Vida estão a Melhorar Progressivamente como Resultado do Avanço Exponencial da Tecnologia	173
3. Literacia e Educação	175
4. Disponibilidade de Sanitários com Descarga, Eletricidade, Rádio, Televisão e Computadores.....	181
5. Expetativa de Vida	190
6. Diminuição da Pobreza e Aumento do Rendimento.....	195

7. Declínio da Violência	213
8. Crescimento da Energia Renovável.....	221
9. Propagação da Democracia	227
10. Agora Estamos a Entrar na Parte Íngreme do Exponencial.....	234
11. A Energia Renovável está Quase Concluída — Substituição de Combustíveis Fósseis	251
12. Estamos a Aproximar o Acesso à Água Potável para Todos	259
13. A Agricultura Vertical Fornecerá Alimentos Baratos e de Elevada Qualidade e Liberará a Terra que Utilizamos para a Agricultura Horizontal	262
14. A Impressão 3D Revolucionará — A Criação e Distribuição de Coisas Físicas	267
15. Impressão 3D de Edifícios	273
16. Pessoas Diligentes Alcançarão a Velocidade de Escape da Longevidade por Volta de 2030.....	276
17. A Maré a Aumentar	285
CAPÍTULO 5	287
O Futuro dos Empregos: Bom ou Mau?	287
1. A Revolução Atual.....	287
2. Destruição e Criação	294
3. Desta Vez é Diferente?	307
4. Então, Para Onde Vamos?.....	326
CAPÍTULO 6	349
Os Próximos Trinta Anos na Saúde e Bem-Estar.....	349
1. A Década de 2020: Combinar a IA Com a Biotecnologia	349
2. Décadas de 2030 e 2040: Desenvolver e Aperfeiçoar a Nanotecnologia.....	365
3. Aplicando a Nanotecnologia à Saúde e Longevidade.....	380
CAPÍTULO 7	398
Perigos	398
1. Promessa e Perigo	398
2. Armas Nucleares.....	399
3. Biotecnologia	404
4. Nanotecnologia.....	408
5. Inteligência Artificial	415
CAPÍTULO 8	428
Diálogo Com Cassandra	428
Apêndice	436
Fontes do Gráfico Preço-Desempenho da Informática, 1939-2023	436

Metodologia de Seleção de Máquinas.....	436
Metodologia de Dados de Preços	437
Metodologia de Dados de Desempenho	438
Recursos Adicionais.....	440
Máquinas, Dados e Fontes Listados	441
Notas	471

A SINGULARIDADE ESTÁ MAIS PRÓXIMA

Quando Nos Fundimos Com a IA

Ray Kurzweil

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão à minha esposa, Sonya, pela sua paciência amorosa ao longo das vicissitudes do processo criativo e por partilhar comigo ideias ao longo de cinquenta anos.

Aos meus filhos, Ethan e Amy; à minha nora, Rebecca; ao meu genro, Jacob; à minha irmã, Enid; e aos meus netos, Leo, Naomi e Quincy, pela sua inspiração, pelo amor incondicional e pelas suas excelentes ideias.

Aos meus falecidos pais, Hannah e Fredric, que me ensinaram o poder das ideias durante os nossos passeios pelos bosques de Nova Iorque e que me deram liberdade para experimentar desde tenra idade.

A John-Clark Levin, pelo seu meticuloso trabalho de pesquisa e pela análise inteligente dos dados que servem como base fundamental para este livro.

Ao meu editor de longa data na Viking, Rick Kot, pelo seu sentido de liderança, orientação firme e revisão especializada.

A Nick Mullendore, o meu agente literário, pela sua orientação perspicaz e entusiástica.

A Aaron Kleiner, o meu parceiro de negócios ao longo da vida (desde 1973), pela sua colaboração dedicada nos últimos cinquenta anos.

A Nanda Barker-Hook, pelo seu apoio na escrita e pela supervisão experiente na gestão dos meus discursos.

A Sarah Black, pelas suas brilhantes perspetivas de investigação e pela organização das ideias.

A Celia Black-Brooks, pelo seu apoio atento e pela estratégia especializada na divulgação das minhas ideias para o mundo.

À Denise Scutellaro, pelo seu excelente trabalho na gestão das minhas operações empresariais.

Ao Laksman Frank, pelo seu notável talento no design gráfico e ilustrações.

À Amy Kurzweil e à Rebecca Kurzweil, pela sua orientação na arte da escrita e pelos magníficos exemplos que deram com os seus livros de sucesso.

À Martine Rothblatt, pela sua dedicação a todas as tecnologias abordadas neste livro e pela nossa longa colaboração no desenvolvimento de exemplos notáveis nestas áreas.

À equipa Kurzweil, que prestou um apoio fundamental na pesquisa, escrita e logística deste projeto, incluindo Amara Angelica, Aaron Kleiner, Bob Beal, Nanda Barker-Hook, Celia Black-Brooks, John-Clark Levin, Denise Scutellaro, Joan Walsh, Marylou Sousa, Lindsay Boffoli, Ken Linde, Laksman Frank, Maria Ellis, Sarah Black, Emily Brangan e Kathryn Myronuk.

À dedicada equipa da Viking Penguin, pelo seu profundo conhecimento e atenção ao detalhe, incluindo Rick Kot, editor executivo; Allison Lorentzen, editora executiva; Camille LeBlanc, editora associada; Brian Tart, editor; Kate Stark, editora associada; Carolyn Coleburn, assessora de imprensa executiva; e Mary Stone, diretora de marketing.

Ao Peter Jacobs, da CAA, pela sua liderança inestimável e apoio às minhas palestras.

Às equipas da Fortier Public Relations e da Book Highlight, pela sua excecional competência em relações públicas e pelo seu papel estratégico na divulgação deste livro.

Aos meus leitores internos e externos, que contribuíram com ideias perspicazes e criativas.

E, por fim, a todas as pessoas que têm a coragem de questionar pressupostos ultrapassados e usar a sua imaginação para concretizar feitos nunca antes realizados. Vocês inspiram-me.

Introdução

No meu livro de 2005, *A Singularidade Está Próxima*, apresentei a minha teoria de que as tendências tecnológicas convergentes e exponenciais estão a conduzir a uma transformação que será profundamente revolucionária para a humanidade. Existem várias áreas-chave de mudança que continuam a acelerar simultaneamente: o poder computacional está a tornar-se mais acessível, a biologia humana está a ser melhor compreendida e a engenharia está a alcançar escalas cada vez mais reduzidas. À medida que a inteligência artificial evolui em capacidade e a informação se torna mais acessível, estamos a integrar estas capacidades de forma cada vez mais próxima com a nossa inteligência biológica natural. Eventualmente, a nanotecnologia permitirá que estas tendências culminem na expansão direta dos nossos cérebros com camadas de neurónios virtuais na nuvem. Desta forma, fundir-nos-emos com a IA e aumentaremos as nossas capacidades com milhões de vezes o poder computacional que a nossa biologia nos deu. Isto expandirá a nossa inteligência e consciência de uma forma tão profunda que é difícil de compreender. Este evento é o que eu chamo de Singularidade.

O termo "singularidade" é emprestado da matemática (onde se refere a um ponto indefinido numa função, como quando se divide por zero) e da física (onde se refere ao ponto infinitamente denso no centro de um buraco negro, onde as leis normais da física deixam de se aplicar). Contudo, é importante lembrar que utilizo o termo como uma metáfora. A minha previsão sobre a Singularidade tecnológica não sugere que as taxas de mudança se tornem realmente infinitas, pois o crescimento exponencial não implica infinito, nem uma singularidade física. Um buraco negro tem uma gravidade suficientemente forte para aprisionar até mesmo a luz, mas não existe qualquer meio na mecânica quântica que justifique uma quantidade verdadeiramente infinita de massa. Utilizo a metáfora da singularidade porque esta capta a nossa incapacidade de compreender uma mudança tão radical com o nosso nível atual de inteligência. No entanto, à medida que a transição ocorrer, aprimoraremos rapidamente a nossa cognição para nos adaptarmos.

Como detalhei em *A Singularidade Está Próxima*, as tendências a longo prazo sugerem que a Singularidade ocorrerá por volta de 2045. Quando esse livro foi publicado, essa data estava a quarenta anos — duas gerações completas — no futuro. Nessa distância temporal, eu podia fazer previsões sobre as forças amplas que dariam origem a essa transformação,

mas para a maioria dos leitores, o tema ainda estava relativamente distante da realidade quotidiana em 2005. E muitos críticos argumentaram na época que o meu cronograma era demasiado otimista ou até que a Singularidade era impossível.

Desde então, contudo, algo extraordinário aconteceu. O progresso continuou a acelerar, contrariando os pessimistas. As redes sociais e os smartphones passaram de praticamente inexistentes a companheiros diários que agora conetam a maioria da população mundial. As inovações algorítmicas e o surgimento de big data permitiram que a IA alcançasse avanços surpreendentes mais cedo do que até os especialistas esperavam — desde dominar jogos como *Jeopardy!* e *Go* a conduzir automóveis, redigir ensaios, passar exames da Ordem dos Advogados e diagnosticar cancro. Atualmente, modelos de linguagem extensos e flexíveis, como o GPT-4 e o Gemini, podem traduzir instruções em linguagem natural para código de computador — reduzindo drasticamente a barreira entre humanos e máquinas. Quando estiver a ler isto, é provável que milhões de pessoas já tenham experimentado estas capacidades em primeira mão. Entretanto, o custo para sequenciar o genoma humano caiu cerca de 99,997%, e as redes neuronais começaram a desbloquear grandes descobertas médicas ao simular a biologia digitalmente. Estamos até a ganhar a capacidade de finalmente conetar computadores diretamente aos cérebros.

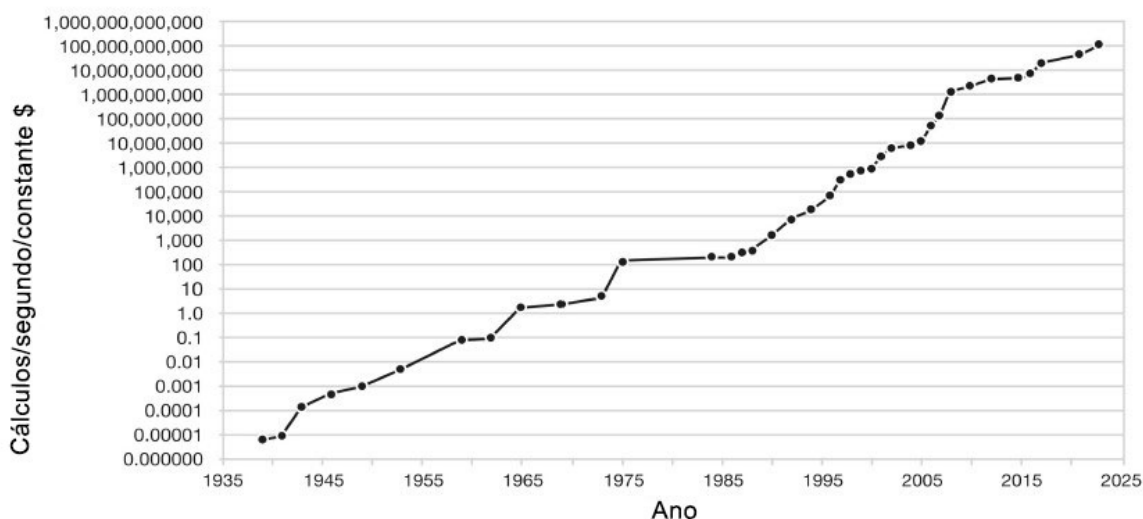
Subjacente a todos estes desenvolvimentos está o que chamo de Lei dos Retornos Acelerados: as tecnologias de informação, como a informática, tornam-se exponencialmente mais baratas porque cada avanço facilita o desenho da próxima etapa da sua própria evolução. Como resultado, no momento em que escrevo, um dólar compra cerca de 11.200 vezes mais poder computacional, ajustado pela inflação, do que comprava quando *A Singularidade Está Próxima* foi publicada.

O gráfico seguinte, que discutirei em profundidade mais tarde no livro, resume a tendência mais importante que impulsiona a nossa civilização tecnológica: o crescimento exponencial a longo prazo (mostrado como uma linha aproximadamente reta nesta escala logarítmica) na quantidade de poder computacional que um dólar constante pode adquirir. A lei de Moore observa, de forma célebre, que os transístores têm diminuído de tamanho de forma constante, permitindo que os computadores se tornem cada vez mais poderosos — mas isso é apenas uma manifestação da Lei dos Retornos Acelerados, que já era válida muito antes de os transístores terem sido inventados e pode continuar a ser aplicada mesmo depois de os transístores atingirem os seus limites físicos e forem substituídos por novas tecnologias. Esta

tendência tem definido o mundo moderno, e quase todas as inovações descritas neste livro serão possibilitadas por ela, direta ou indiretamente.

Preço-Desempenho da Computação, 1939–2023¹

Melhor relação custo-benefício alcançada em cálculos por segundo por dólar constante de 2023



Para maximizar a comparabilidade das máquinas, este gráfico centra-se no preço-desempenho durante a era dos computadores programáveis, mas as aproximações aos dispositivos de computação eletromecânica anteriores mostram que esta tendência remonta pelo menos à década de 1880.²

Assim, mantivemos o cronograma para a Singularidade. A urgência deste livro advém da natureza da mudança exponencial em si. Tendências que mal eram perceptíveis no início deste século estão agora a impactar ativamente bilhões de vidas. No início da década de 2020, entrámos na parte acentuadamente íngreme da curva exponencial, e o ritmo da inovação está a afetar a sociedade como nunca antes. Para colocar em perspetiva, o momento em que está a ler isto está provavelmente mais próximo da criação da primeira inteligência artificial sobre-humana do que quando do lançamento do meu último livro, *Como Criar uma Mente*, de 2012. E está provavelmente mais perto da Singularidade do que quando do lançamento do meu livro de 1999, *A Era das Máquinas Espirituais*. Ou, em termos de vida humana, os bebés nascidos hoje estarão apenas a terminar os estudos universitários quando a Singularidade acontecer. Isto é, num nível muito pessoal, um tipo diferente de 'próximo' comparado ao que era em 2005.

É por isso que escrevi este livro agora. A marcha de milénios da humanidade rumo à Singularidade tornou-se num sprint. Na introdução de *A Singularidade Está Próxima*, escrevi

que estávamos então 'nos estágios iniciais desta transição'. Agora estamos a entrar na sua culminação. Aquele livro era sobre vislumbrar um horizonte distante — este trata dos últimos quilómetros ao longo do caminho para o alcançar.

Felizmente, agora conseguimos ver este caminho de forma muito mais clara. Embora muitos desafios tecnológicos permaneçam antes de podermos alcançar a Singularidade, os seus principais precedentes estão a mover-se rapidamente do âmbito da ciência teórica para o de pesquisa e desenvolvimento ativo. Na próxima década, as pessoas irão interagir com inteligências artificiais que podem parecer convincentemente humanas, e interfaces simples entre cérebro e computador irão impactar a vida quotidiana de forma semelhante aos smartphones atualmente. Uma revolução digital na biotecnologia irá curar doenças e prolongar significativamente a vida saudável das pessoas. No entanto, muitos trabalhadores sentirão os efeitos da disrupção económica, e todos nós enfrentaremos riscos relacionados com o uso accidental ou deliberado destas novas capacidades. Durante a década de 2030, inteligências artificiais autoaperfeiçoadas e nanotecnologias amadurecidas irão unir humanos e as nossas criações mecânicas como nunca antes — intensificando ainda mais tanto as promessas como os perigos. Se conseguirmos enfrentar os desafios científicos, éticos, sociais e políticos colocados por estes avanços, até 2045 iremos transformar a vida na Terra de forma profundamente positiva. Contudo, se falharmos, a nossa própria sobrevivência estará em risco. Este livro, então, trata da nossa abordagem final à Singularidade — as oportunidades e os perigos que precisamos de enfrentar juntos ao longo da última geração do mundo tal como o conhecíamos.

Para começar, iremos explorar como a Singularidade ocorrerá na prática e enquadrar isso no contexto da longa busca da nossa espécie para reinventar a própria inteligência. Criar sciência através da tecnologia levanta questões filosóficas importantes, por isso abordaremos como essa transição afeta a nossa própria identidade e senso de propósito. Em seguida, analisaremos as tendências práticas que irão caracterizar as próximas décadas. Como irei demonstrar, a Lei dos Retornos Acelerados está a impulsionar melhorias exponenciais numa ampla gama de métricas que refletem o bem-estar humano. Um dos aspetos negativos mais evidentes da inovação, no entanto, é o desemprego causado pela automação em várias formas. Embora estes danos sejam reais, veremos por que há boas razões para o otimismo a longo prazo — e porque, no fim de contas, não estamos em concorrência com a IA.

À medida que estas tecnologias desbloqueiam uma abundância material enorme para a nossa civilização, o foco irá mudar para ultrapassar a próxima barreira ao nosso pleno desenvolvimento: as fraquezas da nossa biologia. Assim, iremos analisar as ferramentas que utilizaremos nas próximas décadas para ganhar um domínio crescente sobre a própria biologia — primeiro, vencendo o envelhecimento dos nossos corpos e, depois, ampliando os nossos cérebros limitados e abrindo caminho para a Singularidade. Contudo, estas descobertas também podem colocar-nos em risco. Sistemas revolucionários em biotecnologia, nanotecnologia ou inteligência artificial podem eventualmente levar a uma catástrofe existencial, como uma pandemia devastadora ou uma reação em cadeia de máquinas autorreplicantes. Concluiremos com uma avaliação destas ameaças, que exigem planeamento cuidadoso, mas, como explicarei, existem abordagens muito promissoras para mitigá-las.

Estes são os anos mais emocionantes e significativos de toda a história. Não podemos afirmar com confiança como será a vida após a Singularidade. Mas, ao compreender e antecipar as transições que nos conduzem até lá, podemos ajudar a garantir que a abordagem final da humanidade seja segura e bem-sucedida.

CAPÍTULO 1

Onde Estamos nos Seis Estágios?

No livro *A Singularidade Está Próxima*, descrevi a base da consciência como sendo a informação. Mencionei seis épocas, ou estágios, desde o início do nosso universo, em que cada estágio criava o próximo a partir do processamento de informação do estágio anterior. Assim, a evolução da inteligência funciona através de uma sequência indireta de outros processos. A Primeira Época foi o nascimento das leis da física e da química e o que essas leis tornaram possíveis. Algumas centenas de milhares de anos após o Big Bang, os átomos formaram-se a partir de elétrons que orbitavam um núcleo de prótons e nêutrons. Os prótons num núcleo, aparentemente, não deveriam estar tão próximos, pois a força eletromagnética tenta afastá-los violentamente. No entanto, existe uma força separada, chamada força nuclear forte, que mantém os prótons unidos. "Quem quer que" tenha concebido as regras do universo forneceu esta força adicional; caso contrário, a evolução através dos átomos teria sido impossível. Milhões de anos mais tarde, os átomos formaram moléculas que puderam representar informação elaborada. O carbono foi o bloco de construção mais útil, uma vez que pode formar quatro ligações, ao contrário de uma, duas ou três para muitos outros núcleos. O facto de vivermos num mundo que permite uma química complexa é extremamente improvável. Por exemplo, se a força da gravidade

fosse ligeiramente mais fraca, não haveria supernovas para criar os elementos químicos de que a vida é composta. Se fosse ligeiramente mais forte, as estrelas extinguir-se-iam e morreriam antes que a vida inteligente pudesse formar-se. Esta única constante física teve de estar num intervalo extremamente estreito ou nós não estaríamos aqui. O universo em que vivemos é cuidadosamente equilibrado, permitindo um grau de ordem que tornou possível a evolução.

Há vários mil milhões de anos, começou a Segunda Época: a vida. As moléculas tornaram-se suficientemente complexas para definir um organismo inteiro numa única molécula. Assim, os seres vivos, cada um com o seu próprio ADN, foram capazes de evoluir e de se disseminar. Na Terceira Época, os animais descritos pelo ADN formaram então cérebros, que armazenavam e processavam informações. Estes cérebros conferiram vantagens evolutivas, permitindo que se desenvolvessem em maior complexidade ao longo de milhões de anos. Na Quarta Época, os animais utilizaram a sua capacidade cognitiva de nível superior, juntamente com os seus polegares, para traduzir pensamentos em ações complexas. Isto refere-se aos humanos. A nossa espécie utilizou estas capacidades para criar tecnologia capaz de armazenar e manipular informações — desde o papiro aos discos rígidos. Estas tecnologias ampliaram as capacidades dos nossos cérebros de perceber, relembrar e avaliar padrões de informação. Esta foi outra fonte de evolução, muito superior ao nível de progresso anterior. Com cérebros, acrescentávamos aproximadamente uma polegada cúbica de massa cerebral a cada 100.000 anos, enquanto com a computação digital duplicámos a relação custo-desempenho

aproximadamente a cada dezasseis meses. Na Quinta Época, iremos fundir diretamente a cognição biológica humana com a velocidade e o poder da nossa tecnologia digital. Este é a interface cérebro-computador. O processamento neural humano ocorre a uma velocidade de várias centenas de ciclos por segundo, em comparação com vários mil milhões por segundo no caso da tecnologia digital. Para além da velocidade e do tamanho da memória, ampliar os nossos cérebros com computadores não biológicos permitirá adicionar muitas mais camadas aos nossos neocórtices — desbloqueando cognições vastamente mais complexas e abstratas do que as que conseguimos imaginar atualmente. A Sexta Época é quando a nossa inteligência se espalha por todo o universo, transformando a matéria comum em computrónio, que é a matéria organizada à densidade máxima de computação.

No meu livro de 1999, *A Era das Máquinas Espirituais*, previ que um teste de Turing — onde uma IA é capaz de comunicar por texto de forma indistinguível de um humano — seria superado em 2029. Repeti essa previsão no livro *A Singularidade Está Próxima*, de 2005. Passar num teste de Turing válido significa que uma IA domina a linguagem e o raciocínio comum tal como os humanos. Turing descreveu o seu conceito em 1950¹, mas não especificou como o teste deveria ser administrado. Numa aposta que fiz com Mitch Kapor, definimos as nossas próprias regras, muito mais difíceis do que outras interpretações. A minha expectativa era que, para passar num teste de Turing válido até 2029, precisaríamos de alcançar uma grande variedade de feitos intelectuais com IA até 2020. E, de facto, desde essa previsão, as IAs têm conquistado

muitos dos maiores desafios intelectuais da humanidade — desde jogos como os *Jeopardy!* e *Go* até aplicações importantes como radiologia e descoberta de medicamentos. No momento em que escrevo isto, sistemas de IA de topo, como Gemini e GPT-4, estão a ampliar as suas capacidades para muitos domínios de desempenho — passos encorajadores no caminho rumo à inteligência geral. Por fim, quando um programa conseguir superar o teste de Turing, precisará deliberadamente moderar a demonstração da sua inteligência em diversas áreas. Caso contrário, seria evidente que se trata de uma IA. Por exemplo, se fosse capaz de resolver instantaneamente qualquer problema matemático, ficaria claro que não é humano, o que resultaria no falhanço do teste. Assim, superar este teste exige que as IAs possuam capacidades não apenas avançadas, mas também a habilidade de ajustá-las estrategicamente para simular uma interação humana convincente. Assim, ao nível do teste de Turing, as IAs terão capacidades que, na verdade, ultrapassam as dos melhores humanos na maioria dos campos. Os humanos estão agora na Quarta Época, com a nossa tecnologia já a produzir resultados que superam o que conseguimos compreender em algumas tarefas. Para os aspetos do teste de Turing que as IAs ainda não dominaram, estamos a fazer progressos rápidos e acelerados. Passar no teste de Turing, que tenho vindo a antecipar para 2029, levar-nos-á à Quinta Época.

Uma capacidade chave nos anos 2030 será a conexão das camadas superiores dos nossos neocórtices à cloud, o que irá expandir diretamente o nosso pensamento. Desta forma, em vez de a IA ser uma concorrente, tornar-se-á uma extensão de nós

próprios. Quando este acontecimento se concretizar, as partes não biológicas das nossas mentes fornecerão milhares de vezes mais capacidade cognitiva do que as partes biológicas. Com o progresso exponencial, iremos expandir as nossas mentes em milhões de vezes até 2045. É esta velocidade e magnitude incompreensíveis de transformação que nos permitirá adotar a metáfora de singularidade da física para descrever o nosso futuro.

CAPÍTULO 2

Reinventar a Inteligência

1. O Que Significa Reinventar a Inteligência?

Se considerarmos a narrativa do universo como uma sequência de paradigmas evolutivos no processamento de informação, podemos afirmar que a participação da humanidade começa já num ponto avançado desta jornada. O nosso capítulo neste vasto conto trata, em última análise, da nossa transição de animais com cérebros biológicos para seres transcendentais cujos pensamentos e identidades deixam de estar limitados ao que a genética nos proporcionou. Nos anos 2020, estamos prestes a entrar na última fase desta transformação — reinventar a inteligência que a natureza nos deu num substrato digital mais poderoso e, posteriormente, fundir-nos com ele. Desta forma, a Quarta Época do universo dará lugar à Quinta.

Mas como irá isto acontecer de forma mais concreta? Para compreender o que implica reinventar a inteligência, começaremos por visitar o nascimento da IA e as duas grandes correntes de pensamento que dele emergiram. Para compreender porque uma delas prevaleceu sobre a outra, relacionaremos isso com o que a neurociência nos revela sobre como o cerebelo e o neocórtex

originaram a inteligência humana. Após examinarmos como o deep learning (aprendizagem profunda) está atualmente a recriar os poderes do neocórtex, poderemos avaliar o que a IA ainda necessita alcançar para atingir níveis humanos, e como saberemos quando isso acontecer. Por fim, voltaremos à forma como, auxiliados por IA super-humana, iremos conceber interfaces cérebro-computador que expandirão imensamente os nossos neocórtices com camadas de neurónios virtuais. Isto abrirá modos totalmente novos de pensamento e, em última instância, ampliará a nossa inteligência milhões de vezes: esta é a Singularidade.

2. O Nascimento da Ia

Em 1950, o matemático britânico Alan Turing (1912-1954) publicou um artigo na revista *Mind* intitulado “Computing Machinery and Intelligence”¹. Nele, Turing levantou uma das questões mais profundas da história da ciência: “As máquinas podem pensar?” Embora a ideia de máquinas pensantes remonte pelo menos ao autómato de bronze Talos, da mitologia grega², a grande inovação de Turing foi reduzir este conceito a algo empiricamente testável. Ele propôs o uso do “jogo da imitação” — hoje conhecido como o Teste de Turing — para determinar se os cálculos de uma máquina seriam capazes de realizar as mesmas tarefas cognitivas que os nossos cérebros. Neste teste, os juízes humanos entrevistam tanto a IA quanto os seus homólogos humanos através de mensagens instantâneas, sem verem com quem estão a falar. Os juízes podem colocar questões sobre qualquer assunto ou situação que desejarem. Se, após um determinado período de tempo, os juízes

não conseguirem distinguir qual das respostas veio da IA e quais vieram dos humanos, considera-se que a IA passou no teste.

Ao transformar esta ideia filosófica num conceito científico, Turing gerou um enorme entusiasmo entre os investigadores. Em 1956, o professor de matemática John McCarthy (1927-2011) propôs a realização de um estudo com duração de dois meses e a participação de dez pessoas, a ser conduzido no Dartmouth College, em Hanover, New Hampshire³. O objetivo era o seguinte:

O estudo deverá prosseguir com base na conjectura de que cada aspeto da aprendizagem ou qualquer outra característica da inteligência pode, em princípio, ser descrita com tal precisão que uma máquina possa ser capaz de simulá-la. Procurar-se-á descobrir como fazer com que as máquinas utilizem linguagem, formem abstrações e conceitos, resolvam tipos de problemas que atualmente são reservados aos humanos e melhorem continuamente⁴.

Ao preparar a conferência, McCarthy sugeriu que este campo, que acabaria por automatizar todos os outros, fosse denominado “inteligência artificial”⁵. Não é uma designação de que gosto, dado que “artificial” faz com que este tipo de inteligência pareça “não real”, mas é o termo que prevaleceu.

O estudo foi realizado, mas o seu objetivo — especificamente, levar as máquinas a compreenderem problemas descritos em linguagem natural — não foi alcançado no período de dois meses. Ainda estamos a trabalhar nisso — claro, agora com muito mais de dez pessoas. Segundo a gigante tecnológica chinesa Tencent, já em 2017 havia cerca de 300.000 “investigadores e praticantes de IA”

em todo o mundo⁶, e o Global AI Talent Report de 2019, de Jean-Francois Gagné, Grace Kiser e Yoan Mantha, registou cerca de 22.400 especialistas em IA a publicar pesquisas originais — dos quais cerca de 4.000 foram considerados altamente influentes⁷. E, de acordo com o Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, os investigadores de IA, em 2021, geraram mais de 496.000 publicações e mais de 141.000 pedidos de patentes⁸. Em 2022, o investimento corporativo global em IA foi de 189 mil milhões de dólares, um aumento de treze vezes na última década⁹. Os números serão ainda maiores quando estiver a ler isto.

Tudo isto teria sido difícil de imaginar em 1956. No entanto, o objetivo do workshop de Dartmouth era aproximadamente equivalente a criar uma IA que pudesse passar no Teste de Turing. A minha previsão de que atingiremos este marco até 2029 tem sido consistente desde o meu livro de 1999, *A Era das Máquinas Espirituais*, publicado numa época em que muitos observadores acreditavam que este objetivo *nunca* seria alcançado¹⁰. Até recentemente, esta projeção era considerada extremamente otimista na área. Por exemplo, uma pesquisa de 2018 revelou uma previsão agregada entre especialistas em IA de que a inteligência artificial ao nível humano só chegaria por volta de 2060¹¹. No entanto, os avanços mais recentes em modelos de linguagem de larga escala mudaram rapidamente as expetativas. Enquanto escrevia os primeiros rascunhos deste livro, o consenso no *Metaculus*, o principal site de previsão do mundo, situava-se entre as décadas de 2040 e 2050. Contudo, o surpreendente progresso da IA nos últimos dois anos alterou radicalmente estas previsões, e em maio de 2022 o consenso do *Metaculus* concordava exatamente

comigo sobre a data de 2029¹². Desde então, já chegou a oscilar até 2026, colocando-me, tecnicamente, no grupo das previsões mais conservadoras!¹³

Mesmo os especialistas na área têm sido surpreendidos por muitos dos avanços recentes na IA. Não se trata apenas de estarem a acontecer mais cedo do que a maioria esperava, mas também de parecerem ocorrer de forma súbita, sem grandes avisos de que um salto significativo está prestes a acontecer. Por exemplo, em outubro de 2014, Tomaso Poggio, especialista em IA e ciência cognitiva do MIT, afirmou: "A capacidade de descrever o conteúdo de uma imagem seria uma das tarefas intelectualmente mais desafiantes para uma máquina. Precisaremos de outro ciclo de pesquisa básica para resolver este tipo de questão."¹⁴ Poggio estimou que este avanço estivesse, pelo menos, a duas décadas de distância. No mês seguinte, a Google estreou uma IA de reconhecimento de objetos que conseguiu exatamente isso. Quando Raffi Khatchadourian, da *The New Yorker*, lhe perguntou sobre isto, Poggio adotou uma postura de ceticismo mais filosófico sobre se esta capacidade representava inteligência verdadeira. Destaco isto não como uma crítica a Poggio, mas sim como uma observação sobre uma tendência que todos partilhamos. Ou seja, antes de a IA atingir algum objetivo, este parece extremamente difícil e exclusivamente humano. No entanto, depois de alcançado pela IA, a conquista tende a ser minimizada aos nossos olhos humanos. Por outras palavras, o nosso progresso verdadeiro é, na realidade, mais significativo do que parece em retrospectiva. Este é um dos motivos pelos quais continuo otimista em relação à minha previsão para 2029.

Mas por que razão estes avanços súbitos têm ocorrido? A resposta reside num problema teórico que remonta ao início da área. Em 1964, quando estava no ensino secundário, reuni-me com dois pioneiros da inteligência artificial: Marvin Minsky (1927-2016), que coorganizou o workshop de Dartmouth College sobre IA, e Frank Rosenblatt (1928-1971). Em 1965, matriculei-me no MIT e comecei a estudar com Minsky, que estava a realizar trabalhos fundamentais que sustentam os avanços dramáticos em IA que estamos a presenciar hoje. Minsky ensinou-me que existem duas técnicas para criar soluções automatizadas para problemas: a abordagem simbólica e a abordagem conexionista.

A abordagem simbólica descreve, em termos baseados em regras, como um especialista humano resolveria um problema. Em alguns casos, os sistemas baseados nesta abordagem poderiam ser bem-sucedidos. Por exemplo, em 1959, a RAND Corporation introduziu o “General Problem Solver” (GPS) — um programa de computador capaz de combinar axiomas matemáticos simples para resolver problemas de lógica¹⁵. Herbert A. Simon, J. C. Shaw e Allen Newell desenvolveram o General Problem Solver com a capacidade teórica de resolver *qualquer* problema que pudesse ser expresso como um conjunto de Fórmulas Bem Formadas (FBFs). Para que o GPS funcionasse, seria necessário utilizar uma Fórmula Bem Formada (essencialmente, um axioma) em cada etapa do processo, construindo-as meticulosamente numa prova matemática da solução.

Mesmo que o leitor não tenha experiência com lógica formal ou matemática baseada em provas, esta ideia é essencialmente a

mesma do que acontece na álgebra. Se sabe que $2 + 7 = 9$, e que um número desconhecido x somado a 7 resulta em 10, pode provar que $x = 3$. Contudo, este tipo de lógica tem aplicações muito mais amplas do que apenas resolver equações. É também o que utilizamos (muitas vezes sem sequer pensar nisso) quando nos questionamos se algo cumpre uma certa definição. Por exemplo, se sabe que um número primo não pode ter quaisquer fatores além de 1 e dele próprio, e se sabe que 11 é um fator de 22, e que 1 não é igual a 11, pode concluir que 22 não é um número primo. Começando pelos axiomas mais básicos e fundamentais possíveis, o GPS (General Problem Solver) podia realizar este tipo de cálculo para questões muito mais complexas. Em última análise, é isso que os matemáticos humanos também fazem — a diferença é que, pelo menos em teoria, uma máquina pode explorar todas as formas possíveis de combinar axiomas fundamentais na busca pela verdade.

Para ilustrar, se houvesse dez axiomas disponíveis para escolher em cada etapa, e fossem necessários vinte axiomas para alcançar uma solução, isso significaria que existiriam 10^{20} , ou 100 bilhões de bilhões, de possíveis soluções. Hoje em dia, conseguimos lidar com números tão grandes usando computadores modernos, mas isto estava muito além das capacidades de computação de 1959. Naquele ano, o computador DEC PDP-1 conseguia realizar cerca de 100.000 operações por segundo¹⁶. Em 2023, uma máquina virtual Google Cloud A3 conseguia realizar aproximadamente 26.000.000.000.000.000.000 operações por segundo¹⁷. Atualmente, um dólar compra cerca de 1,6 zilhão de vezes mais poder computacional do que na época em que o GPS (General

Problem Solver) foi desenvolvido¹⁸. Problemas que levariam dezenas de milhares de anos para serem resolvidos com a tecnologia de 1959, agora levam apenas minutos em hardware de computação comercial. Para compensar as suas limitações, o GPS tinha heurísticas programadas que tentavam hierarquizar a prioridade das possíveis soluções. As heurísticas funcionavam em alguns casos, e os seus sucessos sustentavam a ideia de que uma solução computacional poderia, em última análise, resolver qualquer problema rigorosamente definido.

Outro exemplo foi um sistema chamado MYCIN, desenvolvido durante a década de 1970 para diagnosticar e recomendar tratamentos corretivos para doenças infecciosas. Em 1979, uma equipa de avaliadores especializados comparou o desempenho do MYCIN com o de médicos humanos e concluiu que o sistema tinha um desempenho igual ou superior ao de qualquer um dos médicos¹⁹.

Uma “regra” típica do MYCIN é a seguinte:

SE:

- 1) A infeção que requer tratamento é meningite, e
- 2) O tipo de infeção é fúngico, e
- 3) Não foram observados organismos na coloração da cultura, e

- 4) O paciente não é um hospedeiro comprometido, e
- 5) O paciente esteve numa área endêmica de coccidioidomicose, e
- 6) A raça do paciente é uma das seguintes: [N]egro [A]siano [I]ndiano, e
- 7) O antígeno criptocócico no líquido cefalorraquidiano não foi positivo

ENTÃO:

Há evidências sugestivas (0,5) de que o criptococo não é um dos organismos (para além dos observados em culturas ou esfregaços) que possam estar a causar a infecção.²⁰

No final da década de 1980, esses “sistemas especialistas” passaram a utilizar modelos probabilísticos e conseguiam combinar muitas fontes de evidência para tomar uma decisão²¹. Embora uma única regra condicional (Se-Então) não fosse suficiente por si só, ao combinar milhares de tais regras, o sistema como um todo era capaz de tomar decisões fiáveis para problemas bem delimitados.

Embora a abordagem simbólica tenha sido utilizada por mais de meio século, a sua principal limitação tem sido o “limite de complexidade”²². Quando o MYCIN e outros sistemas semelhantes cometiam um erro, corrigir esse problema específico podia resolver essa falha, mas, em contrapartida, gerava três novos erros que surgiam em outras situações. Parecia existir um limite de

complexidade que restringia severamente a gama de problemas do mundo real que poderiam ser abordados.

Uma forma de analisar a complexidade dos sistemas baseados em regras é como um conjunto de possíveis pontos de falha. Matematicamente, um grupo de n elementos possui 2^{n-1} subconjuntos (não contando o conjunto vazio). Assim, se uma IA utiliza um conjunto de regras com apenas uma regra, existe apenas um ponto de falha: essa regra funciona corretamente por si só ou não? Se houver duas regras, há três pontos de falha: cada regra individualmente e as interações em que essas duas regras se combinam. Este crescimento é exponencial. Cinco regras significam 31 pontos de falha potenciais, 10 regras significam 1.023, 100 regras representam mais de um milhar de bilhões de bilhões, e 1.000 regras implicam mais de um googol googol googols! Assim, quanto mais regras já existirem, mais cada nova regra adiciona ao número de subconjuntos possíveis. Mesmo que apenas uma fração extremamente minúscula das combinações possíveis de regras introduza um novo problema, chega-se a um ponto (que varia de acordo com a situação) em que adicionar uma nova regra para corrigir um problema provavelmente causará mais de um novo problema. Este é o “limite de complexidade”.

Provavelmente, o projeto de sistema especialista de maior duração é o Cyc (derivado da palavra “enciclopédico”), criado por Douglas Lenat e pelos seus colegas na Cycorp²³. Iniciado em 1984, o Cyc tem como objetivo codificar todo o “conhecimento de senso comum” — factos amplamente conhecidos, como *Um ovo que cai irá partir-se* ou *Uma criança a correr pela cozinha com sapatos sujos*

irá irritar os pais. Estas milhões de pequenas ideias não estão claramente documentadas num único local. São suposições não verbalizadas que fundamentam o comportamento e raciocínio humano, sendo necessárias para compreender o que a pessoa comum sabe em diversos domínios. No entanto, como o sistema Cyc também representa este conhecimento através de regras simbólicas, enfrenta igualmente o limite de complexidade.

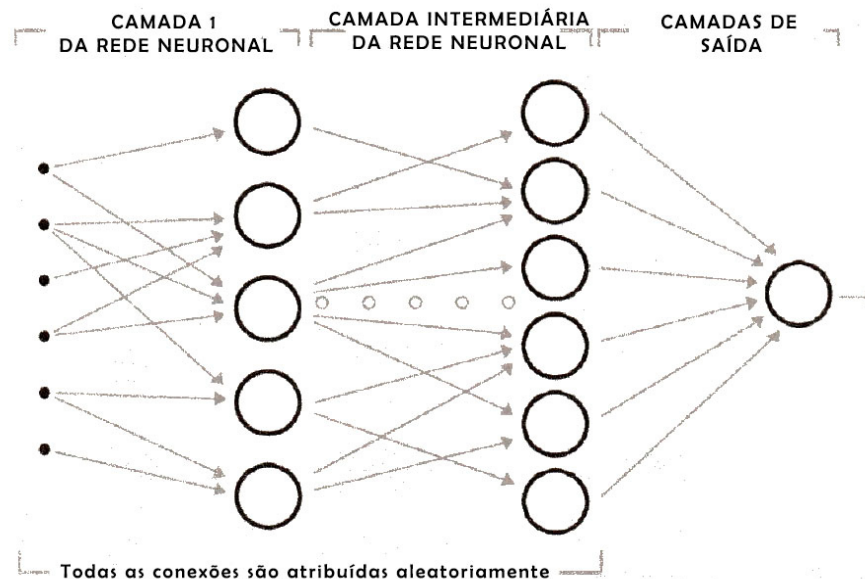
Na década de 1960, enquanto Minsky me aconselhava sobre os prós e os contras da abordagem simbólica, comecei a perceber o valor adicional da abordagem connexionista. Esta envolve redes de nodos que criam inteligência através da sua estrutura, em vez de através do seu conteúdo. Em vez de utilizarem regras inteligentes, recorrem a nodos simples organizados de tal forma que conseguem extrair perceções diretamente dos dados. Como resultado, têm o potencial de descobrir padrões subtis que nunca ocorreriam a programadores humanos ao tentarem conceber regras simbólicas. Uma das principais vantagens da abordagem connexionista é a sua capacidade de resolver problemas sem compreendê-los. Mesmo que tivéssemos uma capacidade perfeita para formular e implementar regras infalíveis na resolução de problemas com IA simbólica (o que não temos), estaríamos limitados pela nossa compreensão imperfeita de quais regras seriam ideais desde o início.

Esta é uma abordagem poderosa para enfrentar problemas complexos, mas é uma espada de dois gumes. A IA connexionista tende a tornar-se uma “caixa negra” — capaz de apresentar a resposta correta, mas incapaz de explicar como chegou a essa

conclusão²⁴. Isto pode tornar-se uma questão crucial, porque as pessoas desejam compreender o raciocínio por detrás de decisões importantes em áreas como tratamentos médicos, aplicação da lei, epidemiologia ou gestão de riscos. Por este motivo, muitos especialistas em IA estão agora a trabalhar no desenvolvimento de melhores formas de “transparência” (ou “interpretabilidade mecanicista”) para as decisões baseadas em aprendizagem automática²⁵. Contudo, ainda resta saber quão eficaz será a transparência à medida que o deep learning se torna mais complexo e poderoso.

Quando comecei a explorar o connexionismo, no entanto, os sistemas eram muito mais simples. A ideia básica era criar um modelo computacional inspirado no funcionamento das redes neuronais humanas. Inicialmente, isto era muito abstrato, porque o método foi concebido antes de termos uma compreensão detalhada de como as redes neuronais biológicas são, de facto, organizadas.

DIAGRAMA DE UMA REDE NEURONAL SIMPLES



Aqui está o esquema básico para um algoritmo de rede neuronal. Muitas variações são possíveis, e o designer do sistema precisa fornecer certos parâmetros e métodos críticos (detalhados abaixo).

Criar uma solução baseada em redes neurais para um problema envolve os seguintes passos:

- Definir a entrada.
- Definir a topologia da rede neuronal (isto é, as camadas de neurónios e as conexões entre os neurónios).
- Treinar a rede neuronal com exemplos do problema.
- Executar a rede neuronal treinada para resolver novos exemplos do problema.
- Tornar pública a empresa baseada na rede neuronal.

Estes passos (à exceção do último) são explicados em detalhe abaixo:

A ENTRADA DO PROBLEMA

A entrada do problema para a rede neuronal consiste numa série de números. Esta entrada pode ser:

- num sistema de reconhecimento de padrões visuais, uma matriz bidimensional de números que representa os píxeis de uma imagem; ou
- num sistema de reconhecimento auditivo (ex.: fala), uma matriz bidimensional de números que representa um som, em que a primeira dimensão representa os parâmetros do som (ex.: componentes de frequência) e a segunda dimensão representa diferentes instantes de tempo; ou
- num sistema de reconhecimento de padrões arbitrário, uma matriz n-dimensional de números que representa o padrão de entrada.

DEFINIR A TOPOLOGIA

Para configurar a rede neuronal, a arquitetura de cada neurónio consiste em:

- múltiplas entradas, em que cada entrada está “ligada” ao output de outro neurónio ou a um dos números de entrada; e
- geralmente, uma única saída, que está ligada ou à entrada de outro neurónio (que normalmente pertence a uma camada superior), ou à saída final.

CONFIGURAR A PRIMEIRA CAMADA DE NEURÓNIOS

- **Criar N_0 neurónios na primeira camada.** Para cada um destes neurónios, “ligar” cada uma das suas múltiplas entradas a “pontos” (ou seja, números) na entrada do problema. Estas conexões podem ser determinadas aleatoriamente ou utilizando um algoritmo evolutivo (ver abaixo).
- **Atribuir uma “força sináptica” inicial a cada conexão criada.** Estes pesos podem começar todos iguais, serem atribuídos aleatoriamente, ou serem determinados de outra forma (ver abaixo).

CONFIGURAR AS CAMADAS ADICIONAIS DE NEURÓNIOS

Configura um total de M camadas de neurónios. Para cada camada, configura os neurónios nessa camada. Para cada camada:

- Cria N_i neurónios na camada $_i$. Para cada um desses neurónios, “coneta” cada uma das múltiplas entradas do neurónio às saídas dos neurónios na camada $_{i-1}$ (ver variações abaixo).
- Atribui uma força sináptica inicial a cada conexão criada. Estes pesos podem começar todos iguais, ser atribuídos aleatoriamente ou determinados de outra forma (ver abaixo).
- As saídas dos neurónios na camada $_M$ são as saídas da rede neural (ver variações abaixo).

OS TESTES DE RECONHECIMENTO

COMO CADA NEURÓNIO FUNCIONA

Uma vez configurado o neurónio, este realiza os seguintes passos em cada teste de reconhecimento:

- Cada entrada ponderada do neurónio é calculada multiplicando a saída de outro neurónio (ou entrada inicial) ao qual a entrada deste neurónio está conetada pela força sináptica dessa conexão.
- Todas estas entradas ponderadas do neurónio são somadas.
- Se esta soma for maior que o limiar de ativação deste neurónio, então o neurónio é considerado ativo e a sua saída é 1. Caso contrário, a sua saída é 0 (ver variações abaixo).

REALIZE O SEGUINTE PARA CADA TESTE DE RECONHECIMENTO

Para cada camada, da camada₀ até à camada_M, e para cada neurónio na camada:

- Soma as suas entradas ponderadas. (Cada entrada ponderada = à saída de outro neurónio [ou entrada inicial] ao qual a entrada deste neurónio está conetada, multiplicada pela força sináptica dessa conexão.)

- Se esta soma das entradas ponderadas for superior ao limiar de ativação deste neurónio, define a saída deste neurónio como 1; caso contrário, define-a como 0.

TREINAR A REDE NEURAR

- Realiza testes de reconhecimento repetidos com problemas de amostra.
- Após cada teste, ajusta as forças sinápticas de todas as conexões interneuronais para melhorar o desempenho da rede neural nesse teste. (Consulte a discussão abaixo sobre como fazer isto.)
- Continua este treino até que a taxa de precisão da rede neural deixe de melhorar (ou seja, atinja um limite assintótico).

DESIÇÕES IMPORTANTES DE DESIGN

No esquema simples apresentado acima, o designer deste algoritmo de rede neural precisa de determinar desde o início:

- O que os números de entrada representam.
- O número de camadas de neurónios.
- O número de neurónios em cada camada. (Cada camada não precisa necessariamente de ter o mesmo número de neurónios.)
- O número de entradas para cada neurónio em cada camada. O número de entradas (ou seja, conexões

interneurais) também pode variar de neurónio para neurónio e de camada para camada.

- O “encaminhamento” efetivo (isto é, as conexões). Para cada neurónio em cada camada, isto consiste numa lista de outros neurónios cujas saídas constituem as entradas deste neurónio. Este é um elemento de design crucial. Há várias formas possíveis de realizar este encaminhamento:
 - (i) Configurar a rede neural de forma aleatória; ou
 - (ii) Utilizar um algoritmo evolucionário (ver abaixo) para determinar uma configuração ótima; ou
 - (iii) Utilizar o melhor julgamento do designer do sistema para determinar o encaminhamento.
- As forças sinápticas iniciais (isto é, os pesos) de cada conexão. Há várias formas possíveis de atribuir estas forças:
 - (i) Definir as forças sinápticas com o mesmo valor; ou
 - (ii) Definir as forças sinápticas com diferentes valores aleatórios; ou
 - (iii) Utilizar um algoritmo evolucionário para determinar um conjunto ótimo de valores iniciais; ou
 - (iv) Utilizar o melhor julgamento do designer do sistema para determinar os valores iniciais.
- O limiar de ativação de cada neurónio.
- A saída, que pode ser:

- (i) as saídas da camada_M de neurónios; ou
 - (ii) a saída de um único neurónio de saída, cujas entradas são as saídas dos neurónios na camada_M; ou
 - (iii) uma função de (por exemplo, uma soma das) saídas dos neurónios na camada_M; ou
 - (iv) outra função das saídas dos neurónios em várias camadas
- As forças sinápticas de todas as conexões devem ser ajustadas durante o treino desta rede neural. Esta é uma decisão fundamental de design e tem sido objeto de muita pesquisa e discussão. Existem várias formas possíveis de realizar este ajuste:
 - (i) Para cada teste de reconhecimento, aumenta ou diminui cada força sináptica por um valor fixo (geralmente pequeno) de modo a que a saída da rede neural se aproxime mais da resposta correta. Uma forma de fazer isto é experimentar tanto o aumento quanto a diminuição e observar qual tem um efeito mais desejável. Isto pode ser demorado, pelo que existem outros métodos para tomar decisões locais sobre aumentar ou diminuir cada força sináptica.
 - (ii) Outros métodos estatísticos permitem modificar as forças sinápticas após cada teste de reconhecimento para que o desempenho da rede neural nesse teste se aproxime mais da resposta correta.
 - (iii) É importante notar que o treino da rede neural funciona mesmo que as respostas aos testes de treino não estejam todas corretas. Isto permite utilizar dados

reais de treino que podem conter uma taxa inerente de erro. Um fator-chave para o sucesso de um sistema de reconhecimento baseado em redes neurais é a quantidade de dados utilizados para o treino. Normalmente, é necessário um volume muito substancial para obter resultados satisfatórios. Tal como acontece com estudantes humanos, o tempo dedicado por uma rede neural a aprender as suas lições é um fator crucial para o seu desempenho.

VARIAÇÕES

São possíveis muitas variações em relação ao mencionado anteriormente:

- Existem diferentes maneiras de determinar a topologia. Em particular, o encaminhamento interneuronal pode ser configurado aleatoriamente ou através de um algoritmo evolucionário, que imita os efeitos de mutações e seleção natural no design da rede.
- Existem diferentes abordagens para definir as forças sinápticas iniciais.
- As entradas dos neurónios numa camada não precisam necessariamente vir das saídas dos neurónios na camada _{$i-1$} . Alternativamente, as entradas dos neurónios em cada camada podem vir de qualquer camada inferior ou superior.
- Existem diferentes maneiras de determinar a saída final.

- O método descrito acima resulta numa ativação “tudo ou nada” (1 ou 0), chamado de não-linearidade. Há outras funções não-lineares que podem ser usadas. Comumente, utiliza-se uma função que varia de 0 até 1 de forma rápida, mas relativamente mais gradual. Além disso, as saídas podem ser números diferentes de 0 e 1.
- Os diferentes métodos para ajustar as forças sinápticas durante o treino representam decisões-chave de design.

No esquema acima, cada teste de reconhecimento é realizado computando as saídas de cada camada, começando pela camada₀ até à camada_M. Num sistema verdadeiramente paralelo, onde cada neurónio funciona independentemente dos outros, os neurónios podem operar “assincronamente” (isto é, de forma independente). Na abordagem assíncrona, cada neurónio está constantemente a monitorizar as suas entradas e ativa-se sempre que a soma das suas entradas ponderadas excede o seu limiar de ativação (ou o que a sua função de saída especificar).

O objetivo é encontrar exemplos reais a partir dos quais o sistema pode descobrir como resolver um problema. O ponto de partida típico é configurar o encaminhamento da rede neural e os pesos sinápticos de forma aleatória, fazendo com que as respostas produzidas por esta rede neural não treinada também sejam aleatórias. A função principal de uma rede neural é aprender a sua matéria, tal como os cérebros de mamíferos nos quais está (pelo menos aproximadamente) modelada. Uma rede neural começa sem

conhecimentos, mas é programada para maximizar uma função de “recompensa”. Posteriormente, é alimentada com dados de treino (por exemplo, fotos contendo corgis e fotos sem corgis, conforme etiquetadas previamente por humanos). Quando a rede neural produz uma saída correta (por exemplo, identifica com precisão se há ou não um corgi na imagem), recebe feedback de recompensa. Este feedback pode ser utilizado para ajustar a força de cada conexão interneuronal. As conexões consistentes com a resposta correta são fortalecidas, enquanto aquelas que produzem respostas erradas são enfraquecidas.

Com o tempo, a rede neural organiza-se para ser capaz de fornecer as respostas corretas sem supervisão. Experiências demonstram que redes neurais podem aprender o conteúdo mesmo com professores pouco confiáveis. Se os dados de treino estiverem corretamente etiquetados apenas 60% das vezes, uma rede neural ainda pode aprender com uma precisão superior a 90%. Sob algumas condições, mesmo proporções menores de etiquetas corretas podem ser eficazes²⁶.

Não é intuitivo que um professor possa treinar um aluno para ultrapassar as suas próprias habilidades, e igualmente confuso como dados de treino pouco confiáveis podem resultar em desempenhos excelentes. A explicação curta é que os erros podem cancelar-se mutuamente. Por exemplo, ao treinar uma rede neural para reconhecer o número 8 em amostras manuscritas dos números de 0 a 9, e assumindo que um terço das etiquetas são imprecisas — uma mistura aleatória de 8s codificados como 4s, 5s codificados como 8s, e assim por diante. Se o conjunto de dados for

suficientemente grande, essas imprecisões equilibram-se e não influenciam demasiado o treino numa direção específica. Isto preserva a maior parte das informações úteis no conjunto de dados sobre como os 8s devem parecer e ainda treina a rede neural com um padrão elevado.

Apesar das suas vantagens, os sistemas connexionistas iniciais tinham uma limitação fundamental. Redes neurais com apenas uma camada eram matematicamente incapazes de resolver determinados tipos de problemas²⁷. Quando visitei o Professor Frank Rosenblatt na Universidade de Cornell, em 1964, ele mostrou-me uma rede neural de camada única chamada *Perceptron*, capaz de reconhecer letras impressas. Experimentei modificações simples na entrada, e o sistema mostrou um desempenho razoável em autoassociação (ou seja, conseguia reconhecer as letras mesmo quando partes delas estavam cobertas), mas apresentou resultados menos satisfatórios em invariância (não conseguia reconhecer letras após alterações no tamanho ou na fonte).

Em 1969, Minsky criticou o aumento do interesse nesta área, apesar de ele próprio ter realizado um trabalho pioneiro sobre redes neurais em 1953. Ele e Seymour Papert, os dois cofundadores do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, escreveram um livro intitulado *Perceptrons*, no qual demonstraram formalmente por que razão um *Perceptron* era inerentemente incapaz de determinar se uma imagem impressa era ou não conetada. As duas imagens na página 27 são da capa de *Perceptrons*. A imagem superior não está conetada (as linhas pretas não formam uma única forma contínua),

enquanto a imagem inferior está conetada (as linhas pretas formam uma única forma contínua). Um humano consegue determinar isto, assim como um programa de software simples. No entanto, um *Perceptron* do tipo feed-forward (no qual as conexões entre os nós não formam ciclos) como o Mark 1 Perceptron de Rosenblatt não consegue fazer esta determinação.

Resumidamente, a razão pela qual *Perceptrons* do tipo feed-forward não conseguem resolver este problema é porque tal exige a aplicação da função lógica XOR (ou exclusivo), que classifica se um segmento de linha faz parte de uma única forma contínua na imagem, mas não de outra. Contudo, uma única camada de nós sem retroalimentação é matematicamente incapaz de implementar o XOR, porque essencialmente precisa de classificar todos os dados de uma só vez com uma regra linear (por exemplo, "Se ambos estes nós ativarem, a saída da função é verdadeira"), e o XOR exige uma etapa de retroalimentação ("Se um destes nós ativar, mas não ambos, a saída da função é verdadeira").

Quando Minsky e Papert chegaram a esta conclusão, isso levou à retirada da maior parte do financiamento para o campo do connexionismo, e seriam precisas décadas para que este voltasse a ganhar força. Contudo, em 1964, Rosenblatt explicou-me que a incapacidade do *Perceptron* em lidar com a invariância estava relacionada com a falta de camadas. Se se utilizasse a saída de um *Perceptron* e a encaminhasse para outra camada idêntica, a saída tornar-se-ia mais abrangente e, com repetições sucessivas deste processo, seria cada vez mais capaz de lidar com a invariância. Com camadas suficientes e dados de treino adequados, seria possível

lidar com níveis impressionantes de complexidade. Perguntei-lhe se alguma vez tinha tentado isto, e ele disse-me que não, mas que era uma prioridade na sua agenda de investigação. Era uma percepção notável, mas Rosenblatt faleceu apenas sete anos depois, em 1971, antes de ter a oportunidade de testar essas ideias. Seria necessário mais uma década até que redes com múltiplas camadas se tornassem comuns, e mesmo assim redes com muitas camadas exigiam mais capacidade computacional e dados de treino do que era prático na época. O enorme progresso recente na IA tem sido impulsionado pelo uso de múltiplas camadas de redes neurais, mais de meio século após Rosenblatt ter considerado a ideia.

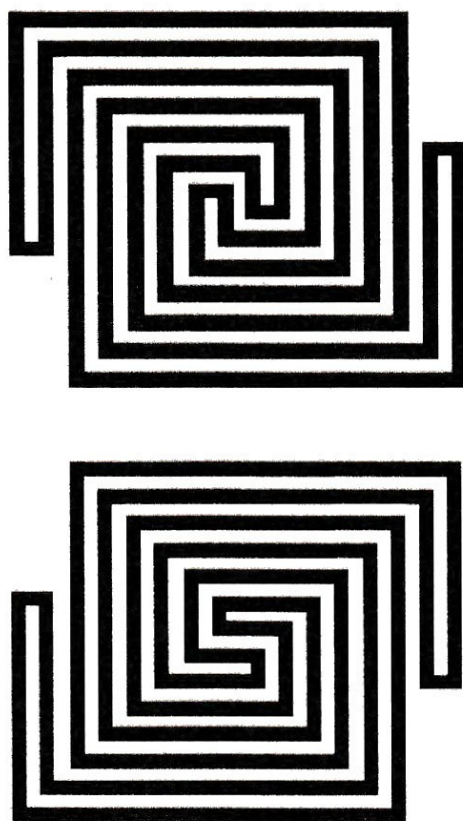


FIG. 2.2 A IMAGEM SUPERIOR NÃO ESTÁ CONETADA (AS LINHAS PRETAS NÃO FORMAM UMA ÚNICA FORMA CONTÍNUA), ENQUANTO A IMAGEM INFERIOR ESTÁ CONETADA (AS LINHAS PRETAS FORMAM UMA ÚNICA FORMA CONTÍNUA).

As abordagens conexionistas à IA foram amplamente ignoradas até meados da década de 2010, altura em que os avanços no hardware finalmente libertaram o seu potencial latente. Finalmente, tornou-se suficientemente barato reunir o poder computacional e os exemplos de treino necessários para que este método se destacasse. Entre a publicação de *Perceptrons* em 1969 e a morte de Minsky em 2016, a relação preço-desempenho computacional (ajustada pela inflação) aumentou cerca de 2,8 mil milhões de vezes²⁸. Isto alterou profundamente o panorama das abordagens possíveis em IA. Quando falei com Minsky perto do fim da sua vida, ele expressou arrependimento pelo impacto que *Perceptrons* teve, já que nessa altura o conexionismo tinha recentemente começado a alcançar um amplo sucesso no campo.

O conexionismo assemelha-se, de certa forma, às invenções de máquinas voadoras de Leonardo da Vinci — ideias prescientes, mas inviáveis até que materiais mais leves e resistentes pudessem ser desenvolvidos²⁹. Quando o hardware conseguiu acompanhar estas ideias, as redes conexionistas vastas, como aquelas com cem camadas, tornaram-se viáveis. Como resultado, estes sistemas foram capazes de resolver problemas que nunca tinham sido abordados antes. Este é o paradigma que impulsiona os avanços mais espetaculares dos últimos anos.

3. O Cerebelo: Uma Estrutura Modular

Para compreender as redes neuronais no contexto da inteligência humana, proponho uma pequena digressão: voltemos ao início do universo. O movimento inicial da matéria em direção a uma maior

organização progrediu muito lentamente, sem cérebros para a guiar. (Ver a secção “A Incrível Improbabilidade de Existir”, no capítulo 3, sobre a probabilidade de o universo ter a capacidade de codificar informação útil.) O tempo necessário para criar um novo nível de detalhe foi de centenas de milhões a milhares de milhões de anos³⁰.

De facto, foram necessários milhares de milhões de anos até que uma molécula pudesse começar a formular instruções codificadas para criar um ser vivo. Há alguma discordância sobre as provas atualmente disponíveis, mas a maioria dos cientistas situa o início da vida na Terra entre 3,5 e 4,0 mil milhões de anos atrás³¹. O universo tem uma idade estimada de 13,8 mil milhões de anos (ou, mais precisamente, é este o tempo que passou desde o Big Bang), e a Terra formou-se provavelmente há cerca de 4,5 mil milhões de anos³². Assim, passaram-se cerca de 10 mil milhões de anos entre a formação dos primeiros átomos e as primeiras moléculas (na Terra) tornarem-se capazes de autorreplicação. Parte desta lacuna pode ser explicada pelo acaso — não sabemos exatamente quão improvável foi que as moléculas, ao acaso, colidissem de forma certa na “sopa primordial” da Terra primitiva. Talvez a vida pudesse ter começado um pouco mais cedo, ou talvez fosse mais provável começar muito mais tarde. Contudo, antes que qualquer uma destas condições necessárias fosse possível, ciclos estelares inteiros tiveram de se completar, à medida que as estrelas fundiram hidrogénio em elementos mais pesados, necessários para sustentar vida complexa.

De acordo com as melhores estimativas dos cientistas, cerca de 2,9 mil milhões de anos passaram entre a primeira forma de vida na Terra e o surgimento da primeira vida multicelular³³. Outros 500 milhões de anos passaram até que os animais caminhassem em terra firme, e mais 200 milhões até aparecerem os primeiros mamíferos³⁴. Focando no cérebro, o tempo entre o desenvolvimento das primeiras redes nervosas primitivas e o surgimento dos primeiros cérebros centralizados tripartidos foi de mais de 100 milhões de anos³⁵. O primeiro neocórtex básico só surgiu cerca de 350 a 400 milhões de anos depois, e foram necessários mais 200 milhões de anos, aproximadamente, para que o cérebro humano moderno evoluísse³⁶.

Ao longo da história, os cérebros mais sofisticados proporcionaram uma vantagem evolutiva marcada. Quando os animais competiam pelos recursos, os mais inteligentes frequentemente prevaleciam³⁷. A inteligência evoluiu num período muito mais curto do que os passos anteriores: milhões de anos, representando uma aceleração distinta. A mudança mais notável nos cérebros dos pré-mamíferos foi a região chamada de cerebelo. Os cérebros humanos de hoje têm, na verdade, mais neurónios no cerebelo do que no neocórtex, que desempenha o maior papel nas nossas funções cognitivas superiores³⁸. O cerebelo é capaz de armazenar e ativar um grande número de 'scripts' que controlam as tarefas motoras, como o de assinar o seu nome. (Estes 'scripts' são frequentemente conhecidos, de forma informal, como "memória muscular". Isto não é, de facto, um fenómeno dos próprios músculos, mas sim do cerebelo. À medida que uma ação é repetida inúmeras vezes, o cérebro adapta-se para a tornar mais fácil e

subconsciente — como a passagem de muitas rodas de carroça que, com o tempo, criam sulcos profundos num trilho.)³⁹

Uma das formas de apanhar uma bola aérea é resolver todas as equações diferenciais que governam a trajetória da bola, bem como os movimentos do próprio corpo, e ao mesmo tempo reposicionar-se com base nessas soluções. Infelizmente, não temos um mecanismo no cérebro que resolva equações diferenciais, por isso resolvemos um problema mais simples: como posicionar a luva de forma mais eficaz entre a bola e o nosso corpo. O cerebelo assume que a nossa mão e a bola devem parecer estar em posições relativas semelhantes em cada apanha, por isso, se a bola estiver a descer demasiado rápido e a nossa mão parecer estar a mover-se demasiado devagar, o cerebelo irá direccionar a nossa mão para se mover mais rapidamente, de forma a corresponder à posição relativa conhecida.

Estas ações simples realizadas pelo cerebelo para mapear entradas sensoriais em movimentos musculares correspondem à ideia matemática de “funções base” e permitem-nos apanhar a bola sem resolver equações diferenciais⁴⁰. Também conseguimos usar o cerebelo para antecipar o que seriam as nossas ações, mesmo que não as realizemos. O nosso cerebelo pode indicar-nos que podemos apanhar a bola, mas que provavelmente iremos chocar contra outro jogador, então talvez não devamos executar essa ação. Tudo isto acontece instintivamente.

Da mesma forma, se estivermos a dançar, o nosso cerebelo irá frequentemente direccionar os nossos movimentos sem que

estejamos conscientes disso. As pessoas que têm um cerebelo não totalmente funcional devido a lesões ou doenças ainda conseguem executar ações voluntárias através do neocórtex, mas isso exige um esforço concentrado, e podem sofrer de problemas de coordenação conhecidos como ataxia⁴¹.

Um componente-chave para dominar competências físicas é executar frequentemente as ações que as constituem, até que fiquem gravadas na nossa memória muscular. Movimentos que anteriormente exigiam pensamento consciente e foco começam a parecer automáticos. Isto representa, essencialmente, uma transição do controlo pelo córtex motor para um controlo mais centrado no cerebelo. Quer estejamos a lançar uma bola de futebol americano, a resolver um Cubo de Rubik ou a tocar piano, quanto menos esforço mental consciente for necessário para realizar a tarefa, maior será a probabilidade de um bom desempenho. As nossas ações serão mais rápidas e suaves, e podemos dedicar a nossa atenção a outros aspetos para alcançar o sucesso. Quando os músicos dominam o seu instrumento, conseguem produzir uma nota com a mesma facilidade e intuição com que as pessoas comuns produzem notas com a voz enquanto cantam “Parabéns a Você”. Se eu lhe perguntasse como faz as cordas vocais produzirem a nota certa, em vez da errada, provavelmente não conseguiria descrever o processo em palavras. É isto que os psicólogos e treinadores chamam de “competência inconsciente”, pois a capacidade funciona maioritariamente a um nível abaixo da sua consciência⁴².

Ainda assim, os poderes do cerebelo não são o resultado de uma arquitetura extremamente complexa. Apesar de conter a maioria

dos neurónios do cérebro de um humano adulto (ou de outras espécies), o cerebelo é composto maioritariamente por módulos pequenos e simples, e há pouca informação sobre o seu design global no genoma.⁴³ Embora a neurociência ainda esteja a trabalhar para compreender os detalhes sobre como o cerebelo funciona, sabemos que ele consiste em milhares de pequenos módulos de processamento dispostos numa estrutura de avanço contínuo⁴⁴. Isto ajuda a moldar a nossa compreensão sobre quais as arquiteturas neurais necessárias para realizar as funções do cerebelo, e novas descobertas sobre o cerebelo poderão, assim, oferecer mais informações úteis para o campo da inteligência artificial.

A maioria dos módulos do cerebelo têm funções estreitamente definidas — os que regulam os movimentos dos nossos dedos enquanto tocamos piano não se aplicam aos movimentos das nossas pernas enquanto caminhamos. Embora o cerebelo tenha sido uma região-chave do cérebro durante centenas de milhões de anos, os humanos confiam cada vez menos nele para a sobrevivência, à medida que o nosso neocórtex mais flexível assumiu a liderança na navegação pela sociedade moderna⁴⁵.

Em contraste, os animais não mamíferos não possuem as vantagens de um neocórtex. Em vez disso, os seus cerebelos registaram de forma muito precisa os comportamentos essenciais de que necessitam para sobreviver. Estes comportamentos, impulsionados pelo cerebelo, são conhecidos como padrões de ação fixos. Estes estão gravados de forma inata nos membros de uma espécie, ao contrário dos comportamentos aprendidos por

observação e imitação. Mesmo nos mamíferos, alguns comportamentos bastante complexos são inatos. Por exemplo, os ratos-do-campo cavam tocas curtas, enquanto os ratos-das-praias cavam tocas mais longas com um túnel de fuga⁴⁶. Quando ratos criados em laboratório, sem qualquer experiência prévia com tocas, foram colocados em areia, cada um cavou o tipo de toca característico da sua respectiva espécie em estado selvagem.

Na maioria dos casos, uma ação específica no cerebelo — como a capacidade de um sapo apanhar uma mosca com precisão usando a língua — persiste numa espécie até que uma população com uma ação melhorada a ultrapasse através da seleção natural. Quando os comportamentos são impulsionados pela genética, em vez da aprendizagem, eles são imensamente mais lentos a adaptar-se. Enquanto a aprendizagem permite que os seres modifiquem significativamente os seus comportamentos durante uma única vida, os comportamentos inatos estão limitados a mudanças graduais ao longo de muitas gerações. Curiosamente, os cientistas da computação, por vezes, utilizam abordagens “evolutivas” que refletem os comportamentos determinados geneticamente⁴⁷. Isto envolve criar um conjunto de programas com certas características aleatórias e analisar o quão bem desempenham uma tarefa específica. Os programas que obtêm bons resultados podem ter as suas características combinadas, de forma semelhante à mistura genética na reprodução animal. “Mutações” aleatórias podem então ser introduzidas para determinar quais melhoram o desempenho. Ao longo de muitas gerações, esta abordagem pode otimizar a resolução de problemas de maneiras que os programadores humanos nunca teriam considerado.

Implementar o equivalente a esta abordagem no mundo real leva milhões de anos. Isto pode parecer lento, mas lembre-se que a evolução anterior à biologia — como a formação dos complexos produtos químicos precursores necessários para a vida — tendia a levar centenas de milhões de anos, e o cerebelo, na verdade, funcionou como um acelerador.

4. O Neocórtex: Uma Estrutura Autorregulável, Hierárquica e Flexível

Para alcançar progressos mais rápidos, a evolução precisava de criar uma forma para que o cérebro desenvolvesse novos comportamentos sem ter de esperar por alterações genéticas que reconfigurassem o cerebelo. Foi então que surgiu o neocórtex. Significando “casca nova”, ele emergiu há cerca de 200 milhões de anos numa classe inédita de animais: os mamíferos⁴⁸. Nos primeiros mamíferos, que se assemelhavam a roedores, o neocórtex tinha o tamanho de um selo postal e era igualmente fino; envolvia os seus cérebros do tamanho de uma noz⁴⁹. Contudo, era organizado de forma mais flexível do que o cerebelo. Em vez de ser uma coleção de módulos distintos que controlavam diferentes comportamentos, o neocórtex funcionava mais como um todo coordenado. Por conseguinte, era capaz de um novo tipo de pensamento: podia inventar novos comportamentos em questão de dias ou até horas. Isto desbloqueou o poder da aprendizagem.

Há mais de 200 milhões de anos, os lentos processos de adaptação dos animais não mamíferos geralmente não eram um

problema, dado que o ambiente mudava muito devagar. Tipicamente, era necessário que decorressem milhares de anos para que uma transformação ambiental exigisse uma resposta no cerebelo.

O neocórtex estava, por assim dizer, à espera de uma calamidade para assumir o domínio do mundo. Essa crise, que hoje chamamos de evento de extinção Cretáceo-Paleogeno, ocorreu há 65 milhões de anos, 135 milhões de anos após o surgimento do neocórtex. Devido ao impacto de um asteroide e possivelmente também a atividade vulcânica, o ambiente em todo o planeta mudou repentinamente, resultando na extinção de cerca de 75% de todas as espécies de animais e plantas, incluindo os dinossauros. (Embora os seres que conhecemos como dinossauros tenham desaparecido durante esse evento, alguns cientistas consideram as aves como uma ramificação sobrevivente dos dinossauros.)⁵⁰

Foi nesse momento que o neocórtex, capaz de criar novas soluções rapidamente, ganhou destaque. Os mamíferos aumentaram de tamanho. O cérebro dos mamíferos cresceu a um ritmo ainda mais acelerado, ocupando uma fração maior da massa corporal de um animal. E o neocórtex cresceu mais rapidamente ainda, desenvolvendo dobras para expandir a sua área superficial.

Se esticasse o neocórtex de um ser humano, ele teria o tamanho e a espessura de um grande guardanapo de jantar⁵¹. Mas, devido à extrema complexidade da sua estrutura, atualmente constitui cerca de 80% do peso do cérebro humano⁵².

Descrevo em mais detalhe o funcionamento do neocórtex no meu livro de 2012, *Como Criar uma Mente*, mas um resumo muito breve aqui transmitirá os conceitos-chave. O neocórtex consiste numa estrutura relativamente simples e repetitiva, cada uma composta por cerca de cem neurónios. Estes módulos conseguem aprender, reconhecer e memorizar um padrão. Os módulos também aprendem a organizar-se em hierarquias, com cada nível superior dominando conceitos cada vez mais sofisticados. Estas subunidades repetitivas são conhecidas como microcolunas corticais⁵³.

De acordo com as estimativas atuais, existem entre 21 e 26 mil milhões de neurónios em todo o córtex cerebral, e 90 por cento desses — uma média de cerca de 21 mil milhões — estão no próprio neocórtex⁵⁴. Com aproximadamente cem neurónios cada, isso sugere que temos algo em torno de 200 milhões de microcolunas⁵⁵. Pesquisas recentes mostram que, ao contrário dos computadores digitais, que realizam a maioria das suas operações de forma sequencial, os módulos do neocórtex empregam um paralelismo massivo⁵⁶. Em essência, muitas coisas acontecem simultaneamente. Isso torna o cérebro um sistema muito dinâmico e um grande desafio para modelar computacionalmente.

A neurociência ainda tem muito a aprender sobre os detalhes, mas os conceitos básicos de como as microcolunas são organizadas e conetadas lançam luz sobre a sua função. Tal como as redes neurais artificiais que operam em hardware de silício, as redes neurais no cérebro utilizam camadas hierárquicas que separam as entradas de dados brutos (sinais sensoriais, no caso humano) e as saídas (para os humanos, o comportamento). Essa estrutura

permite níveis progressivos de abstração, culminando nas formas subtis de cognição que reconhecemos como humanas.

No nível mais básico (conetado diretamente às entradas sensoriais), um módulo pode servir para reconhecer um dado estímulo visual como uma forma curva. Os outros níveis processam as saídas dos módulos inferiores do neocórtex e acrescentam contexto e abstração. Assim, os níveis progressivamente superiores (mais distantes daquelesonetados aos sentidos) podem reconhecer essa forma curva como parte de uma letra, reconhecer essa letra como parte de uma palavra e conetar essa palavra a significados semânticos ricos. No nível mais alto estão conceitos muito mais abstratos, como o reconhecimento de que uma afirmação é engraçada, irónica ou sarcástica.

Embora a “altura” de um nível neocortical defina o seu grau de abstração em relação a um conjunto único de sinais que se propagam a partir dos inputs sensoriais, este processo não é unidirecional. As seis camadas principais do neocórtex comunicam-se dinamicamente entre si em ambas as direções — não podemos, portanto, afirmar que o pensamento abstrato ocorre exclusivamente nas camadas superiores.⁵⁷ É mais útil pensar na relação entre níveis e abstração num contexto de espécies. Ou seja, os nossos neocórtices multicamadas conferem-nos uma maior capacidade para o pensamento abstrato em comparação com criaturas que possuem córtices mais simples. E, quando os humanos forem capazes de conetar diretamente os seus neocórtices à computação baseada em nuvem, desbloquearão o potencial para um pensamento ainda mais abstrato do que aquele

que os nossos cérebros orgânicos conseguem atualmente suportar por conta própria.

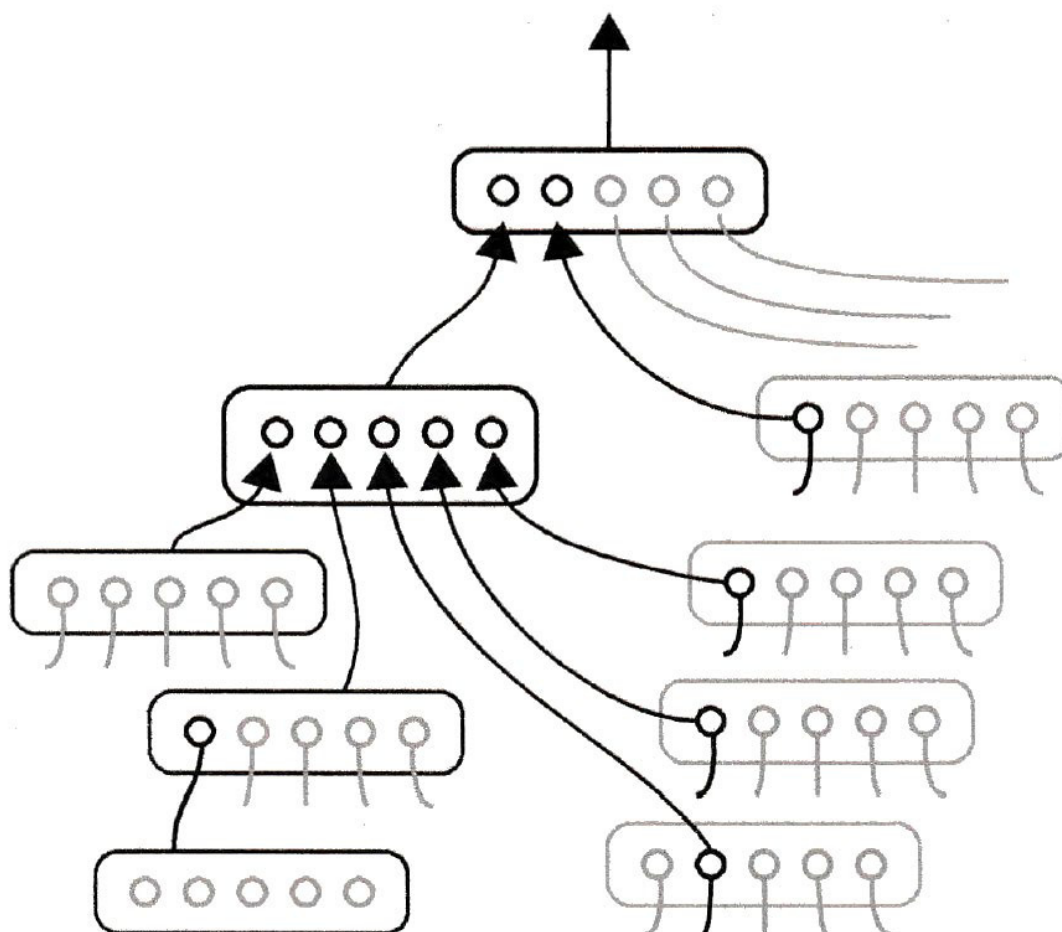


FIG. 2.3 ESTRUTURA MULTICAMADAS DO NEOCÓRTEX

As bases neurológicas destas abstrações são uma descoberta relativamente recente. Quando uma paciente epilética de dezasseis anos estava a ser submetida a uma cirurgia cerebral no final da década de 1990, o neurocirurgião Itzhak Fried manteve-a acordada para que pudesse responder ao que estava a acontecer.⁵⁸ Isso foi possível porque não existem recetores de dor no cérebro.⁵⁹ Sempre que ele estimulava um ponto específico no seu neocórtex, ela começava a rir. Fried e a sua equipa rapidamente perceberam que estavam a desencadear a perceção real de humor. Ela não estava

simplesmente a rir como um reflexo — ela genuinamente achava a situação presente engraçada, apesar de nada humorístico ter ocorrido na sala de operações. Quando os médicos lhe perguntavam por que estava a rir, ela não respondia algo como “Ah, sem nenhuma razão em particular” ou “Vocês estimularam o meu cérebro,” mas, em vez disso, encontrava imediatamente uma causa para justificar. Explicava o seu riso com um comentário como, “Vocês são tão engraçados — só por estarem aí em pé.”⁶⁰

A viabilidade de localizar e ativar o ponto no neocórtex que codifica a percepção de algo como divertido revelou que este é responsável por conceitos como humor e ironia. Outros testes não invasivos reforçaram esta descoberta. Por exemplo, ler frases irónicas ativa partes do cérebro conhecidas como a rede TdM (Teoria da Mente).⁶¹ Esta capacidade de abstração neocortical foi o fator crucial que permitiu aos humanos inventar a linguagem, música, humor, ciência, arte e tecnologia.⁶²

Nenhuma outra espécie alcançou estas coisas (apesar dos frequentes títulos sensacionalistas em contrário). Nenhum outro animal consegue acompanhar um ritmo na sua mente, contar uma piada, fazer um discurso ou escrever (ou ler!) este livro. Embora alguns outros animais, como os chimpanzés, consigam criar ferramentas primitivas, estes instrumentos não são suficientemente sofisticados para desencadear um processo rápido de autoaperfeiçoamento.⁶³ De forma semelhante, alguns outros animais utilizam formas simples de comunicação, mas não são capazes de comunicar ideias hierárquicas, algo que conseguimos fazer com a linguagem humana.⁶⁴ Já éramos muito competentes

como primatas sem um córtex frontal, mas, quando estes módulos adicionais se tornaram disponíveis e nos permitiram compreender conceitos sobre o mundo e a existência, ultrapassámos a condição de apenas animais avançados e tornámo-nos seres filosóficos.

Ainda assim, devemos lembrar que a evolução do cérebro foi apenas uma parte da nossa ascensão como espécie. Por toda a nossa capacidade neocortical, a ciência e a arte humanas não seriam possíveis sem outra inovação fundamental: os nossos polegares.⁶⁵ Animais com neocórtices comparáveis ou até maiores (em termos absolutos) aos dos humanos — como baleias, golfinhos e elefantes — não possuem nada como um polegar opositor, capaz de agarrar materiais naturais com precisão e transformá-los em tecnologia. A lição: somos muito afortunados do ponto de vista evolutivo!

Somos também afortunados pelo facto de o nosso neocórtex não se limitar a ter camadas, mas conectá-las de formas novas e poderosas. A organização hierárquica dos módulos não é exclusiva do neocórtex — o cerebelo também possui hierarquias.⁶⁶ O que distingue o neocórtex são três características principais que permitem a criatividade dos mamíferos, especialmente dos humanos: 1) consegue propagar o padrão de disparo neuronal de um dado conceito amplamente por toda a sua estrutura, em vez de se limitar apenas à área específica onde se originou; 2) um determinado padrão de disparo pode ser associado a aspetos semelhantes de muitos conceitos diferentes, e conceitos relacionados são representados por padrões de disparo relacionados; e 3) milhões de padrões podem disparar

simultaneamente⁶⁷ em todo o neocórtex e interagir entre si de formas complexas.⁶⁸

Por exemplo, as ligações altamente complexas dentro do neocórtex permitem memórias associativas ricas.⁶⁹ Uma memória no cérebro é como uma página da Wikipédia — pode ser ligada a partir de muitos lugares diferentes e pode mudar ao longo do tempo. Tal como um artigo da Wikipédia, as memórias também podem ser multimédia. Uma memória pode ser desencadeada por um cheiro, um sabor, um som ou quase qualquer estímulo sensorial.

Além disso, semelhanças nos padrões de disparo do neocórtex promovem o pensamento analógico. O padrão que representa baixar a posição da mão estará relacionado com o padrão que representa baixar o tom da voz — e até com descidas metafóricas, como os conceitos de temperatura em queda ou o declínio de um império na história. Assim, podemos formar um padrão ao aprender um conceito num domínio e depois aplicá-lo a um domínio completamente diferente.

A capacidade do neocórtex para estabelecer analogias entre áreas díspares é responsável por muitos dos saltos intelectuais mais importantes ao longo da história. Por exemplo, a teoria da evolução de Charles Darwin surgiu a partir de uma analogia com a geologia. Antes de Darwin (1809-1882), os cientistas basicamente acreditavam que Deus tomava a decisão de criar cada espécie individualmente. Houve algumas teorias quase evolutivas anteriores — mais notavelmente, a de Jean-Baptiste Lamarck

(1744-1829), que propôs que os animais tinham uma progressão natural de evolução para espécies mais complexas e que os descendentes poderiam herdar características que os seus pais adquiriram ou desenvolveram durante as suas próprias vidas.⁷⁰ Contudo, para cada uma destas teorias, os mecanismos propostos eram ou mal explicados ou falsos.

Mas Darwin foi exposto a uma ideia diferente ao estudar o trabalho do geólogo escocês Charles Lyell (1797-1875), que defendia uma noção controversa sobre a origem de grandes desfiladeiros.⁷¹ A visão predominante era de que o desfiladeiro existia como uma criação divina, e que um rio que fluía através dele simplesmente havia encontrado o fundo do desfiladeiro devido à gravidade. A concepção de Lyell era de que o rio surgiu primeiro e que o desfiladeiro veio apenas mais tarde. A sua teoria enfrentou resistência significativa e demorou algum tempo a ser aceite, mas os cientistas acabaram por perceber que os pequenos impactos da água corrente sobre as rochas, multiplicados ao longo de milhões de anos, podiam, de facto, escavar uma ravina tão profunda como o Grand Canyon. A teoria de Lyell baseava-se fortemente no trabalho do seu colega geólogo escocês James Hutton (1726-1797), que havia proposto pela primeira vez a teoria do uniformitarismo,⁷² que defendia que, em vez de o mundo ter sido moldado principalmente por uma catástrofe bíblica, como um dilúvio, era o produto de um conjunto constante de forças naturais agindo gradualmente ao longo do tempo.

Darwin enfrentou um desafio muito mais árduo na sua própria área. A biologia era infinitamente complexa, mas Darwin viu a

ligação entre Lyell e os seus próprios estudos como naturalista, uma conexão que ele estabeleceu logo na abertura do seu livro de 1859, *A Origem das Espécies*. Ele aplicou o conceito de Lyell sobre a importância de um rio erodir pequenos grãos de pedra de cada vez a uma pequena alteração genética ao longo de uma geração. Darwin defendeu a sua teoria com a analogia explícita: “Assim como a geologia moderna quase banuiu visões como a escavação de um grande vale por uma única onda diluviana, também a seleção natural, se for um princípio verdadeiro, banirá a crença na criação contínua de novos seres orgânicos ou de qualquer modificação grande e súbita na sua estrutura.”⁷³ Isso desencadeou, provavelmente, a mais profunda revolução científica que a nossa civilização já alcançou. Os outros candidatos a essa honra, desde Newton e a gravitação até Einstein e a relatividade, foram construídos com base em percepções analógicas semelhantes.

5. Aprendizagem Profunda: Recriando as Capacidades do Neocórtex

Como podemos replicar digitalmente a flexibilidade e o poder de abstração do neocórtex? Como discutido no início deste capítulo, os sistemas simbólicos baseados em regras são demasiado rígidos para capturar a fluidez da cognição humana. Durante muito tempo, as abordagens conexionistas foram impraticáveis devido ao poder computacional necessário para as treinar. Mas o custo da computação caiu dramaticamente. Porquê?

Gordon Moore (1929-2023), cofundador da Intel, foi o criador da lei que leva o seu nome, enunciada pela primeira vez em 1965 e que se tornou a mais proeminente tendência em tecnologia da informação.⁷⁴ Na sua forma mais conhecida, observa-se que, devido à miniaturização progressiva, o número de transístores que pode ser colocado num chip de computador duplica aproximadamente a cada dois anos. Os céticos do progresso exponencial contínuo na computação têm frequentemente sublinhado que a lei de Moore inevitavelmente chegará ao fim quando a densidade dos transístores em circuitos integrados atingir o limite físico ao nível atómico, mas isso ignora um facto mais profundo. A lei de Moore é apenas um exemplo de uma força mais fundamental que eu chamo de “Lei dos Retornos Acelerados”, onde a tecnologia da informação cria ciclos de retroalimentação de inovação. Esta força já tinha conduzido a um aumento exponencial na relação preço-desempenho computacional em quatro paradigmas tecnológicos principais — eletromecânico, relés, tubos de vácuo e transístores — quando Moore fez a sua observação famosa. E, depois de os circuitos integrados atingirem os seus limites, novos paradigmas utilizando nanomateriais ou computação tridimensional tomarão o seu lugar.⁷⁵

Esta megatendência tem vindo a progredir de forma constante e exponencial desde pelo menos 1888 (muito antes de Moore sequer ter nascido!).⁷⁶ Por volta de 2010, finalmente atingiu um limiar onde conseguiu desbloquear o poder oculto de uma abordagem connexionista modelada na computação hierárquica em várias camadas que ocorre no neocórtex: aprendizagem profunda. Foi a aprendizagem profunda que permitiu os avanços impressionantes e

aparentemente súbitos que o campo da IA alcançou desde a publicação de *A Singularidade Está Próxima*.

O primeiro destes avanços a sinalizar o potencial radicalmente transformador da aprendizagem profunda foi o domínio do jogo de tabuleiro *Go* por parte da inteligência artificial. Uma vez que o *Go* tem um número de movimentos possíveis infinitamente maior do que o xadrez, e é mais difícil avaliar se um movimento específico é bom, as abordagens de IA que funcionaram para vencer grandes mestres humanos de xadrez praticamente não fizeram progressos no *Go*. Mesmo especialistas otimistas estimavam que o problema não seria resolvido antes da década de 2020, na melhor das hipóteses. (Em 2012, por exemplo, o futurista de IA Nick Bostrom especulou que o *Go* não seria dominado pela inteligência artificial antes de cerca de 2022.)⁷⁷ Contudo, em 2015-16, a subsidiária DeepMind da Alphabet criou o AlphaGo, que utilizou um método de “aprendizagem por reforço profundo”, no qual uma grande rede neural analisava os seus próprios jogos e aprendia com os seus sucessos e falhas.⁷⁸ Começou com um grande número de movimentos humanos de *Go* registados e depois jogou contra si mesmo várias vezes, até que a versão AlphaGo Master conseguiu derrotar o campeão mundial humano de *Go*, Ke Jie.⁷⁹

Um desenvolvimento mais significativo ocorreu alguns meses depois com o AlphaGo Zero. Quando a IBM venceu o campeão mundial de xadrez Garry Kasparov com o Deep Blue em 1997, o supercomputador estava repleto de todo o conhecimento que os seus programadores conseguiram reunir de especialistas humanos em xadrez.⁸⁰ Não era útil para mais nada; era uma máquina para

jogar xadrez. Em contraste, o AlphaGo Zero não recebeu nenhuma informação humana sobre *Go*, exceto as regras do jogo, e, após cerca de três dias a jogar contra si próprio, evoluiu de movimentos aleatórios para derrotar facilmente a sua versão anterior, treinada por humanos, o AlphaGo, por 100 jogos a 0.⁸¹ (Em 2016, o AlphaGo venceu Lee Sedol, que na altura ocupava o segundo lugar em títulos internacionais de *Go*, em quatro de cinco jogos.) O AlphaGo Zero utilizou uma nova forma de aprendizagem por reforço na qual o programa se tornou o seu próprio instrutor. O AlphaGo Zero demorou apenas vinte e um dias para alcançar o nível do AlphaGo Master, a versão que derrotou sessenta dos melhores profissionais online e o campeão mundial Ke Jie em três de três jogos em 2017.⁸² Após quarenta dias, o AlphaGo Zero superou todas as outras versões do AlphaGo e tornou-se o melhor jogador de *Go*, humano ou máquina.⁸³ Conseguiu isto sem qualquer conhecimento codificado sobre o jogo humano e sem intervenção humana.

Mas esse não é o marco mais significativo para a DeepMind. A próxima iteração, AlphaZero, consegue transferir as habilidades aprendidas no *Go* para outros jogos, como o xadrez.⁸⁴ O programa não só derrotou todos os desafiantes humanos no xadrez como também superou todas as outras máquinas de jogar xadrez, e fez isso após apenas quatro horas de treino, usando apenas as regras como conhecimento prévio. Foi igualmente bem-sucedido no jogo Shōgi. A versão mais recente enquanto escrevo isto é o MuZero, que repetiu esses feitos sem sequer receber as regras!⁸⁵ Com essa habilidade de "aprendizagem transferida", o MuZero pode dominar qualquer jogo de tabuleiro em que não haja acaso, ambiguidade ou informação escondida, ou qualquer jogo de vídeo determinístico,

como o *Pong* da Atari. Esta capacidade de aplicar o aprendizado de um domínio a outro relacionado é uma característica fundamental da inteligência humana.

Mas a aprendizagem por reforço profundo não se limita ao domínio desses jogos. Inteligências artificiais que podem jogar *StarCraft II* ou póquer, ambos caracterizados pela incerteza e pela necessidade de uma compreensão sofisticada dos jogadores adversários, também superaram recentemente o desempenho de todos os humanos.⁸⁶ As únicas exceções (por agora) são os jogos de tabuleiro que exigem competências linguísticas muito avançadas. O *Diplomacy* é talvez o melhor exemplo disso — um jogo de dominação mundial impossível de vencer apenas com sorte ou habilidade e que obriga os jogadores a comunicarem entre si.⁸⁷ Para ganhar, é necessário convencer as pessoas de que os movimentos que lhe favorecem serão também do interesse delas. Assim, uma IA que consiga dominar consistentemente os jogos de *Diplomacy* provavelmente terá também dominado a dissimulação e a persuasão de forma mais ampla. Mas mesmo no *Diplomacy*, as IAs fizeram progressos impressionantes em 2022, destacando-se o CICERO da Meta, que consegue vencer muitos jogadores humanos.⁸⁸ Marcos como estes estão agora a ser atingidos quase todas as semanas.

As mesmas capacidades de aprendizagem profunda que dominam jogos com facilidade também podem ser aplicadas ao desempenho em situações complexas do mundo real. Basicamente, o que precisamos é de um simulador que possa replicar o domínio sobre o qual a IA está a tentar aprender — como a experiência

variada e cheia de ambiguidades de conduzir um carro. Todo o tipo de coisas pode acontecer enquanto estamos ao volante, desde outro carro a parar repentinamente à nossa frente ou a dirigir-se para nós na direção errada, até a uma criança a correr atrás de uma bola para a estrada. Para lidar com isso, a subsidiária Waymo da Alphabet criou software de condução autónoma para os seus carros autónomos, mas inicialmente tinha um monitor humano a participar em todas as viagens.⁸⁹ Cada aspeto dessas viagens foi gravado e, a partir dessa análise, foi criado um simulador muito abrangente. Agora que os veículos reais já registaram bem mais de 20 milhões de milhas (no momento em que este texto foi escrito)⁹⁰, os carros simulados podem viajar bilhões de milhas treinando neste espaço virtual realista.⁹¹ Com o acumular desta vasta experiência, um carro autónomo real conseguirá, em última instância, desempenhar muito, muito melhor do que os condutores humanos. Da mesma forma, como descrito mais adiante no capítulo 6, a IA está a usar uma série de técnicas de simulação inovadoras para fazer melhores previsões sobre como as proteínas se dobram. Este é um dos problemas mais desafiantes em biologia e resolvê-lo está a abrir a porta para a descoberta de medicamentos revolucionários.

Ainda assim, embora o MuZero consiga conquistar muitos jogos diferentes, as suas realizações ainda são relativamente limitadas — não consegue escrever um soneto ou confortar os doentes. Para alcançar a deslumbrante generalidade do neocórtex humano, a IA precisará de dominar a linguagem. É a linguagem que nos permite conectar domínios de cognição vastamente díspares e possibilita a transferência simbólica de conhecimento a um nível elevado. Ou seja, com a linguagem, não precisamos de ver um milhão de

exemplos de dados brutos para aprender algo — podemos atualizar dramaticamente o nosso conhecimento apenas ao ler o resumo de uma frase.

O progresso mais rápido nesta área vem agora de abordagens que processam linguagem utilizando redes neuronais profundas para representar os significados das palavras num espaço de (muitas) dimensões. Existem várias técnicas matemáticas para fazer isto, mas o ponto principal é que estas permitem que a IA descubra o significado da linguagem sem as regras linguísticas codificadas que uma abordagem simbólica exigiria. Por exemplo, podemos construir uma rede neuronal feedforward (de processamento progressivo ou direto) multicamada e encontrar bilhões (ou trilhões) de frases para a treinar. Estas podem ser recolhidas de fontes públicas na internet. A rede neuronal é então usada para atribuir a cada frase um ponto num espaço de 500 dimensões (ou seja, uma lista de 500 números, embora este número seja arbitrário; pode ser qualquer número suficientemente grande). Inicialmente, a frase recebe uma atribuição aleatória para cada um dos 500 valores. Durante o treino, a rede neuronal ajusta a posição da frase dentro do espaço de 500 dimensões de forma a que frases com significados semelhantes fiquem próximas entre si; frases dissimilares ficarão afastadas umas das outras. Se executarmos este processo para muitos bilhões de frases, a posição de qualquer frase no espaço de 500 dimensões indicará o que ela significa com base no que está próximo dela.

Desta forma, a IA aprende o significado, não a partir de um livro de regras gramaticais ou de um dicionário, mas sim a partir dos

contextos em que as palavras são realmente usadas. Por exemplo, aprenderia que a palavra 'jam' tem homônimos distintos, pelo facto de que, em alguns contextos, as pessoas falam de comer 'jam', e noutros, de tocar música com guitarras elétricas, mas ninguém fala de comer guitarras elétricas. Com a exceção da pequena fração do nosso vocabulário que aprendemos formalmente na escola ou consultamos explicitamente, é exatamente assim que os humanos aprendem todas as palavras que conhecemos. E a IA já expandiu os seus poderes associativos para além do reino do texto. Um projeto da OpenAI de 2021 chamado CLIP é uma rede neuronal treinada para ligar imagens a textos que as descrevem. Como resultado, nós em CLIP conseguimos “responder ao mesmo conceito, seja ele apresentado literal, simbólica ou conceptualmente.”⁹² Por exemplo, o mesmo nó pode ser ativado em resposta a uma foto de uma aranha, um desenho do Homem-Aranha ou à palavra “aranha”. Isto é exatamente como o cérebro humano processa conceitos em diferentes contextos, e representa um avanço significativo para a IA.

Outra variação deste método é um espaço de 500 dimensões que contém frases em todas as línguas. Assim, se quiser traduzir uma frase de uma língua para outra, basta procurar no espaço hiperdimensional outra frase na língua de destino no ponto mais próximo. Também pode encontrar outras frases razoavelmente próximas do seu significado pretendido ao explorar frases próximas no espaço. Uma terceira opção é criar dois espaços emparelhados de 500 dimensões, onde um dos espaços revela as respostas às perguntas presentes no primeiro espaço. Isto requer a reunião de bilhões de frases, nas quais uma é a resposta à outra. Uma

expansão adicional deste conceito é criar um “Codificador Universal de Frases”⁹³ que a minha equipa na Google desenvolveu para incorporar cada frase num conjunto de dados com milhares de características detetadas, como “irónico,” “humorístico” ou “positivo.” A IA treinada com estes dados mais ricos aprende não apenas a imitar como os humanos utilizam a linguagem, mas também a compreender características semânticas mais profundas que podem não ser evidentes a partir do significado literal das palavras numa frase. Este meta-conhecimento proporciona uma compreensão mais completa.

Temos vindo a criar uma variedade de aplicações na Google que utilizam e produzem linguagem conversacional com base nestes princípios. Uma delas, bem conhecida, é o Gmail Smart Reply.⁹⁴ Se utilizar o Gmail, notará que ele lhe fornece três sugestões para responder a cada email. As respostas têm em consideração não apenas o email ao qual está a responder, mas também todos os outros emails dessa cadeia, o assunto e outras indicações sobre a pessoa com quem está a comunicar. Todos estes elementos do seu email requerem precisamente este tipo de representação multidimensional de cada ponto da conversa. Trata-se de uma combinação de uma rede neuronal feedforward (de processamento progressivo ou direto) multicamada com uma representação hierárquica do conteúdo linguístico, que captura a troca de diálogo. O Gmail Smart Reply, inicialmente, parecia estranho para alguns, mas rapidamente ganhou aceitação dos utilizadores pela sua naturalidade e conveniência, e agora representa uma minoria significativa de todo o tráfego do Gmail.

Outra funcionalidade da Google, baseada nesta abordagem, foi chamada de Talk to Books. (Estava disponível como um serviço experimental independente de 2018 a 2023.) Quando carregava o Talk to Books, podia simplesmente fazer-lhe uma pergunta. O software analisava todas as frases (cerca de 500 milhões) em mais de 100.000 livros em meio segundo. Depois, fornecia-lhe as melhores respostas para a sua pergunta. Não era uma aplicação do Google Search normal, que encontra links relevantes usando uma combinação de correspondência de palavras-chave, frequência de cliques dos utilizadores e outras medidas; ao contrário, funcionava através do significado real da sua pergunta e do significado de cada uma das 500 milhões de frases nos mais de 100.000 livros.

Uma das aplicações mais promissoras do processamento hiperdimensional de linguagem é uma classe de sistemas de IA chamada transformers. Estes são modelos de aprendizagem profunda que utilizam um mecanismo chamado “atenção” para focar o seu poder computacional nas partes mais relevantes dos dados de entrada—de forma muito semelhante à maneira como o neocórtex humano nos permite direcionar a nossa atenção para a informação mais vital para o nosso pensamento. Os transformers são treinados em enormes volumes de texto, que codificam como “tokens”—normalmente uma combinação de partes de palavras, palavras e cadeias de palavras. O modelo, então, utiliza um número muito elevado de “parâmetros” (de biliões a triliões, enquanto escrevo isto) para classificar cada um dos tokens. Podes pensar nos parâmetros como fatores que podem ser usados para fazer previsões sobre algo.

Num exemplo simplificado, se eu puder usar apenas um parâmetro para prever “Este animal é um elefante?”, posso escolher “tromba”. Assim, se o nó da rede neuronal dedicado a julgar se o animal tem uma tromba for ativado (“Sim, tem”), o transformer (modelo de atenção profunda) classificaria o animal como um elefante. Mas mesmo que esse nó aprenda a reconhecer trombas perfeitamente, há alguns animais com trombas que não são elefantes, pelo que o modelo de um parâmetro irá classificá-los erroneamente. Ao adicionar parâmetros como “corpo peludo”, podemos melhorar a precisão. Agora, se ambos os nós forem ativados (“corpo peludo” e “tromba”), posso adivinhar que provavelmente não é um elefante, mas sim um mamute lanoso. Quanto mais parâmetros eu tiver, e quanto mais detalhe granular conseguir captar, melhores previsões poderei fazer.

Num transformer (modelo de atenção profunda), esses parâmetros são armazenados como pesos entre os nós na rede neuronal. E, na prática, embora às vezes correspondam a conceitos compreensíveis por humanos, como “corpo peludo” ou “tromba,” frequentemente representam relações estatísticas altamente abstratas que o modelo descobriu nos seus dados de treino. Usando essas relações, os modelos de linguagem de grande escala baseados em transformers (LLMs) conseguem prever quais os tokens mais prováveis de seguir um determinado prompt dado por um humano. Em seguida, convertem esses tokens de volta em texto (imagens, áudio ou vídeo) que os humanos conseguem entender. Inventado por investigadores da Google em 2017, este mecanismo tem alimentado a maioria dos enormes avanços na IA nos últimos anos.⁹⁵

O facto principal a entender é que os transformers dependem de um número gigantesco de parâmetros para alcançar precisão. Isto requer quantidades enormes de computação tanto para o treino como para a utilização. O modelo GPT-2 da OpenAI, lançado em 2019, tinha 1,5 mil milhões de parâmetros,⁹⁶ e, apesar de alguns indícios promissores, não funcionava muito bem. Contudo, quando os transformers ultrapassaram os 100 mil milhões de parâmetros, desbloquearam avanços importantes no domínio da linguagem natural por parte da IA — e passaram a responder a perguntas por conta própria com inteligência e subtilidade. O GPT-3 utilizou 175 mil milhões de parâmetros em 2020⁹⁷, e, um ano depois, o modelo Gopher, da DeepMind, com 280 mil milhões de parâmetros, demonstrou um desempenho ainda melhor.⁹⁸ Também em 2021, a Google apresentou o transformer Switch, com 1,6 biliões de parâmetros, tornando-o open-source para aplicação e desenvolvimento livre.⁹⁹ Embora o tamanho recorde do Switch tenha atraído muita atenção, a sua inovação mais importante foi uma técnica chamada “mistura de especialistas”. Com esta abordagem, o transformer consegue focar-se mais eficientemente nas partes mais relevantes do modelo para uma tarefa específica. Este é um progresso importante para evitar que os custos computacionais aumentem de forma descontrolada à medida que os modelos se tornam maiores.

Por que é que a escala é tão importante? Em resumo, ela permite que os modelos acedam a características mais profundas dos seus dados de treino. Modelos menores conseguem desempenhos razoáveis em tarefas específicas, como usar dados históricos para prever temperaturas. Mas a linguagem é fundamentalmente

diferente. Dado que o número de maneiras de começar uma frase é, essencialmente, infinito, mesmo que um transformer tenha sido treinado com centenas de milhares de milhões de tokens de texto, não pode simplesmente memorizar citações verbatim (citações literais ou palavra por palavra) para as completar. Em vez disso, com muitos milhares de milhões de parâmetros, pode processar as palavras de entrada no prompt a um nível de significado associativo e, em seguida, usar o contexto disponível para compor um texto de conclusão nunca antes visto na história. E, dado que o texto de treino inclui muitos estilos diferentes, como perguntas e respostas, artigos de opinião e diálogos teatrais, o transformer consegue aprender a reconhecer a natureza do prompt e gerar uma saída no estilo apropriado. Embora os céticos possam descrever isto como um truque estatístico sofisticado, pelo facto de essas estatísticas serem sintetizadas a partir da produção criativa combinada de milhões de humanos, a IA alcança uma criatividade genuína por si mesma.

O GPT-3 foi o primeiro modelo deste tipo a ser comercializado e a exibir essa criatividade de uma forma que impressionou os seus utilizadores.¹⁰⁰ Por exemplo, a académica Amanda Askell solicitou uma resposta ao modelo a partir de um excerto do famoso “argumento do quarto chinês”, do filósofo John Searle.¹⁰¹ Este experimento mental observa que um humano que não fale chinês, ao traduzir a língua utilizando manualmente um algoritmo de tradução com papel e caneta, não compreenderia as histórias traduzidas. Assim, como é que uma IA a executar o mesmo programa poderia ser dita como verdadeiramente compreensiva? O GPT-3 respondeu: “É óbvio que eu não compreendo uma palavra

das histórias”, explicando que o programa de tradução é um sistema formal que “não explica a compreensão mais do que um livro de receitas explica uma refeição”. Esta metáfora nunca tinha aparecido em lado nenhum antes, parecendo ser uma nova adaptação da metáfora do filósofo David Chalmers, segundo a qual uma receita não explica totalmente as propriedades de um bolo. Este é precisamente o tipo de analogia que ajudou Darwin a descobrir a evolução.

Outra capacidade desbloqueada pelo GPT-3 foi a criatividade estilística. Porque o modelo tinha parâmetros suficientes para assimilar profundamente um conjunto de dados incrivelmente vasto, estava familiarizado com praticamente todos os tipos de escrita humana. Os utilizadores podiam solicitar-lhe respostas sobre qualquer assunto, num enorme leque de estilos — desde escrita científica a livros infantis, poesia ou guiões de séries de comédia. Podia até imitar escritores específicos, vivos ou mortos. Quando o programador McKay Wrigley pediu ao GPT-3 que respondesse à pergunta “Como nos tornamos mais criativos?” no estilo do psicólogo popular Scott Barry Kaufman, a resposta foi tão inovadora que o próprio Kaufman reconheceu que “soa definitivamente a algo que eu diria”.¹⁰²

Em 2021, a Google introduziu o LaMDA, otimizado para se focar em conversas abertas e realistas.¹⁰³ Se pedisse ao LaMDA para responder a perguntas no papel de uma foca-de-Weddell, por exemplo, ele forneceria respostas coerentes e divertidas, do ponto de vista de uma foca — dizendo a um potencial caçador: “Haha, boa sorte. Espero que não congeles antes de tentares disparar sobre um

de nós!”¹⁰⁴ Isto demonstrou o tipo de conhecimento contextual que, durante muito tempo, escapou às capacidades da IA.

Outro avanço surpreendente em 2021 foi a multimodalidade. Os sistemas de IA anteriores geralmente limitavam-se a processar e gerar um único tipo de dados — algumas IAs concentravam-se no reconhecimento de imagens, outros sistemas analisavam áudio, e os LLMs (Large Language Models — Modelos de Linguagem de Grande Escala) conversavam em linguagem natural. O passo seguinte foi ligar múltiplas formas de dados num único modelo. Assim, a OpenAI introduziu o DALL-E (um trocadilho com o pintor surrealista Salvador Dalí e o filme da Pixar WALL-E),¹⁰⁵ um transformador treinado para compreender a relação entre palavras e imagens. A partir disso, era capaz de criar ilustrações de conceitos totalmente novos (como, por exemplo, “uma poltrona em forma de abacate”) com base apenas em descrições textuais. Em 2022, surgiu o seu sucessor, o DALL-E 2¹⁰⁶, juntamente com o Imagen da Google e uma proliferação de outros modelos como o Midjourney e o Stable Diffusion, que rapidamente alargaram estas capacidades a imagens essencialmente foto-realistas.¹⁰⁷ Usando uma entrada simples de texto como “uma fotografia de um panda fofinho a usar um chapéu de cowboy e um casaco de couro preto a andar de bicicleta no topo de uma montanha”, a IA consegue imaginar uma cena completa e realista.¹⁰⁸ Esta criatividade irá transformar áreas criativas que recentemente pareciam exclusivamente do domínio humano.

Para além de gerar imagens deslumbrantes, estes modelos multimodais também alcançaram uma descoberta mais

fundamental. Em geral, modelos como o GPT-3 exemplificam o “few-shot learning” (aprendizagem com poucos exemplos). Ou seja, após serem treinados, conseguem receber uma amostra relativamente pequena de texto e completá-la de forma coerente. Isto equivale a mostrar a uma IA focada em imagens apenas cinco imagens de algo desconhecido, como unicórnios (em vez de cinco mil ou cinco milhões, como os métodos anteriores exigiam), e fazê-la reconhecer novas imagens de unicórnios ou até criar imagens de unicórnios por conta própria. Mas o DALL-E e o Imagen levaram isto um passo dramático mais além ao destacarem-se no “zero-shot learning” (aprendizagem sem exemplos prévios). O DALL-E e o Imagen conseguiam combinar conceitos aprendidos para criar novas imagens totalmente diferentes de tudo o que alguma vez viram nos seus dados de treino. A partir de um texto como “uma ilustração de um rabanete daikon bebé numa saia de tule a passear um cão”, o DALL-E gerava adoráveis imagens de desenhos animados exatamente disso. Da mesma forma para “um caracol com a textura de uma harpa”. Chegava até a criar “um emoji profissional de alta qualidade de uma chávena de chá bubble apaixonada” — completo com olhos em forma de coração a brilharem por cima das pérolas de tapioca flutuantes.

A zero-shot learning é a própria essência do pensamento analógico e da inteligência. Demonstra que a IA não está apenas a repetir o que lhe é fornecido. Está verdadeiramente a aprender conceitos, com a capacidade de os aplicar criativamente a problemas novos. Aperfeiçoar estas capacidades e expandi-las a mais domínios será um dos grandes desafios da inteligência artificial na década de 2020.

Para além da flexibilidade zero-shot dentro de um tipo de tarefa específico, os modelos de IA estão também a ganhar rapidamente flexibilidade entre domínios. Apenas dezassete meses depois de o MuZero demonstrar mestria em vários jogos, a DeepMind apresentou o Gato — uma rede neural única capaz de realizar tarefas que vão desde jogar videojogos ou conversar por texto até legendar imagens ou controlar um braço robótico.¹⁰⁹ Nenhuma destas capacidades é nova por si só, mas combiná-las num único sistema unificado semelhante a um cérebro humano é um grande passo em direção à generalização ao estilo humano e antecipa um progresso muito rápido no futuro. Em *A Singularidade Está Próxima*, previ que combinaríamos milhares de competências individuais numa só IA antes de alcançar um teste de Turing bem-sucedido.

Uma das ferramentas mais poderosas para aplicar a inteligência humana de forma flexível é a programação informática — de facto, foi assim que criámos a IA em primeiro lugar. Em 2021, a OpenAI estreou o Codex, que podia receber comandos em linguagem natural dos utilizadores e traduzi-los em código funcional numa variedade de linguagens como Python, JavaScript e Ruby.¹¹⁰ Em minutos, alguém sem experiência de programação podia escrever o que queria que o programa fizesse e criar um jogo ou uma aplicação simples. O modelo AlphaCode da DeepMind, de 2022¹¹¹, destacou-se ainda mais na proficiência de programação e, à medida que o leitor lê isto, modelos de IA de programação ainda mais poderosos estarão disponíveis. Estas capacidades irão libertar quantidades impressionantes de potencial humano nos próximos anos, à medida que a habilidade de programar deixa de ser um requisito para implementar ideias criativas através de software.

Apesar de todas as conquistas dos modelos que acabei de descrever, eles enfrentaram dificuldades quando confrontados com tarefas complexas e sem orientação humana para intervir. Mesmo que conseguissem completar todas as subtarefas individualmente, era difícil para eles entender como tudo deveria encaixar-se. Em abril de 2022, o modelo PaLM da Google, com 540 mil milhões de parâmetros, alcançou progressos surpreendentes nesse problema, particularmente em duas áreas fundamentais à nossa própria inteligência: o humor e o raciocínio inferencial.¹¹²

O humor parece essencialmente humano porque depende de tantos elementos diferentes. Para “perceber” uma piada, é muitas vezes necessário compreender conceitos como trocadilhos, ironia ou experiências comuns que as pessoas partilham. Frequentemente, vários destes conceitos são combinados de formas intrincadas. É por isso que as piadas são, por vezes, difíceis de traduzir entre línguas e culturas. O PaLM conseguiu ler piadas e explicar com precisão por que são engraçadas. Por exemplo, recebeu a seguinte entrada: 'Era suposto começar a escrever o artigo às 17h00. Mas depois comecei a experimentar este incrível modelo de linguagem durante 10 minutos. 10 minutos depois, de repente já são 21h30!¹¹³ E forneceu esta explicação perfeita:

Esta piada é sobre como o tempo voa quando estamos a divertir-nos. A pessoa deveria começar a escrever um artigo às 17h00, mas acabou por começar a experimentar um modelo de linguagem. Pensava que estava a utilizá-lo apenas durante 10 minutos, mas na realidade passaram-se 4,5 horas.¹¹⁴

Mais importante ainda, o PaLM conseguiu explicar como chegou às suas conclusões através de raciocínio em “cadeia de pensamentos”, embora ainda não (pelo menos até 2023) com a profundidade que os humanos conseguem alcançar. É exatamente isto que os professores procuram quando atribuem redações — o objetivo não é apenas repetir uma resposta correta; é demonstrar uma compreensão mais profunda construindo uma sequência coerente de inferências, passo a passo. Contudo, demasiadas vezes, os modelos de linguagem são tão opacos que ninguém consegue entender como chegaram a um determinado resultado. Assim, ao clarificar este processo, o PaLM não só oferece resultados mais confiáveis, como também ajuda os engenheiros de software a diagnosticar o problema exato quando ocorre um erro. Além disso, descobriu-se que dividir questões em partes mais pequenas ajuda o PaLM a responder corretamente a perguntas altamente complexas, que seriam desafiantes até mesmo para um humano brilhante¹¹⁵:

“Entrada: O Michael está naquele museu muito famoso em França a olhar para o seu quadro mais conhecido. No entanto, o artista que fez este quadro faz o Michael lembrar-se apenas da sua personagem de desenhos animados preferida da infância. Qual era o país de origem do objeto que a personagem de desenhos animados normalmente segura na mão?”

“Saída do Modelo: O quadro mais famoso no Louvre é a Mona Lisa. O artista que criou a Mona Lisa é Leonardo da Vinci. Leonardo da Vinci é também o nome da personagem principal nos desenhos animados Tartarugas Ninja. Leonardo da Vinci é de Itália. O objeto que Leonardo da Vinci normalmente segura na mão é uma katana. O país de origem da katana é o Japão. A resposta é ‘Japão’.”

Em novembro de 2022, a OpenAI lançou uma interface chamada Chat-GPT, que permitiu ao público geral, pela primeira vez, interagir facilmente com um LLM — um modelo conhecido como GPT-3.5.¹¹⁶ Em apenas dois meses, 100 milhões de pessoas já o tinham experimentado, provavelmente incluindo você.¹¹⁷ Como o sistema era capaz de gerar muitas respostas frescas e variadas para uma mesma pergunta, tornou-se um grande disruptor na educação, já que os alunos utilizaram o ChatGPT para escrever os seus ensaios, enquanto os professores não tinham uma forma fiável de detetar plágio (embora existam algumas ferramentas promissoras).¹¹⁸

Depois, em março de 2023, foi lançado o GPT-4 para testes públicos através do ChatGPT. Este modelo alcançou um desempenho extraordinário numa ampla gama de testes académicos, como o SAT, o LSAT, os testes AP e o exame de admissão à ordem de advogados.¹¹⁹ Mas o seu avanço mais importante foi a capacidade de raciocinar organicamente sobre situações hipotéticas, ao compreender as relações entre objetos e ações — uma capacidade conhecida como world modeling (modelação do mundo).

Isto permite não apenas responder a perguntas como problemas complexos de física, mas também raciocinar de forma precisa sobre o que aconteceria caso as leis da física fossem alteradas de determinada maneira. Também é capaz de imaginar situações sob a perspetiva de diferentes personagens; por exemplo, consegue reconhecer que duas pessoas a olhar para números em direções opostas os verão invertidos. Ou pode olhar para uma imagem de

balões presos por um peso e reconhecer que, se os fios fossem cortados, os balões iriam voar.¹²⁰ O GPT-4 consegue até acompanhar objetos espacialmente ao longo do tempo, como neste exemplo apresentado pelo engenheiro de segurança Daniel Feldman:

Entrada: “Estou na minha casa. Em cima da minha cadeira na sala está uma chávena de café. Dentro da chávena de café está um dedal. O dedal não encaixa perfeitamente dentro da chávena de café. Dentro do dedal está um único diamante. Levo a cadeira para o meu quarto. Depois, coloco a chávena de café na cama. A seguir, viro a chávena ao contrário. Depois volto a colocá-la com a base para baixo e ponho a chávena de café no balcão da cozinha. Onde está o meu diamante?”

Resposta: “Quando viraste a chávena de café ao contrário na tua cama, o diamante dentro do dedal provavelmente caiu para a cama. O diamante está agora na tua cama.”¹²¹

Enquanto concluía este livro, a meio de 2023, a mais recente grande inovação foi o PaLM-E — um sistema da Google que combina a capacidade de raciocínio do PaLM com a incorporação num robô.¹²² Este sistema consegue receber instruções em linguagem natural e executá-las num ambiente físico complexo. Por exemplo, ao ser instruído para “trazer-me as batatas fritas de arroz da gaveta,” o PaLM-E foi capaz de navegar pela cozinha, encontrar as batatas fritas, apanhá-las e entregá-las com sucesso. Tal capacidade irá expandir rapidamente o alcance da IA no mundo real.

O progresso da IA está agora tão acelerado que nenhum livro tradicional pode esperar estar atualizado. Os passos logísticos de preparação e impressão de um livro demoram quase um ano, pelo

que, mesmo que tenha comprado este volume assim que foi publicado, certamente já terão ocorrido muitos avanços impressionantes quando o estiver a ler. E é provável que a IA esteja muito mais entrelaçada na sua vida quotidiana. O velho paradigma de pesquisa na internet baseado em páginas de links, que durou cerca de vinte e cinco anos, está a ser rapidamente complementado por assistentes de IA como o Bard da Google (alimentado pelo modelo Gemini, que supera o GPT-4 e foi lançado enquanto este livro entrava na sua fase final de layout) e o Bing da Microsoft (alimentado por uma variante do GPT-4).¹²³ Entretanto, suites de aplicações como o Google Workspace e o Microsoft Office estão a integrar poderosas IAs que tornarão muitos tipos de trabalho mais fluidos e rápidos do que nunca.¹²⁴

Escalar modelos cada vez mais próximos da complexidade do cérebro humano é o principal impulsionador destas tendências. Há muito que acredito que a quantidade de computação é essencial para fornecer respostas inteligentes, mas até recentemente esta visão não era amplamente partilhada e não podia ser demonstrada. Há cerca de três décadas, em 1993, tive um debate com o meu mentor Marvin Minsky. Defendi que seriam necessários cerca de 10^{14} cálculos por segundo para começar a emular a inteligência humana. Minsky, por sua vez, sustentava que a quantidade de computação não era importante e que poderíamos programar um Pentium (o processador de um computador de secretária de 1993) para ser tão inteligente quanto um humano. Como tínhamos opiniões tão diferentes sobre este assunto, realizámos um debate público na principal sala de debates do MIT (Sala 10-250), assistido por várias centenas de estudantes. Nenhum de nós conseguiu

ganhar naquele dia, pois eu não tinha computação suficiente para demonstrar inteligência e ele não tinha os algoritmos corretos.

No entanto, os avanços conexionistas de 2020-2023 deixaram claro que a quantidade de computação é fundamental para alcançar uma inteligência suficiente. Comecei a trabalhar em IA por volta de 1963, e foram necessários sessenta anos para atingir este nível de computação. A quantidade de computação usada para treinar um modelo de última geração está agora a aumentar cerca de quatro vezes por ano — e as capacidades estão a amadurecer rapidamente.¹²⁵

6. O Que é Que a Ia Ainda Precisa de Alcançar?

Como demonstram os últimos anos, estamos já bem encaminhados para recriar as capacidades do neocórtex. Hoje, as deficiências remanescentes da IA enquadram-se em várias categorias principais, destacando-se: memória contextual, senso comum e interação social.

A memória contextual é a capacidade de acompanhar como todas as ideias numa conversa ou num texto se interligam dinamicamente. À medida que o tamanho do contexto relevante aumenta, o número de relações entre ideias cresce exponencialmente. Faz lembrar o conceito de Teto de Complexidade mencionado anteriormente neste capítulo — uma matemática semelhante torna extremamente intensivo, em termos de computação, aumentar a janela de contexto que um modelo de

linguagem pode processar.¹²⁶ Se houver dez ideias semelhantes a palavras (ou seja, tokens) numa frase, o número de possíveis relações entre subconjuntos dessas ideias é $2^{10}-1$, ou 1.023. Se houver cinquenta dessas ideias num parágrafo, isso equivale a 1,12 quadrilhões de possíveis relações contextuais entre elas! Embora a grande maioria destas relações seja irrelevante, as exigências de se lembrar do contexto de um capítulo ou livro inteiro de forma forçada tornam-se rapidamente descontroladas. É por isso que o GPT-4 esquece coisas que lhe tenha dito no início da conversa e porque não consegue escrever um romance com um enredo consistente e lógico.

A boa notícia é dupla: os investigadores estão a fazer grandes progressos no desenvolvimento de IA capaz de se focar de forma mais eficiente nos dados contextuais relevantes, e os avanços exponenciais na relação preço-desempenho significam que o custo da computação provavelmente cairá mais de 99 por cento na próxima década.¹²⁷ Além disso, melhorias algorítmicas e a especialização de hardware específico para IA significam que a relação preço-desempenho para os LLMs provavelmente aumentará muito mais rapidamente.¹²⁸ Para se ter uma perspetiva, entre agosto de 2022 e março de 2023, o preço dos tokens de entrada/saída via a interface de programação de aplicações (API) do GPT-3.5 caiu 96,7 por cento!¹²⁹ Esta tendência deverá acelerar à medida que a IA seja diretamente usada para otimizar o design de chips, algo que já começou.¹³⁰

A próxima área de deficiência é o senso comum. Esta é a capacidade de imaginar situações e antecipar as suas

consequências no mundo real. Por exemplo, mesmo que nunca tenha estudado o que aconteceria se a gravidade deixasse de funcionar no seu quarto, consegue facilmente imaginar esse cenário hipotético e prever o que poderia resultar. Este tipo de raciocínio também é importante para a inferência causal. Se tem um cão e chega a casa e encontra um vaso partido, consegue deduzir o que aconteceu. Apesar de flashes de insight (lampejos de compreensão) cada vez mais frequentes, a IA ainda enfrenta dificuldades neste aspecto porque ainda não possui um modelo robusto de como o mundo real funciona, e os dados de treino raramente incluem esse tipo de conhecimento implícito.

Por fim, nuances sociais como um tom de voz irónico não estão bem representadas nas bases de dados de texto que a IA ainda utiliza maioritariamente para treino. Sem essa compreensão, é difícil desenvolver uma “teoria da mente” — a capacidade de reconhecer que outras pessoas têm crenças e conhecimentos diferentes dos nossos, colocar-nos no lugar delas e inferir as suas motivações. No entanto, a IA está a fazer progressos rápidos nesta área. Em 2021, Blaise Agüera y Arcas, Investigador Sénior da Google, relatou ter apresentado ao LaMDA um cenário clássico usado para testar a teoria da mente em psicologia infantil.¹³¹ No cenário, Alice esquece os seus óculos numa gaveta e sai da sala. Enquanto ela está fora, Bob tira os óculos da gaveta e esconde-os debaixo de uma almofada. A pergunta: Onde é que Alice procurará os óculos quando voltar para a sala? O LaMDA respondeu corretamente que ela procurará na gaveta. Em menos de dois anos, o PaLM e o GPT-4 já estavam a responder corretamente a muitas perguntas relacionadas com a teoria da mente. Esta capacidade

proporcionará à IA uma flexibilidade crucial. Um campeão humano de Go pode jogar muito bem, mas também pode monitorizar como outras pessoas próximas estão a jogar e fazer piadas quando apropriado, ou ser flexível e parar o jogo se alguém precisar de atenção médica.

O meu otimismo em relação à IA fechar brevemente a lacuna em todas estas áreas baseia-se na convergência de três tendências exponenciais simultâneas: a melhoria na relação preço-desempenho da computação, que torna mais barato treinar grandes redes neurais; a crescente disponibilidade de dados de treino mais ricos e abrangentes, que permite utilizar melhor os ciclos de computação de treino; e algoritmos melhores que permitem à IA aprender e raciocinar de forma mais eficiente.¹³² Embora as velocidades de computação pelo mesmo custo tenham duplicado, em média, a cada 1,4 anos desde 2000, o crescimento real no total de computações ('compute') usadas para treinar um modelo de inteligência artificial de última geração tem duplicado a cada 5,7 meses desde 2010. Isto representa um aumento de cerca de dez mil milhões de vezes.¹³³ Por outro lado, durante a Era pré-aprendizagem profunda, de 1952 (a demonstração de um dos primeiros sistemas de aprendizagem de máquina, seis anos antes da rede neural revolucionária do Perceptron) até ao surgimento do big data, por volta de 2010, o tempo de duplicação era de quase dois anos (seguindo aproximadamente a lei de Moore) na quantidade de computação necessária para treinar uma IA de topo.¹³⁴

Dito de outra forma, se a tendência de 1952-2010 tivesse continuado até 2021, o “compute” (recursos computacionais necessários para treinar e executar modelos de IA) teria aumentado por um fator inferior a 75, em vez de cerca de dez mil milhões de vezes. Este crescimento foi muito mais rápido do que as melhorias na relação preço-desempenho geral da computação. Portanto, a causa não foi uma grande revolução no hardware. Em vez disso, deve-se principalmente a dois fatores. Primeiro, os investigadores de IA têm inovado novos métodos de computação paralela — permitindo que um maior número de chips trabalhe em conjunto no mesmo problema de aprendizagem de máquina. Segundo, à medida que o big data (megadados ou dados em grande escala) tornou a aprendizagem profunda mais útil, os investidores de todo o mundo têm investido quantidades cada vez maiores de dinheiro na área, na esperança de alcançar avanços.

Computação de Treino (FLOPS) dos Sistemas de Aprendizagem Automática de Referência ao Longo do Tempo, n=98

Escala Logarítmica, FLOP = Operação de Ponto Flutuante

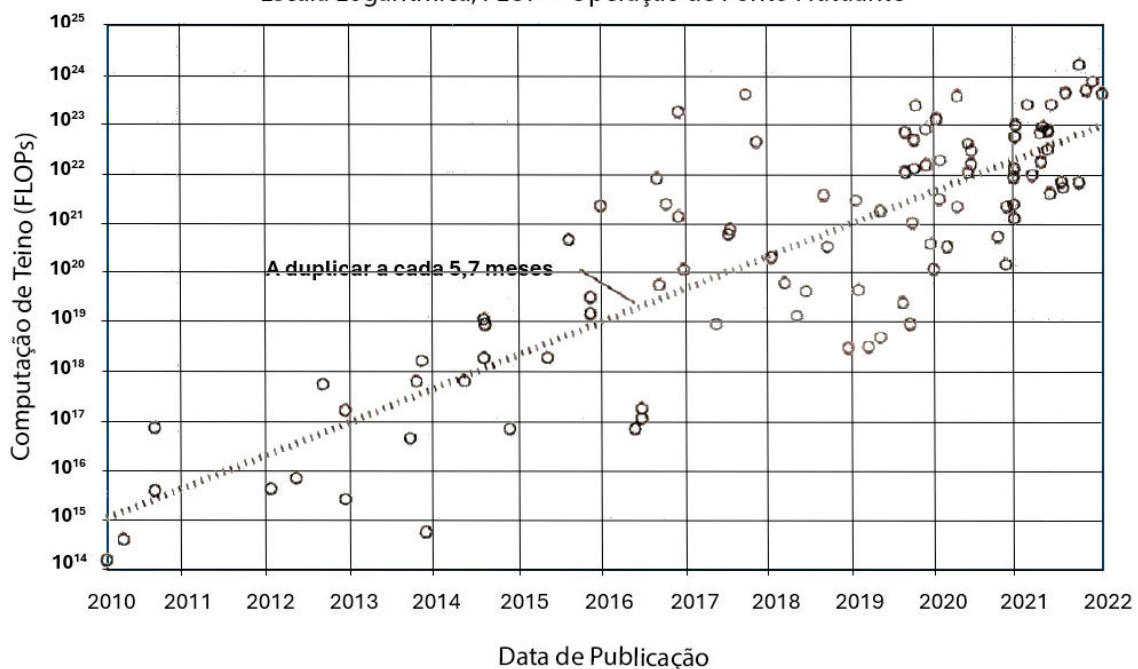


FIG. 2.4 GRÁFICO POR ÄNDERLJUNG ET AL (E OUTROS)., BASEADO EM DADOS DE 2022 DE SEVILLA ET AL (E OUTROS)., COM BASE NA PESQUISA ANTERIOR DE 2018 SOBRE IA E COMPUTAÇÃO REALIZADA POR AMODEI E HERNANDEZ DA OPENAI. ¹³⁵

O crescimento resultante no gasto total com treino reflete a expansão do âmbito dos dados úteis. Foi apenas nos últimos anos que podemos afirmar com certeza o seguinte: qualquer tipo de habilidade que gere dados de retroinformação de desempenho suficientemente claros pode ser transformado num modelo de aprendizagem profunda que impulsiona a IA para além das capacidades de todos os humanos*.

As habilidades humanas variam amplamente na acessibilidade dos seus dados de treino. Algumas habilidades são fáceis de avaliar em termos quantitativos e de reunir todos os dados relevantes. Por exemplo, no jogo de xadrez, há resultados claros de vitória, derrota ou empate, e classificações Elo** que fornecem uma medida quantitativa da força de um adversário. E os dados de xadrez são fáceis de reunir porque os jogos não envolvem ambiguidade e podem ser representados como uma sequência matemática de movimentos. Outras habilidades são fáceis de quantificar em princípio, mas a recolha e análise de dados são mais desafiantes. Argumentar um caso jurídico em tribunal leva a resultados claros

* Ou seja, com dados de retroinformação de desempenho suficientemente claros, qualquer habilidade humana pode ser transformada num modelo de aprendizagem profunda. Isso significa que, ao fornecer informações específicas e úteis sobre como uma habilidade é executada e avaliada, a inteligência artificial pode ultrapassar as capacidades humanas nessa área. A mensagem central é que, à medida que mais dados estruturados se tornam disponíveis, o potencial da IA para aprender e superar habilidades humanas continua a expandir-se.

** Sistema estatístico usado para medir a força relativa de jogadores em competições, como no xadrez. Este método foi criado pelo físico e mestre de xadrez Arpad Elo e é amplamente utilizado pela Federação Internacional de Xadrez (FIDE “Fédération Internationale des Échecs”).

de vitória ou derrota, mas é difícil desvendar quanto da habilidade do advogado contribuiu para esses resultados em comparação com fatores como a força do caso ou o viés dos jurados. E, em alguns casos, nem sequer é claro como quantificar a habilidade — por exemplo, a qualidade da escrita de poesia ou o quão emocionante é um romance de mistério. No entanto, mesmo nestes últimos exemplos, medidas de substituição poderiam ser plausivelmente usadas para treinar a IA. Os leitores de poesia poderiam fornecer avaliações de 0 a 100 sobre o quão bela uma poesia lhes pareceu, ou o fMRI poderia mostrar o quanto os seus cérebros se ativaram. Os dados de frequência cardíaca ou níveis de cortisol poderiam revelar as reações dos leitores ao suspense. A conclusão é que, com uma quantidade suficiente de dados, as métricas imperfeitas e indiretas ainda podem orientar a IA para melhorias. Encontrar essas métricas exige criatividade e experimentação.

Enquanto um neocórtex pode ter alguma ideia do que é um conjunto de treino, uma rede neural bem projetada pode extrair percepções além do que os cérebros biológicos podem perceber. Desde jogar um jogo até conduzir um carro, analisar imagens médicas ou prever o dobramento de proteínas, a disponibilidade de dados fornece um caminho cada vez mais claro para um desempenho sobre-humano. Isto está a criar um poderoso incentivo económico para identificar e recolher tipos de dados que anteriormente eram considerados demasiado difíceis para valer a pena.

Pode ser útil pensar nos dados de forma semelhante ao petróleo. Os depósitos de petróleo situam-se ao longo de um contínuo de

dificuldade de extração.¹³⁶ Alguns tipos de petróleo brotam do solo com a sua própria pressão, estando prontos para serem refinados e sendo baratos de produzir. Outros depósitos exigem perfuração profunda dispendiosa, fracturação hidráulica ou processos especiais de aquecimento para serem extraídos das rochas xisto. Quando os preços do petróleo estão baixos, as empresas energéticas extraem apenas das fontes mais económicas e de fácil acesso, mas, à medida que os preços aumentam, torna-se economicamente viável explorar os depósitos de acesso mais difícil.

De forma semelhante, quando os benefícios dos grandes volumes de dados eram relativamente modestos, as empresas recorriam a recolhê-los apenas nos casos em que o processo era barato. Contudo, à medida que as técnicas de aprendizagem automática avançam e a computação se torna mais acessível, o valor económico (e, muitas vezes, o valor social) de muitos tipos de dados de acesso mais difícil irá aumentar. De facto, graças às inovações aceleradas no campo dos grandes volumes de dados e da aprendizagem automática, a nossa capacidade de recolher, armazenar, classificar e analisar dados relativos às competências humanas expandiu-se enormemente, nos últimos um ou dois anos.¹³⁷ O termo “big data” (megadados ou dados em grande escala) tornou-se uma palavra da moda no Vale do Silício, mas a vantagem fundamental desta tecnologia é muito real: tornou-se viável empregar técnicas de aprendizagem automática que simplesmente não funcionariam com quantidades reduzidas de dados. Isto irá ocorrer, ao longo dos anos 2020, para quase todas as competências humanas existentes.

Considerar o progresso da IA em termos de competências discretas salienta um facto importante. Muitas vezes, referimo-nos à inteligência a nível humano como se fosse algo monolítico e único — algo que uma IA ou possui ou não possui. No entanto, é muito mais útil e preciso encarar a inteligência humana como um conjunto denso de diferentes capacidades cognitivas. Algumas destas, como a capacidade de se reconhecer no espelho, partilhamos com animais inteligentes como elefantes e chimpanzés. Outras, como a composição musical, são exclusivas dos seres humanos, variando imensamente de pessoa para pessoa. Não só as capacidades cognitivas diferem entre indivíduos, como podem também variar de forma acentuada dentro do mesmo indivíduo. Alguém pode ser um génio matemático e, ao mesmo tempo, um péssimo jogador de xadrez, ou ter uma memória fotográfica e ainda assim encontrar dificuldades na interação social. O personagem de Dustin Hoffman em *Rain Man* ilustra isto de forma memorável.

Assim, quando os investigadores de IA falam de inteligência a nível humano, geralmente referem-se à capacidade dos seres humanos mais habilidosos num domínio específico. Em algumas áreas, a diferença entre o ser humano mediano e o mais competente não é muito grande (por exemplo, reconhecer as letras do alfabeto na sua língua materna), enquanto noutras a disparidade é de facto enorme (por exemplo, na física teórica). Nestes casos, pode existir um intervalo de tempo substancial entre a IA atingir uma capacidade humana média e uma capacidade super-humana. Continua a ser uma questão em aberto quais as competências que, em última análise, se revelarão mais difíceis de dominar para a IA. Poderá acontecer, por exemplo, que, em 2034, a IA seja capaz de

compor canções vencedoras do Grammy, mas não de escrever roteiros premiados com o Oscar, e que consiga resolver os Problemas do Prémio Millennium em matemática, mas não gerar novas e profundas perspectivas filosóficas. Assim, poderá haver um período de transição significativo durante o qual a IA já tenha ultrapassado o teste de Turing e demonstre capacidades super-humanas na maioria dos aspetos, mas ainda não consiga superar os melhores humanos em algumas competências-chave.

Para fins de reflexão sobre a Singularidade, contudo, o elemento mais importante do nosso conjunto de competências cognitivas é a programação de computadores (e uma série de habilidades correlacionadas, como a ciência da computação teórica). Este é o principal gargalo para uma IA superinteligente. Uma vez que desenvolvermos uma IA com capacidades de programação suficientes para que se dotasse de ainda mais competências (seja de forma autónoma ou com auxílio humano), instaurar-se-á um ciclo de retroalimentação positiva. O colega de Alan Turing, I. J. Good, previu já em 1965 que isto conduziria a uma “explosão de inteligência.”¹³⁸ E, dado que os computadores funcionam a uma velocidade muito superior à dos seres humanos, eliminar os humanos do ciclo de desenvolvimento da IA desbloqueará taxas de progresso impressionantes. Os teóricos da inteligência artificial referem-se, de forma jocosa, a isto como “FOOM” — como se fosse um efeito sonoro ao estilo de banda desenhada do avanço da IA a disparar para o extremo do gráfico.¹³⁹

Alguns investigadores, como Eliezer Yudkowsky, consideram que isto é mais provável de ocorrer de forma extremamente rápida (um

“hard takeoff” no prazo de minutos a meses), enquanto outros, como Robin Hanson, acreditam que será relativamente mais gradual (um “soft takeoff” ao longo de anos ou mais).¹⁴⁰ Eu situo-me num ponto intermédio. A minha perspetiva é que as limitações físicas relativas ao hardware, aos recursos e aos dados do mundo real sugerem limites à velocidade do FOOM, mas que, mesmo assim, devemos tomar precauções para evitar que um eventual hard takeoff (mudança rápida e abrupta) corra mal. Relacionando isto com as capacidades cognitivas humanas, uma vez desencadeada uma explosão de inteligência, quaisquer competências que se revelem mais difíceis para a IA do que a programação auto aperfeiçoada serão também alcançadas num curto espaço de tempo.

Com a aprendizagem automática a tornar-se muito mais económica, a capacidade de computação bruta dificilmente será o fator limitador na obtenção de uma IA a nível humano. Os supercomputadores já excedem, de forma significativa, os requisitos computacionais brutos necessários para simular o cérebro humano. O Frontier do Oak Ridge National Laboratory, o principal supercomputador do mundo a partir de 2023¹⁴¹, é capaz de realizar da ordem de 10^{18} operações por segundo. Isto corresponde já a cerca de 10.000 vezes a velocidade máxima de computação que se presume ser atingida pelo cérebro (10^{14} operações por segundo).¹⁴²

Os meus cálculos de 2005, apresentados em *A Singularidade Está Próxima*, indicaram 10^{16} operações por segundo como um limite superior para a velocidade de processamento do cérebro

(tendo aproximadamente 10^{11} neurónios, cada um com cerca de 10^3 sinapses, estas a disparar na ordem de 10^2 vezes por segundo).¹⁴³ Mas, como referi na altura, esta foi uma estimativa elevada para ser conservadora. Na realidade, o processamento efetuado num cérebro efetivo será normalmente muito inferior. Uma série de pesquisas realizadas nas últimas duas décadas demonstrou que os neurónios disparam a uma ordem de magnitude mais lenta — não duzentas vezes por segundo, que é aproximadamente o seu limite teórico, mas mais perto de uma vez por segundo.¹⁴⁴ De facto, o projeto AI Impacts estimou, com base no consumo energético do cérebro, que o neurónio médio dispara apenas 0,29 vezes por segundo — o que implica que o processamento total do cérebro poderá ser tão baixo como da ordem de 10^{13} operações por segundo.¹⁴⁵ Isto corresponde à estimativa seminal de Hans Moravec, apresentada no seu livro de 1988 *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (*Filhos da Mente: O Futuro dos Robots e da Inteligência Humana*), que se baseou numa metodologia completamente diferente.¹⁴⁶

Isto ainda parte do pressuposto de que cada neurónio é necessário para a cognição humana funcional, o que sabemos não ser verdade. Existe um elevado grau de paralelismo no cérebro (ainda que pouco compreendido), com neurónios individuais ou módulos corticais a realizar trabalho redundante (ou trabalho que, pelo menos, poderia ser duplicado noutro local). Isto é comprovado pela capacidade de algumas pessoas fazerem uma recuperação funcional completa após um AVC ou lesão cerebral que destrua parte do seu cérebro.¹⁴⁷ Assim, as exigências computacionais para simular as estruturas neurais *cognitivamente relevantes* nos nossos

cérebros são, provavelmente, ainda menores do que as estimativas anteriores. Por conseguinte, 10^{14} parece ser uma estimativa conservadora para a gama mais provável. Se a simulação do cérebro exigir um poder computacional nesta faixa, a partir de 2023, cerca de 1.000 dólares de hardware já conseguem alcançar isso.¹⁴⁸ Mesmo que venha a exigir 10^{16} operações por segundo, 1.000 dólares de hardware provavelmente poderão alcançar isso por volta de 2032.¹⁴⁹

Estas estimativas baseiam-se na minha visão de que um modelo baseado apenas nos disparos dos neurónios pode alcançar uma simulação funcional do cérebro. Contudo, é concebível — embora seja uma questão filosófica que não pode ser testada cientificamente — que a consciência subjetiva exija uma simulação mais detalhada do cérebro. Talvez fosse necessário simular os canais iónicos individuais dentro dos neurónios, ou os milhares de diferentes tipos de moléculas que podem influenciar o metabolismo de uma determinada célula cerebral. Anders Sandberg e Nick Bostrom, do Future of Humanity Institute da Universidade de Oxford, estimaram que esses níveis mais elevados de resolução exigiriam 10^{22} ou 10^{25} operações por segundo, respetivamente.¹⁵⁰ Mesmo neste último caso, projetaram que um supercomputador de 1 bilião de dólares (em valores de 2008) poderia alcançar isso até 2030 e ser capaz de simular todas as proteínas em todos os neurónios até 2034.¹⁵¹ Com o tempo, é claro, os ganhos exponenciais de preço-desempenho reduziram drasticamente esses custos.

O que deve reter de tudo isto é que, mesmo alterando radicalmente as nossas suposições, a mensagem essencial da previsão não muda: os computadores serão capazes de simular cérebros humanos em todos os aspetos que possam ser relevantes dentro das próximas duas décadas. Isto não é algo que esteja a um século de distância e que os nossos bisnetos terão de descobrir. Vamos acelerar a extensão das nossas expectativas de vida a partir da década de 2020, pelo que, se estiver de boa saúde e for mais jovem que oitenta anos, é provável que isto ocorra durante a sua vida. Como outro ponto de perspetiva, as crianças nascidas hoje provavelmente verão o Teste de Turing ser superado enquanto estiverem na escola primária e testemunharão emulações cerebrais ainda mais ricas quando estiverem em idade universitária. Uma última comparação: estou a concluir este livro em 2023, o que, mesmo sob suposições pessimistas, está provavelmente mais próximo da viabilidade da emulação completa do cérebro do que estava em 1999, quando fiz muitas dessas previsões em *A Era das Máquinas Espirituais*.

7. Superando o Teste de Turing

Com a IA adquirindo capacidades novas e significativas todos os meses e a relação preço-desempenho para a computação que a impulsiona a melhorar rapidamente, a trajetória é clara. Mas como iremos julgar quando a IA finalmente alcançou inteligência a nível humano? O procedimento do teste de Turing descrito no início deste capítulo permite-nos tratar isso como uma questão científica rigorosa. Turing não especificou vários detalhes do teste, como quanto tempo os juízes humanos teriam para entrevistar os

concorrentes ou quais capacidades os juízes deveriam possuir. Em 9 de abril de 2002, o pioneiro da computação pessoal Mitch Kapor e eu realizámos a primeira aposta "Long Now"(Longa Duração), referente a se um teste de Turing seria superado até 2029.¹⁵² Isso introduziu uma série de questões, como definir até que ponto um ser humano poderia ter melhorias cognitivas (para ser juiz ou adversário humano) e ainda ser considerado humano.

A razão pela qual um teste empírico bem definido é necessário é que, como mencionado anteriormente, os humanos têm uma tendência poderosa de redefinir tudo o que a inteligência artificial alcança como algo que, em retrospectiva, não parece tão difícil. Isso é frequentemente referido como o "efeito da IA".¹⁵³ Ao longo das sete décadas desde que Alan Turing elaborou o seu jogo de imitação, os computadores gradualmente ultrapassaram os humanos em muitas áreas estreitas de inteligência. Mas sempre lhes faltou a amplitude e flexibilidade do intelecto humano. Após o supercomputador Deep Blue da IBM vencer o campeão mundial de xadrez Garry Kasparov em 1997, muitos comentaristas descartaram a relevância da conquista para a cognição no mundo real.¹⁵⁴ Como o xadrez envolve informações perfeitas sobre a localização das peças no tabuleiro e suas capacidades, e como há um número relativamente pequeno de movimentos possíveis em cada turno, é fácil representar o jogo matematicamente. Assim, vencer Kasparov poderia ser considerado apenas um truque matemático elaborado. Por outro lado, alguns observadores previram com confiança que os computadores nunca dominariam os tipos de tarefas ambíguas de linguagem natural necessárias para resolver palavras cruzadas ou competir no antigo programa de

perguntas e respostas *Jeopardy!*.¹⁵⁵ Mas as palavras cruzadas foram dominadas em dois anos¹⁵⁶, e menos de doze anos depois disso, o Watson da IBM competiu no *Jeopardy!* e derrotou com facilidade os dois maiores jogadores humanos, Ken Jennings e Brad Rutter.¹⁵⁷

Estes jogos demonstram uma ideia muito importante acerca da IA e do teste de Turing. Com base na capacidade de Watson para processar pistas do jogo, pressionar o botão e dar respostas corretas de forma confiante com a sua voz sintetizada, “ele” apresentou uma ilusão muito convincente de que estava a pensar de maneira semelhante a Ken e Brad. Contudo, essa não foi a única informação que os espectadores da partida receberam. No terço inferior do ecrã, um visor mostrava os três principais palpites de Watson para cada pista. Embora o primeiro palpite fosse quase sempre correto, o segundo e o terceiro não eram apenas errados, mas frequentemente ridiculamente errados — erros absurdos que até mesmo um jogador humano muito fraco nunca cometeria. Por exemplo, na categoria “UE, a União Europeia,” a pista era: “Eleito a cada 5 anos, tem 736 membros de 7 partidos.”¹⁵⁸ O Watson identificou corretamente que a resposta era o Parlamento Europeu, com 66% de confiança. No entanto, o segundo palpite de Watson foi “MEPs,” com 14%, e o terceiro foi “sufrágio universal,” com 10%.¹⁵⁹ Um humano que nunca tivesse ouvido falar da União Europeia saberia, só pela sintaxe da pista, que nenhuma dessas poderia estar correta. Isto demonstra que, embora o desempenho de Watson parecesse humano, ao analisar detalhadamente, fica evidente que a “cognição” de Watson era bastante alienígena à nossa.

Os avanços mais recentes permitiram que a IA compreendesse e utilizasse a linguagem natural de forma muito mais fluente. Em 2018, a Google lançou o Duplex, um assistente de IA que falava ao telefone de forma tão natural que as pessoas pensavam estar a conversar com um humano real; no mesmo ano, o Project Debater da IBM foi introduzido, envolvendo-se realisticamente em debates competitivos.¹⁶⁰ E, a partir de 2023, os modelos de linguagem de grande escala (LLMs) conseguem redigir textos inteiros com qualidade humana. Apesar deste progresso, até mesmo o GPT-4 está sujeito a “alucinações” acidentais, nas quais o modelo fornece respostas confiantes que não têm base na realidade.¹⁶¹ Por exemplo, se lhe pedirem para resumir um artigo de notícias inexistente, ele pode inventar informações que parecem perfeitamente plausíveis. Ou, se pedirem que cite fontes para um dado científico verdadeiro, ele pode indicar artigos académicos que não existem. Enquanto escrevo isto, apesar de o grande esforço de engenharia estar a tentar minimizar estas alucinações¹⁶², permanece uma questão em aberto de quão difícil será ultrapassar este problema. Mas estas falhas realçam o facto de que, tal como o Watson, mesmo estas poderosas IAs geram respostas através de processos matemáticos e estatísticos enigmáticos, muito diferentes do que reconheceríamos como os nossos próprios processos de pensamento.

Intuitivamente, isto parece um problema. É tentador pensar que o Watson “deveria” raciocinar como os humanos. Mas eu proporia que isso é uma superstição. No mundo real, o que importa é como um ser inteligente age. Se diferentes processos computacionais levarem uma futura IA a fazer descobertas científicas

revolucionárias ou a escrever romances emocionantes, por que deveríamos preocupar-nos com a forma como foram gerados? E se uma IA for capaz de proclamar de forma eloquente a sua própria consciência, que fundamentos éticos teríamos para insistir que apenas a nossa biologia pode dar origem a uma sciência válida? O empirismo do teste de Turing coloca o foco firmemente onde deve estar.

Contudo, embora o teste de Turing seja muito útil para avaliar o progresso da IA, não devemos tratá-lo como o único critério de inteligência avançada. Como demonstrado por sistemas como o PaLM 2 e o GPT-4, as máquinas podem superar os humanos em tarefas cognitivamente exigentes sem serem capazes de imitar de forma convincente um humano em outros domínios. Entre 2023 e 2029, o ano em que espero que o primeiro teste de Turing robusto seja superado, os computadores alcançarão capacidades claramente sobre-humanas numa gama crescente de áreas. De facto, é até possível que a IA atinja um nível sobre-humano de competência em programar-se antes de dominar as subtilezas sociais de senso comum do teste de Turing. Essa continua a ser uma questão por resolver, mas a possibilidade demonstra por que é que a nossa noção de inteligência ao nível humano precisa de ser rica e matizada. O teste de Turing é certamente uma parte importante disso, mas também será necessário desenvolver meios mais sofisticados para avaliar as formas complexas e variadas em que a inteligência humana e a das máquinas serão semelhantes e diferentes.

tratava de uma inteligência genuína e não meramente de imitação. Como Turing disse em 1950: “Não poderão as máquinas realizar algo que deva ser descrito como pensamento, mas que seja muito diferente do que o homem faz?... [S]e, no entanto, uma máquina puder ser construída para jogar satisfatoriamente o jogo da imitação, não precisamos de nos preocupar com esta objeção.”¹⁶³

Deve-se notar que, assim que uma IA passar esta versão rigorosa do teste de Turing, terá efetivamente superado os humanos em todos os testes cognitivos que possam ser expressos através da linguagem.¹⁶⁴ Qualquer deficiência da IA em qualquer uma destas áreas poderia ser exposta pelo teste. Claro, isto assume juízes inteligentes e adversários humanos perspicazes. Não será válido imitar uma pessoa embriagada, sonolenta ou que não domine a língua.¹⁶⁵ Da mesma forma, uma IA que engane juízes pouco familiarizados em investigar as suas capacidades não pode ser considerada como tendo passado num teste válido.

Turing afirmou que o seu teste poderia ser usado para avaliar as capacidades de uma IA em “praticamente qualquer um dos campos de atividade humana que desejemos incluir.” Assim, um examinador humano inteligente poderia pedir à IA que explicasse uma situação social complexa, tirasse inferências a partir de dados científicos e escrevesse uma cena engraçada de uma série de comédia. Portanto, o teste de Turing trata de muito mais do que simplesmente compreender a linguagem humana em si — trata das capacidades cognitivas que expressamos através da linguagem. É claro que uma IA bem-sucedida também teria de evitar parecer sobre-humana. Se o examinado fosse capaz de dar respostas

instantâneas a qualquer pergunta trivial, determinar rapidamente se números enormes são primos e falar fluentemente em cem línguas, seria bastante óbvio que não se tratava de um humano real.

Além disso, uma IA que alcançasse este ponto já teria muitas capacidades que ultrapassariam em muito as dos humanos — desde a memória à velocidade de cognição. Imagine as capacidades cognitivas de um sistema com um nível humano de compreensão de leitura, mas combinado com a recordação perfeita de todos os artigos da Wikipedia e de todas as investigações científicas já publicadas. Atualmente, a capacidade ainda limitada da IA para compreender a linguagem de forma eficiente atua como um gargalo no seu conhecimento geral. Em contraste, as principais limitações do conhecimento humano são a nossa relativamente lenta capacidade de leitura, a nossa memória limitada e, em última análise, as nossas vidas curtas. Os computadores já conseguem processar dados a uma velocidade impressionante, muito superior à dos humanos — se levar em média seis horas para uma pessoa ler um livro, o Talk to Books da Google era cerca de cinco mil milhões de vezes mais rápido¹⁶⁶ — e têm uma capacidade de armazenamento de dados praticamente ilimitada.

ACELERAR OS PARADIGMAS PARA A EVOLUÇÃO DO PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÃO

ÉPOCA	MEIO	ESCALA TEMPORAL

Primeira	Matério não viva	Biliões de anos <i>(síntese atômica e química não biológica)</i>
Segunda	RNA e DNA	Milhões de anos <i>(até que a seleção natural introduza um novo comportamento)</i>
Terceira	Cerebelo	Milhares a milhões de anos <i>(para adicionar competências complexas através da evolução)</i> Horas a anos <i>(para aprendizagens muito básicas)</i>
Quarta	Neocórtex Redes Neurais Digitais	Horas a semanas <i>(para dominar novas competências complexas)</i> Horas a dias <i>(para dominar novas competências complexas em níveis sobre-humanos)</i>
Quinta	Interfaces Cérebro—Computador	Segundos a minutos <i>(para explorar ideias inimagináveis para os humanos da atualidade)</i>
Sexta	Computrónio	< Segundos <i>(para reconfigurar continuamente a cognição até aos limites permitidos pelas leis da física)</i>

Quando o entendimento de linguagem da IA alcançar o nível humano, não será apenas um aumento incremental de conhecimento, mas uma explosão repentina de conhecimento. Isto significa que uma IA que pretenda passar num teste de Turing tradicional terá, na verdade, de se "tornar mais limitada"! Assim, para tarefas que não requerem imitar um humano, como resolver

problemas reais em medicina, química e engenharia, uma IA ao nível do teste de Turing já estaria a alcançar resultados profundamente sobre-humanos.

Para compreender para onde isto nos leva, podemos olhar para as seis épocas descritas no capítulo anterior, resumidas na tabela “Acelerar os Paradigmas para a Evolução do Processamento de Informação”, nas páginas 67/8.

8. Estendendo o Neocórtex para a Nuvem

Até agora, foram feitos esforços modestos para comunicar com o cérebro utilizando eletrónica, seja dentro ou fora do crânio. As opções não invasivas enfrentam um compromisso fundamental entre resolução espacial e temporal — isto é, quão precisamente conseguem medir a atividade cerebral no espaço versus no tempo. Os exames de imagem por ressonância magnética funcional (fMRI) medem o fluxo sanguíneo no cérebro como um substituto para a atividade neuronal.¹⁶⁷ Quando uma determinada parte do cérebro está mais ativa, consome mais glicose e oxigénio, necessitando de um afluxo de sangue oxigenado. Isto pode ser detetado até uma resolução de “voxels” cúbicos de cerca de 0,7 a 0,8 milímetros de lado — pequeno o suficiente para obter dados muito úteis.¹⁶⁸ Contudo, como há um atraso entre a atividade cerebral real e o fluxo sanguíneo, a atividade cerebral pode frequentemente ser medida com um intervalo de apenas alguns segundos — e raramente com uma precisão melhor que 400 a 800 milissegundos.¹⁶⁹

Os eletroencefalogramas (EEGs) têm o problema oposto. Detetam diretamente a atividade elétrica do cérebro, podendo identificar sinais com uma precisão de cerca de um milissegundo.¹⁷⁰ No entanto, como esses sinais são detetados do exterior do crânio, é difícil determinar exatamente de onde vieram, resultando numa resolução espacial de seis a oito centímetros cúbicos, que pode, por vezes, ser melhorada para um a três centímetros cúbicos.¹⁷¹

O equilíbrio entre a resolução espacial e temporal em exames ao cérebro é um dos principais desafios da neurociência em 2023. Estas limitações decorrem da física fundamental do fluxo sanguíneo e da eletricidade, respetivamente, pelo que, mesmo que possamos ver melhorias marginais com a inteligência artificial e a tecnologia de sensores aprimorada, estas provavelmente não serão suficientes para permitir uma interface cérebro-computador sofisticada.

Inserir elétrodos no cérebro evita o compromisso espacial-temporal e permite-nos não apenas registar diretamente a atividade de neurónios individuais, mas também estimulá-los — uma comunicação bidirecional. Contudo, inserir elétrodos no cérebro com a tecnologia atual envolve fazer buracos no crânio e, potencialmente, danificar estruturas neuronais. Por essa razão, estas abordagens têm sido, até agora, focadas em ajudar pessoas com deficiências como perda auditiva ou paralisia, para as quais o benefício supera o risco. O sistema BrainGate, por exemplo, permite

que pessoas com ELA* ou lesões na medula espinal operem um cursor de computador ou um braço robótico apenas com a mente.¹⁷² Contudo, como essa tecnologia de apoio só pode conetar-se a um número relativamente pequeno de neurónios de cada vez, não consegue processar sinais altamente complexos como a linguagem.

Ter uma tecnologia de pensamento-para-texto seria transformador, o que levou a investigações com o objetivo de aperfeiçoar um tradutor de ondas cerebrais para a linguagem. Em 2020, investigadores patrocinados pelo Facebook equiparam participantes do estudo com 250 elétrodos externos e utilizaram inteligência artificial poderosa para correlacionar a sua atividade cortical com palavras em frases faladas de amostras.¹⁷³ A partir disso, com um vocabulário de 250 palavras estudadas, conseguiram prever quais as palavras em que os participantes estavam a pensar, com uma taxa de erro tão baixa quanto 3 por cento. Este é um progresso entusiasmante, mas o Facebook interrompeu o projeto em 2021.¹⁷⁴ E permanece por descobrir até que ponto esta abordagem será capaz de escalar para vocabulários maiores (e, consequentemente, sinais mais complexos), à medida que se depara com o compromisso espacial-temporal. De qualquer forma, para expandir o próprio neocórtex, ainda será necessário dominar a comunicação bidirecional com grandes números de neurónios.

* "ELA", Esclerose Lateral Amiotrófica, uma doença neurodegenerativa que afeta os neurónios motores no cérebro e na medula espinal. Esta condição provoca sintomas como fraqueza muscular, perda de coordenação motora e, em estágios avançados, dificuldades respiratórias. É também conhecida como a doença de Lou Gehrig em alguns países.

Um dos esforços mais ambiciosos para escalar para mais neurónios é o Neuralink, de Elon Musk, que implanta simultaneamente um grande conjunto de elétrodoos semelhantes a fios.¹⁷⁵ Um teste em ratos de laboratório demonstrou um registo de 1.500 elétrodoos, em contraste com as centenas que foram empregues noutros projetos.¹⁷⁶ Mais tarde, um macaco implantado com o dispositivo conseguiu utilizá-lo para jogar o videojogo *Pong*.¹⁷⁷ Após um período de desafios regulatórios, o Neuralink recebeu aprovação da FDA para iniciar ensaios em humanos em 2023 e, exatamente quando este livro foi para impressão, implantou o seu primeiro dispositivo com 1.024 elétrodoos num humano.¹⁷⁸

Enquanto isso, a Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) está a trabalhar num projeto de longo prazo chamado Neural Engineering System Design, que tem como objetivo criar uma interface capaz de se conetar a um milhão de neurónios para registo e de estimular 100.000 neurónios.¹⁷⁹ A agência financiou vários programas de investigação diferentes para alcançar este objetivo, como uma equipa da Universidade de Brown que trabalha para criar “neurogrãos” do tamanho de grãos de areia, que podem ser implantados no cérebro, interagindo com os neurónios e uns com os outros para formar uma “intranet cortical.”¹⁸⁰

No final das contas, as interfaces cérebro-computador serão essencialmente não invasivas — o que provavelmente implicará elétrodoos inofensivos em escala nanométrica inseridos no cérebro através da corrente sanguínea.

Então, quanta computação será necessária para registrar? Conforme descrito anteriormente, o total de computação necessário para simular um cérebro humano é provavelmente cerca de 10^{14} operações por segundo ou menos. Note-se que isto se refere a uma simulação baseada na arquitetura real de um cérebro humano e capaz de passar o teste de Turing e, em todos os outros aspetos, aparentar-se, para observadores externos, a um cérebro humano. Contudo, isso não incluiria necessariamente muitos tipos de atividade no cérebro que não são necessários para gerar este comportamento observável. Por exemplo, é muito improvável que detalhes intracelulares, como a reparação de ADN dentro do núcleo de um neurónio, sejam relevantes para a cognição.

Mesmo que 10^{14} operações por segundo ocorram dentro do cérebro, uma interface cérebro-computador não precisa de contabilizar a maior parte dessas computações, pois são atividades preliminares que ocorrem bem abaixo da camada superior do neocórtex.¹⁸¹ Em vez disso, só precisamos de comunicar com as suas camadas superiores. E podemos ignorar completamente os processos não cognitivos do cérebro, como a regulação da digestão. Assim, estimo que uma interface prática precisará apenas de milhões a dezenas de milhões de conexões simultâneas.

Alcançar tal número exigirá reduzir a escala da tecnologia de interface, tornando-a cada vez mais pequena — e iremos usar inteligência artificial avançada para resolver os formidáveis problemas de engenharia e neurociência que isso implica. Em algum momento na década de 2030, atingiremos este objetivo utilizando dispositivos microscópicos chamados nanobots. Estes pequenos

dispositivos eletrônicos irão conectar as camadas superiores do nosso neocórtex à nuvem, permitindo que os nossos neurónios comuniquem diretamente com neurónios simulados alojados online para nós.¹⁸² Isto não exigirá uma espécie de cirurgia cerebral ao estilo de ficção científica — seremos capazes de enviar nanobots para o cérebro de forma não invasiva através dos capilares. Em vez de o tamanho do cérebro humano estar limitado pela necessidade de passar pelo canal de parto, ele poderá então ser expandido indefinidamente. Ou seja, assim que tivermos a primeira camada de neocórtex virtual adicionada, não será um processo único — mais camadas poderão ser empilhadas sobre essa (computacionalmente falando) para uma cognição cada vez mais sofisticada. À medida que este século avança e a relação preço-desempenho da computação continua a melhorar exponencialmente, o poder de computação disponível para os nossos cérebros também irá melhorar.

Lembra-se do que aconteceu há dois milhões de anos, da última vez que ganhámos mais neocórtex? Tornámo-nos humanos. Quando pudermos aceder a neocórtex adicional na nuvem, o salto em abstração cognitiva será provavelmente semelhante. O resultado será a invenção de formas de expressão imensamente mais ricas do que a arte e tecnologia possíveis nos dias de hoje — mais profundas do que atualmente conseguimos imaginar.

Existe uma limitação intrínseca ao imaginarmos como serão os futuros meios de expressão artística. Mas pode ser útil pensar por analogia à última revolução do neocórtex. Tente imaginar como seria para um macaco — um animal altamente inteligente, com um

cérebro amplamente semelhante ao nosso — assistir a um filme. A ação não seria totalmente inacessível para o macaco. Por exemplo, ele seria capaz de reconhecer que há seres humanos a falar no ecrã. Contudo, o macaco não entenderia os diálogos nem conseguiria interpretar ideias abstratas como “O facto de os personagens estarem a usar fatos metálicos significa que a ação está imaginada como tendo lugar durante a Idade Média.”¹⁸³ Esse é o tipo de salto que o córtex pré-frontal humano permitiu.

Quando pensamos na arte criada para pessoas com neocórtices ligados à nuvem, não se trata apenas de melhores efeitos de CGI (Computer-Generated Imagery “Imagens Geradas por Computador) ou de envolver os sentidos como o paladar e o olfato. Trata-se de possibilidades radicalmente novas de como o próprio cérebro processa experiências. Por exemplo, os atores podem atualmente transmitir o que a sua personagem está a pensar apenas através das suas palavras e expressões físicas externas. Mas poderemos eventualmente ter arte que coloque os pensamentos brutos, desorganizados e não verbais de uma personagem — em toda a sua beleza e complexidade inexprimíveis — diretamente nos nossos cérebros. Esta é a riqueza cultural que as interfaces cérebro-computador nos irão proporcionar.

Será um processo de co-criação — evoluindo as nossas mentes para desbloquear uma perceção mais profunda e usando esses poderes para produzir novas ideias transcendentais que as nossas futuras mentes possam explorar. Finalmente, teremos acesso ao nosso próprio código-fonte, utilizando inteligência artificial capaz de se redesenhar a si mesma. Uma vez que esta tecnologia nos

permitirá fundirmo-nos com a superinteligência que estamos a criar, estaremos essencialmente a recriar-nos a nós próprios. Libertados da limitação dos nossos crânios e processando num substrato milhões de vezes mais rápido do que o tecido biológico, as nossas mentes serão capacitadas para crescer exponencialmente, expandindo a nossa inteligência milhões de vezes. Este é o núcleo da minha definição de Singularidade.

CAPÍTULO 3

Quem Sou Eu?

1. O Que É a Consciência?

O teste de Turing e outras avaliações podem revelar muito sobre o que significa ser humano de forma geral, mas as tecnologias da Singularidade também nos obrigam a perguntar o que significa ser um humano *particular*. Onde se encaixa Ray Kurzweil em tudo isto? Agora, pode ser que não se interesse assim tanto por Ray Kurzweil; está interessado em si mesmo, então pode colocar a mesma questão acerca da sua própria identidade. Mas, para mim, por que razão é Ray Kurzweil o centro da minha experiência? Por que sou eu esta pessoa em específico? Por que não nasci em 1903 ou em 2003? Por que sou um homem ou até mesmo um humano? Não há uma razão científica que obrigue que seja assim. Quando nos perguntamos “Quem sou eu?”, estamos a colocar uma questão fundamentalmente filosófica. É uma pergunta sobre consciência.

No livro *Como Criar uma Mente*, J citou Samuel Butler:

Quando uma mosca pousa na flor, as pétalas fecham-se sobre ela e seguram-na firmemente até que a planta tenha absorvido o inseto no seu sistema; mas não se fecham em nada que não seja bom para comer; de uma gota de chuva ou de um pedaço de pau não fazem caso. Curioso! Que algo tão inconsciente tenha um olho tão atento

para os seus próprios interesses. Se isto é inconsciência, para que serve a consciência?¹

Butler escreveu isto em 1871.² Devemos concluir da sua observação que as plantas são, de facto, conscientes? Ou que este tipo específico de planta tem consciência? Como poderíamos saber? Afirmamos confiantemente que outro ser humano é consciente, dado que a sua capacidade de comunicar e tomar decisões é semelhante à nossa. Mas, mesmo isso, é tecnicamente apenas uma suposição. Não conseguimos detetar diretamente a consciência ou a sua ausência.

Mas o que é a consciência? As pessoas frequentemente usam a palavra “consciência” para se referir a dois conceitos diferentes, mas relacionados. Um deles refere-se à capacidade funcional de estar ciente do ambiente e agir como se estivesse ciente tanto dos pensamentos internos quanto de um mundo externo que é distinto deles. Por esta definição, por exemplo, poderíamos dizer que uma pessoa profundamente adormecida não está consciente, uma pessoa embriagada está parcialmente consciente, e uma pessoa sóbria está totalmente consciente. Com exceção de casos raros como a “síndrome do encarceramento”, é geralmente possível julgar o nível de consciência de outra pessoa do exterior. Até certos comportamentos de um animal, como reconhecer-se ao espelho, podem lançar luz sobre este tipo de consciência. Mas, quando se trata de questões de identidade pessoal como as abordadas neste capítulo, um segundo significado é mais relevante: *a capacidade de*

ter experiências subjetivas dentro da mente — e não meramente de dar a aparência exterior de as ter. Os filósofos chamam a essas experiências “qualia.” Assim, quando digo aqui que não podemos detetar diretamente a consciência, quero dizer que as qualia de uma pessoa não podem ser detetadas externamente.

No entanto, apesar da sua não verificabilidade, a consciência não pode simplesmente ser ignorada. Se examinarmos a base do nosso sistema moral, percebemos que os nossos julgamentos éticos frequentemente dependem das nossas avaliações de consciência. Vemos os objetos materiais, não importa quão intrincados ou interessantes ou valiosos sejam, como importantes apenas na medida em que afetam a experiência consciente de seres conscientes. Todo o debate sobre os direitos dos animais, por exemplo, gira em torno da medida em que acreditamos que eles são conscientes e de qual é a natureza dessa experiência consciente.³

A consciência representa um problema para os filósofos. Questões éticas, como que tipos de seres têm direitos, frequentemente dependem das nossas intuições sobre se essas entidades têm experiências subjetivas. Mas, como não podemos detetar estas do exterior, usamos o outro sentido funcional de consciência como um substituto. Isto baseia-se, por analogia, nas nossas próprias experiências. Cada um de nós (posso apenas assumir!) tem experiências subjetivas no interior, e sabemos que também temos o tipo de autoconsciência funcional que pode ser observada pelos outros. Por isso, assumimos que, quando os outros mostram consciência funcional, eles também devem estar a ter

experiências subjetivas interiores. Mesmo os cientistas que argumentam que a consciência subjetiva é irrelevante para o pensamento empírico, contudo, agem como se as pessoas à sua volta fossem conscientes, sendo atentos às suas experiências.

Apesar de prontamente estendermos a presunção de consciência aos nossos semelhantes humanos, as nossas intuições sobre outros animais enfraquecem à medida que o comportamento deles difere do nosso. Embora cães e chimpanzés não tenham uma cognição totalmente ao nível humano, o seu comportamento complexo e emocional parece à maioria das pessoas como algo que deve ser acompanhado internamente por experiências subjetivas. E os roedores? Eles exibem alguns comportamentos semelhantes aos dos humanos, como brincadeiras sociais e demonstração de medo ao perigo.⁴ Uma proporção menor de pessoas considera os roedores como seres conscientes e geralmente encara a sua experiência subjetiva como muito mais superficial em comparação com a dos humanos. E quanto aos insetos?⁵ As moscas-da-fruta não recitam Shakespeare, mas realizam comportamentos em resposta ao seu ambiente e têm cérebros compostos por cerca de 250.000 neurónios. As baratas têm cerca de 1.000.000. Isso representa apenas cerca de 0,001 por cento dos neurónios que o cérebro humano possui, portanto, há muito menos espaço para redes complexas e hierárquicas como as nossas. E quanto às amebas? Esses organismos unicelulares não demonstram nada que se assemelhe ao tipo funcional de consciência que os humanos e animais superiores possuem. Ainda assim, no século XXI, os cientistas obtiveram uma melhor compreensão de como até formas

de vida muito primitivas podem apresentar formas rudimentares de inteligência, como memória.⁶

Há um sentido no qual a consciência é binária — será que um ser experimenta qualia de alguma forma? — mas refiro-me aqui à questão adicional do grau. Imagine como o seu próprio nível de consciência subjetiva difere se está a ter um sonho vago, estás acordado, mas embriagado ou sonolento, ou está totalmente alerta. Esta é a linha contínua que os investigadores consideram ao avaliar a consciência animal. E a opinião de especialistas está a mudar em favor de mais animais terem mais consciência do que se acreditava anteriormente. Em 2012, um grupo multidisciplinar de cientistas reuniu-se na Universidade de Cambridge para avaliar as evidências de consciência entre animais não humanos. Esta conferência resultou na assinatura da Declaração de Cambridge sobre Consciência, que afirma a probabilidade de que a consciência não seja um fenómeno exclusivamente humano. Segundo a declaração, “a ausência de um neocórtex não parece impedir que um organismo experimente estados afetivos.”⁷ Os signatários identificaram os “substratos neurológicos que geram consciência” em “todos os mamíferos e aves, e muitos outros seres, incluindo polvos.”⁸

A ciência diz-nos que os cérebros complexos dão origem à consciência funcional. Mas o que nos causa ter consciência subjetiva? Alguns dizem que é Deus. Outros acreditam que a consciência é um produto de processos puramente físicos. Mas, independentemente da origem da consciência, ambos os polos do debate espiritual-secular concordam que ela é de alguma forma sagrada. Como as pessoas (e pelo menos alguns outros animais) se

tornaram conscientes é apenas uma questão causal, seja por uma divindade benigna ou pela natureza não direcionada. O resultado final, contudo, não é objeto de debate — qualquer pessoa que não reconheça a consciência e a capacidade de sofrimento de uma criança é considerada gravemente imoral.

Ainda assim, a causa por trás da consciência subjetiva em breve será mais do que apenas um tema de especulação filosófica. À medida que a tecnologia nos dá a capacidade de expandir a nossa consciência além dos nossos cérebros biológicos, precisaremos decidir o que acreditamos gerar as qualia no núcleo da nossa identidade, e concentrar-nos em preservá-las. Dado que os comportamentos observáveis são o nosso único substituto disponível para inferir consciência subjetiva, a nossa intuição natural coincide de perto com a explicação cientificamente mais plausível: nomeadamente, que cérebros que podem suportar comportamentos mais sofisticados dão origem a uma consciência subjetiva mais sofisticada. O comportamento sofisticado, como discutido no capítulo anterior, surge da complexidade do processamento de informações num cérebro⁹ — e isso, por sua vez, é largamente determinado pela forma como ele pode representar informações de maneira flexível e por quantas camadas hierárquicas existem na sua rede.

Isso tem implicações profundas para o futuro da humanidade — e, se viver nas próximas décadas, para si pessoalmente. Recorde-se: todos os saltos intelectuais da história registada ocorreram em cérebros que permaneceram estruturalmente os mesmos desde a Idade da Pedra. A tecnologia externa agora permitiu que cada um

de nós acesse à grande maioria das descobertas feitas por todos os outros da nossa espécie, mas experienciamo-las a um nível de consciência semelhante ao dos nossos ancestrais neolíticos. No entanto, quando pudermos aumentar o próprio neocórtex, durante as décadas de 2030 e 2040, não estaremos apenas a adicionar poder de resolução abstrata de problemas; estaremos a aprofundar a nossa própria consciência subjetiva.

2. Zombis, Qualia e o Problema Difícil da Consciência

Há algo fundamental sobre a consciência que é impossível partilhar com os outros. Quando rotulamos certas frequências de luz como “verde” ou “vermelho”, não temos como saber se as minhas qualia — a minha experiência de verde e vermelho — são as mesmas que as suas. Talvez eu experiencie o verde da mesma forma que você experiencie o vermelho, e vice-versa. Contudo, não existe meio de compararmos diretamente as nossas qualia utilizando a linguagem ou qualquer outro método de comunicação.¹⁰ Na verdade, mesmo quando se tornar possível conectar diretamente dois cérebros, será impossível provar se os mesmos sinais neurais desencadeiam as mesmas qualia para si e para mim. Assim, se as nossas qualia de vermelho/verde fossem realmente invertidas entre si, nunca tomaríamos consciência disso.

Como mencionei no livro *Como Criar uma Mente*, esta constatação também leva a uma experiência mental mais inquietante. E se uma pessoa não tivesse qualia nenhuma? O filósofo David Chalmers (nascido em 1966) chama esses seres hipotéticos de “zombies” — pessoas que apresentam todos os

correlatos neurológicos e comportamentais detetáveis de consciência, mas que não têm qualquer experiência subjetiva.¹¹ A ciência nunca seria capaz de distinguir entre zombies e humanos normais.

Uma forma de destacar a diferença nas nossas ideias sobre consciência funcional e consciência subjetiva é considerar um cão versus um humano artificial hipotético, caso pudéssemos ter a certeza de que não tinha experiência subjetiva (ou seja, um “zombie”). Mesmo que o zombie pudesse demonstrar uma cognição muito mais complexa do que a de um cão, a maioria das pessoas provavelmente diria que ferir o cão — que assumimos ter consciência subjetiva — é pior do que ferir o zombie, que pode uivar de dor, mas que sabemos não estar realmente a sentir nada. O problema é que, na vida real, mesmo em princípio, não há maneira de determinar cientificamente se outro ser tem consciência subjetiva.

Se tais zombies são pelo menos teoricamente possíveis, então não deve haver uma ligação causal necessária entre qualia e os sistemas físicos (ou seja, cérebros ou computadores) que realizam o processamento de informações que, externamente, dão a aparência de consciência. Esta é a visão de algumas crenças religiosas sobre a alma — que é uma entidade sobrenatural claramente separada do corpo. Esse tipo de especulação estaria além do alcance da ciência. Mas, se os sistemas físicos que sustentam a cognição necessariamente também geram consciência — tornando os zombies impossíveis — não há uma maneira coerente para a ciência demonstrar isso também. A consciência

subjetiva é qualitativamente diferente do domínio das leis físicas observáveis, e não segue que padrões específicos de processamento de informações, de acordo com estas leis, produzirão necessariamente experiência consciente. Chalmers chama a isto o “problema difícil da consciência.” As suas “perguntas fáceis,” como o que acontece à nossa mente quando não estamos acordados, estão entre as mais difíceis de toda a ciência, mas, pelo menos, podem ser estudadas cientificamente.¹²

Para o problema difícil, Chalmers recorre a uma ideia filosófica que chama de “panprotopsiquismo.”¹³ O panprotopsiquismo trata a consciência como uma força fundamental do universo — uma que não pode ser reduzida simplesmente a um efeito de outras forças físicas. Pode-se imaginar um tipo de campo universal que contém o potencial para a consciência. Na interpretação desta visão que defendo, é o tipo de complexidade no processamento de informações encontrado no cérebro que “desperta” essa força para o tipo de experiência subjetiva que reconhecemos. Assim, independentemente de o cérebro ser feito de carbono ou de silício, a complexidade que lhe permite dar sinais externos de consciência também lhe confere uma vida interior subjetiva.

Embora nunca sejamos capazes de provar isto cientificamente, haverá um imperativo ético poderoso para agir como se fosse verdade. Dito de outra forma, se houver uma hipótese plausível de que uma entidade que maltrata possa ser consciente, a escolha moral mais segura é assumir que ela é, em vez de correr o risco de atormentar um ser sensível. Ou seja, devemos agir como se os zombies fossem impossíveis.

Assim, do ponto de vista panprotopsiquista, o teste de Turing não serviria apenas para estabelecer uma capacidade funcional ao nível humano, mas também forneceria fortes evidências de consciência subjetiva e, conseqüentemente, de direitos morais. Embora as implicações legais da inteligência artificial consciente sejam profundas, duvido que o nosso sistema político se adapte rapidamente o suficiente para consagrar esses direitos na lei até ao momento em que as primeiras IAs ao nível de Turing forem desenvolvidas. Portanto, inicialmente, caberá às pessoas que as desenvolvem formular estruturas éticas que possam conter abusos.

Além das razões éticas para assumir que seres aparentemente conscientes possuem consciência, há também uma boa razão teórica para acreditar que algo como o panprotopsiquismo seja a explicação causal precisa para a consciência. Ele situa-se num meio-termo entre o dualismo e o fisicalismo (ou materialismo), que há muito tempo são as duas principais escolas de pensamento. O dualismo sustenta que a consciência surge de algo completamente separado da matéria “inanimada” comum. Muitos dualistas identificam isto como uma alma. O problema, do ponto de vista científico, é que, mesmo que aceitemos que uma alma sobrenatural possa existir, carecemos de uma teoria promissora sobre como esta afetaria a matéria no mundo observável (por exemplo, os neurónios no nosso cérebro).¹⁴

A visão oposta, o fisicalismo, sugere que a consciência deve surgir inteiramente de certas disposições da matéria física comum nos nossos cérebros. Contudo, mesmo que esta visão consiga descrever perfeitamente os aspetos funcionais de como a

consciência opera (ou seja, explicar a inteligência humana de forma análoga à forma como a ciência da computação explica a IA), ela não consegue oferecer qualquer explicação para a dimensão subjetiva da consciência que é intrinsecamente inacessível à ciência. O panprotopsiquismo encontra um equilíbrio útil entre estes dois pontos de vista opostos.

3. Determinismo, Emergência, e o Dilema do Livre-Arbítrio

Um conceito intimamente relacionado com a consciência é a nossa percepção de livre-arbítrio.¹⁵ Se perguntar a uma pessoa comum na rua o que entende por esse termo, a resposta provavelmente incluirá a ideia de que devem ser capazes de controlar as suas próprias ações. Os nossos sistemas políticos e judiciais baseiam-se no princípio de que todos têm livre-arbítrio, mais ou menos nesse sentido.

No entanto, quando os filósofos procuram uma definição mais precisa, há pouca concordância sobre o que o termo realmente significa. Muitos filósofos acreditam que a existência do livre-arbítrio requer que o futuro não seja predeterminado.¹⁶ Afinal, se já estiver certo o que acontecerá no futuro, como poderia o nosso arbítrio ser livre num sentido significativo? Por outro lado, se o "livre-arbítrio" significar apenas que as suas ações se reduzem a processos totalmente aleatórios ao nível quântico, isso não deixa espaço para aquilo que a maioria de nós reconheceria como verdadeiro livre-arbítrio. Como o filósofo inglês Simon Blackburn

afirmou, "o acaso é tão implacável quanto a necessidade" ao aparentemente excluir o livre-arbítrio.¹⁷ Assim, um conceito significativo de livre-arbítrio deve de alguma forma sintetizar tanto ideias filosóficas deterministas como indeterministas — evitando uma previsibilidade rígida sem cair no acaso.

Uma abordagem perspicaz entre esses extremos surge a partir do trabalho do físico e cientista da computação Stephen Wolfram (nascido em 1959). A sua investigação tem sido há muito influente no meu próprio pensamento sobre a interseção entre física e computação. No seu livro de 2002, *Um Novo Tipo de Ciência*, Wolfram lança luz sobre fenómenos que possuem tanto propriedades deterministas como não deterministas — objetos matemáticos chamados autómatos celulares.¹⁸

Os autómatos celulares são modelos simples representados por "células" que alternam entre estados (por exemplo, preto ou branco, vivo ou morto), com base num dos muitos conjuntos possíveis de regras. Estas regras especificam como cada célula irá comportar-se, tendo por base os estados das células próximas. Este processo desenrola-se ao longo de uma série de passos discretos e pode gerar comportamentos altamente complexos. Um dos exemplos mais famosos de autómatos celulares é o chamado Jogo da Vida de Conway, que utiliza uma grelha bidimensional.¹⁹ Entusiastas e matemáticos descobriram numerosas formas interessantes que formam padrões que evoluem de maneira previsível de acordo com as regras do Jogo da Vida. O Jogo da Vida pode até ser usado para replicar um computador funcional ou simular o software para executar e exibir outra versão de si próprio!

A teoria de Wolfram começa com autómatos muito básicos — células dispostas numa linha unidimensional, abaixo da qual novas linhas são adicionadas sequencialmente, com base num conjunto de regras e nos estados das células na linha anterior.

Através de uma análise extensiva, Wolfram aponta que, para alguns conjuntos de regras, independentemente do número de passos considerados, não é possível prever os estados futuros sem passar por cada uma das iterações intermédias.²⁰ Não existe um atalho para resumir o resultado.

O tipo mais simples de regra é a classe de regras 1. Um exemplo deste tipo é a regra 222²¹:

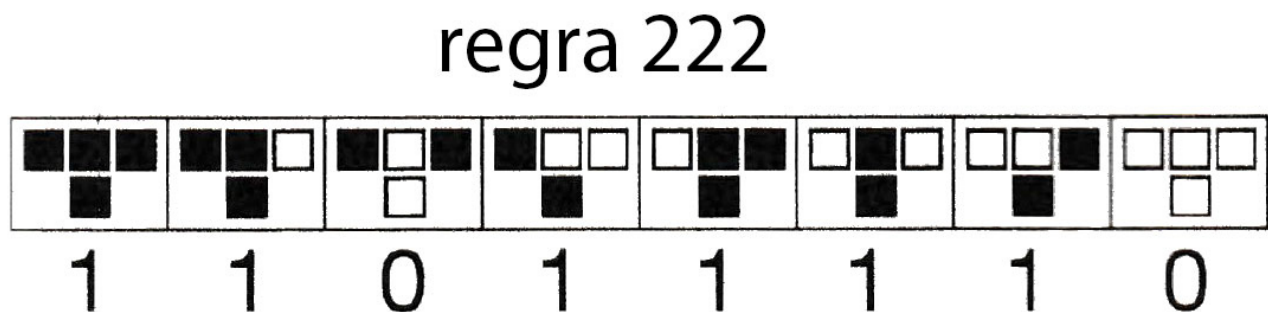


FIG. 3.1 REGRA 222

Para cada célula, existem oito combinações possíveis de estados para as três células adjacentes na etapa anterior (mostradas aqui na linha superior). A regra especifica qual estado cada uma dessas combinações causa na etapa seguinte (linha inferior). Preto e branco também podem ser representados, respetivamente, por 1 e 0.

Se começarmos com uma única célula central preta e calcularmos a progressão das células, linha após linha, aplicando a regra 222, obtemos este resultado²²:

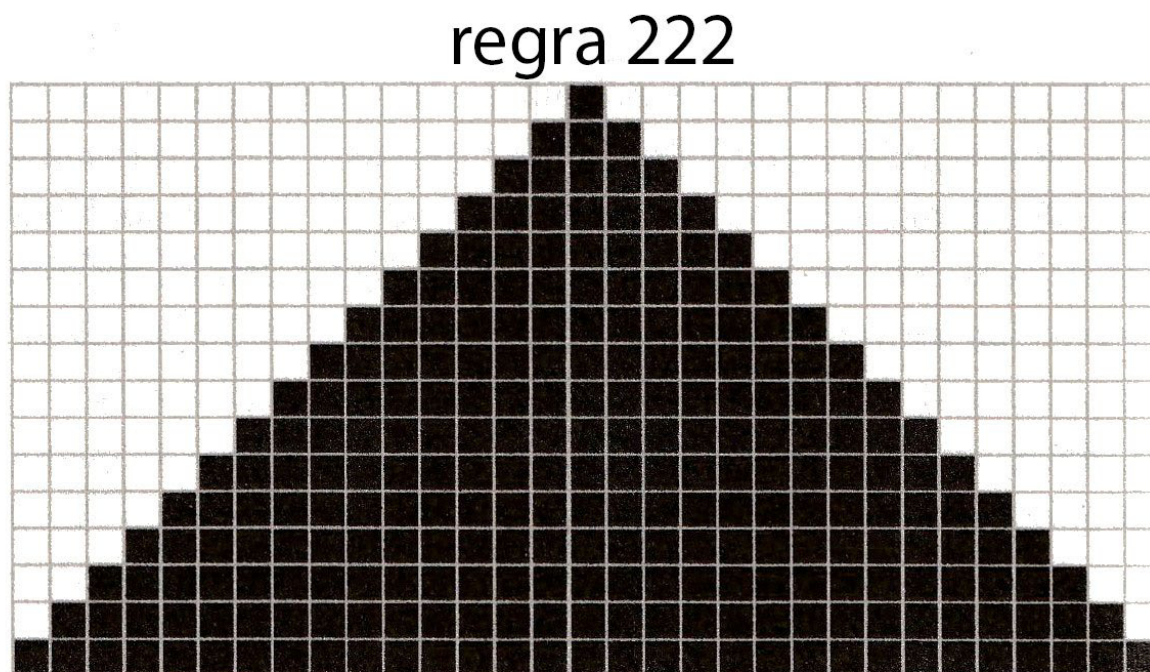


FIG. 3.2 PADRÃO RESULTANTE DA APLICAÇÃO DA REGRA 222

Assim, podemos ver que a regra 222 gera um padrão muito previsível. Se eu perguntasse qual é a milionésima célula — ou a célula que vai da milionésima à milionésima-milionésima — da regra 222, poderia simplesmente responder “preta”. É assim que a maior parte da ciência “supostamente” funciona: aplicando regras deterministas para discernir resultados previsíveis.

Mas a classe de regra 1 é apenas um tipo de regra. Na teoria de Wolfram, a maior parte do mundo natural pode ser explicada por quatro diferentes classes, distinguidas pelos tipos de resultados que produzem. A classe 2 e a classe 3 são algo interessantes, pois

produzem disposições cada vez mais complexas de células "pretas" e "brancas", mas a mais fascinante é a classe 4, exemplificada pela regra 110²³:

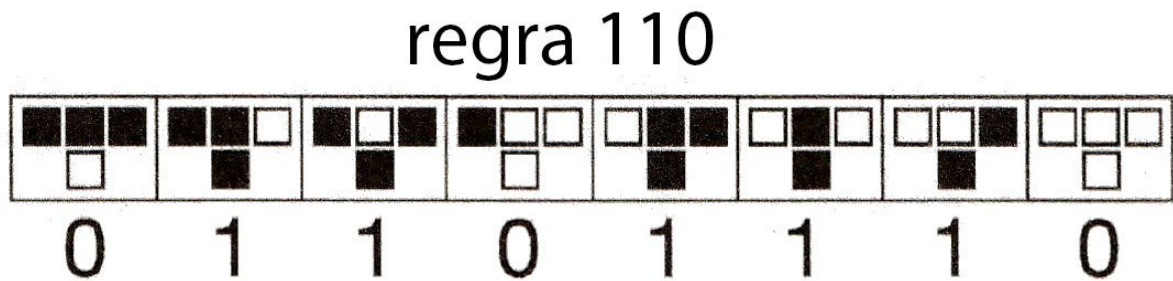


FIG. 3.3 REGRA 110

Se eu seguir esta regra a partir de uma única célula preta inicial, o resultado é:

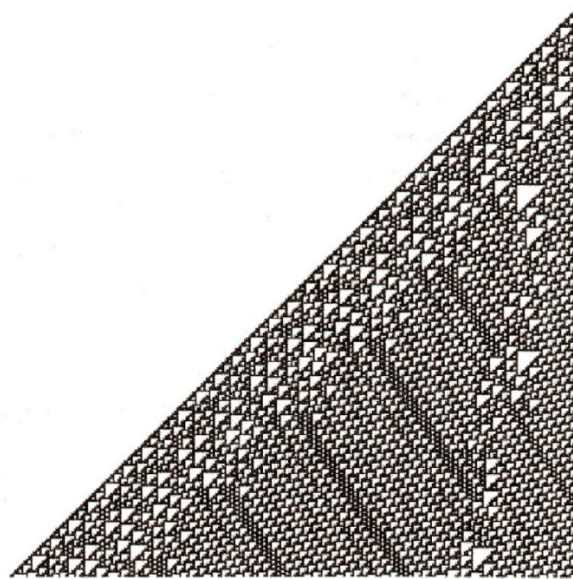


FIG. 3.4 PADRÃO RESULTANTE.

Se continuarmos as iterações, obtemos imagens como esta²⁴:

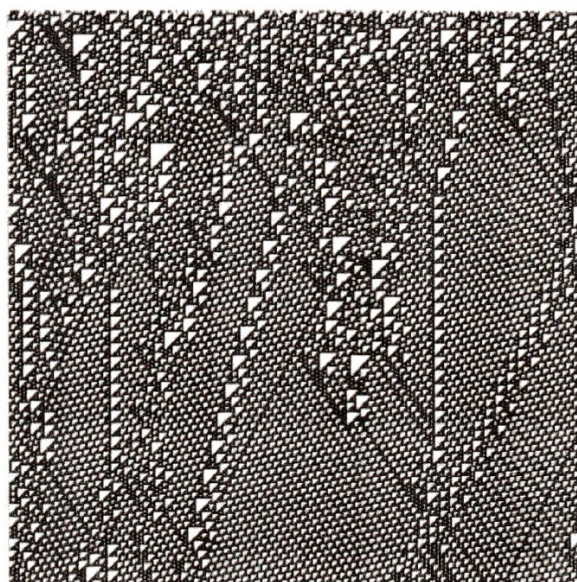


FIG. 3.5 OUTRO PADRÃO RESULTANTE.

O ponto aqui é que não há como determinar qual será a milésima linha, ou a milionésima à milionésima-milionésima linha, a não ser calculando-as uma a uma²⁵. Isso significa que sistemas baseados em propriedades da classe 4 — como o nosso próprio universo, argumenta Wolfram — possuem uma complexidade irreduzível que desafia as antigas versões redutivas do determinismo. Embora essa complexidade surja de uma programação determinista, num sentido crucial, a programação não explica totalmente a sua riqueza.

Uma amostra estatística de células individuais faria com que os seus estados parecessem essencialmente aleatórios, mas podemos ver que o estado de cada célula resulta deterministicamente do passo anterior — e a imagem macro resultante mostra uma mistura de comportamentos regulares e irregulares. Isso demonstra uma propriedade chamada emergência²⁶. Essencialmente, emergência significa que coisas muito simples, coletivamente, dão origem a coisas muito mais complexas. As estruturas fractais na natureza,

como os caminhos retorcidos de cada ramo crescente de uma árvore, os padrões listrados das pelagens de zebras e tigres, as conchas dos moluscos e inúmeros outros fenômenos na biologia, exibem um tipo de codificação da classe 4²⁷. Habitamos um mundo profundamente afetado pelo tipo de padrões encontrados em tais autómatos celulares — um algoritmo muito simples produzindo comportamentos altamente complexos que se situam na fronteira entre a ordem e o caos.

É essa complexidade em nós que pode dar origem à consciência e ao livre-arbítrio. Quer atribua a programação subjacente do seu livre-arbítrio a Deus, ao panprotopsiquismo ou a outra coisa qualquer, você é mais do que o próprio programa.

Mas não é uma coincidência que essas regras deem origem à consciência e a uma ampla gama de outros fenômenos naturais. Wolfram defende com veemência que as leis da física em si mesmas emergem de certos tipos de regras computacionais relacionadas aos autómatos celulares. Em 2020, ele anunciou o Projeto de Física de Wolfram — um esforço ambicioso e contínuo para entender toda a física através de um modelo que é análogo aos autómatos celulares, mas mais generalizado²⁸.

Isto permitiria um compromisso entre o determinismo clássico e o indeterminismo quântico. Embora algumas partes do mundo macroscópico possam ser aproximadas com atalhos algorítmicos — por exemplo, prever onde um satélite estará após um milhão de órbitas — isso não é verdade nas escalas mais fundamentais. Se a realidade se basear em princípios como as regras de classe 4, no

seu nível mais profundo, poderíamos explicar a aparente aleatoriedade na escala quântica em termos determinísticos, mas não haveria nenhum algoritmo resumido que pudesse prever o estado exato de todo o universo num momento futuro²⁹. Isto continua a ser especulativo, pois ainda não sabemos qual é, especificamente, o conjunto completo dessas regras. Talvez uma futura “teoria de tudo” unifique tudo isto numa explicação coerente, mas ainda não chegámos lá. Com a previsão efetiva fora de questão, resta a simulação, mas o universo não poderia conter um computador suficientemente grande para se simular a si próprio. Por outras palavras, não há como desvendar a realidade sem realmente deixá-la avançar.

Mais adiante neste capítulo, discuto possibilidades futuras de transferir a consciência dos nossos cérebros biológicos para computadores não biológicos. Isto levanta um ponto importante para clarificação. Embora eventualmente se torne possível emular digitalmente o funcionamento do cérebro, isso não é o mesmo que pré-computá-lo num sentido determinista. Isto acontece porque os cérebros (sejam biológicos ou não) não são sistemas fechados. Os cérebros recebem informação do mundo exterior e depois manipulam-na através de redes incrivelmente complexas — de facto, cientistas identificaram recentemente redes no cérebro que existem em até onze dimensões!³⁰ Esta complexidade provavelmente utiliza fenómenos ao estilo da regra 110, para os quais não existe maneira de “espreitar” computacionalmente sem simular cada passo em sequência. E, uma vez que os cérebros são sistemas abertos, é impossível incluir entradas futuras desconhecidas numa simulação passo-a-passo. Assim, ser capaz de

replicar a função do cérebro não implica a capacidade de pré-computar os seus estados futuros. Isso pode ser uma boa razão pela qual o universo existe.

Dito de outra forma, se as regras de um universo se basearem em algo como autómatos celulares, a única forma de serem expressas seria através de um desenrolar passo-a-passo — através da realidade a acontecer de facto. Em contraste, se um universo tivesse regras determinísticas mas sem a emergência tipo autómatos ou se fosse baseado apenas em aleatoriedade, a realidade não exigiria necessariamente o desenrolar passo-a-passo que realmente observamos. Além disso, se a consciência só puder emergir a partir do tipo de complexidade ordem-e-caos dos autómatos de classe 4, isso pode ser visto como um argumento filosófico para a nossa existência — sem essas regras, não estaríamos aqui para ponderar a questão.

Isto abre a porta ao “compatibilismo” — a perspectiva de que um mundo determinista ainda pode ser um mundo com livre-arbítrio.³¹ Podemos tomar decisões livres (isto é, decisões que não são causadas por algo externo, como outra pessoa), mesmo que as nossas decisões sejam determinadas por leis subjacentes da realidade. Um mundo determinado significa que, teoricamente, poderíamos olhar tanto para o futuro como para o passado no tempo, já que tudo é determinado em ambas as direções. Mas, de acordo com regras ao estilo da regra 110, a única forma de vermos perfeitamente o futuro seria através do desenrolar de todos os passos. Assim, sob a perspectiva do panprotopsiquismo, os processos emergentes nos nossos cérebros não nos controlam; eles

são nós. Emergimos de forças mais profundas, mas as nossas escolhas não podem ser conhecidas antecipadamente — por isso temos livre-arbítrio, desde que os processos que dão origem à nossa consciência possam ser expressos através das nossas ações no mundo.³²

4. O Dilema do Livre-Arbítrio com Mais de Um Cérebro por Humano

Se analisarmos como os humanos têm retratado andróides em filmes e romances, parece que implicitamente partilhamos uma imaginação panprotopsiquista — se o comportamento de uma inteligência artificial parecer humano, mesmo que a sua cognição não seja baseada em neurónios biológicos, vamos apoiá-la como se fosse um ser subjetivamente consciente. Mas, tal como uma inteligência artificial pode ser composta por muitos algoritmos separados, evidências médicas cada vez mais consistentes demonstram que o cérebro humano possui várias unidades distintas de tomada de decisão. Considere todos os experimentos realizados nos nossos dois cérebros (esquerdo e direito), que sugerem que são, em grande medida, iguais e separados.³³ As investigadoras Stella de Bode e Susan Curtiss estudaram quarenta e nove crianças que tiveram metade do seu cérebro removido para prevenir uma desordem convulsiva que ameaçava a sua vida.³⁴ A maioria dessas crianças posteriormente funcionou normalmente e, mesmo aquelas que continuaram a ter uma determinada desordem, apresentavam ainda assim uma personalidade razoavelmente normal. Embora tipicamente desenvolvamos a linguagem maioritariamente no lado esquerdo, ambos os hemisférios podem ser funcionalmente

equivalentes, e uma pessoa com um cérebro esquerdo ou direito pode dominar a linguagem.³⁵

Talvez o mais impressionante seja um cérebro que mantém os hemisférios esquerdo e direito intactos, mas cujo corpo caloso — os 200 milhões de axónios³⁶ que os conetam — foi cortado devido a um problema médico. Michael Gazzaniga (nascido em 1939) estudou estes casos, em que ambos os hemisférios cerebrais funcionam, mas não têm meios de comunicação entre si.³⁷ Através de uma série de experiências nas quais forneceu uma palavra apenas ao hemisfério direito de um paciente, descobriu que o hemisfério esquerdo, que não tinha consciência da palavra, sentia, ainda assim, a responsabilidade pelas escolhas baseadas nessa informação, apesar de a decisão ter sido realmente tomada pelo outro hemisfério.³⁸ O hemisfério esquerdo inventava, então, explicações plausíveis para justificar cada decisão, porque não reconhecia a presença de outro cérebro separado a partilhar o mesmo crânio.³⁹

Estas e outras experiências envolvendo ambos os hemisférios do cérebro sugerem que uma pessoa normal pode, na verdade, ter duas unidades cerebrais capazes de tomar decisões de forma independente, mas que, ainda assim, se enquadram numa única identidade consciente. Cada uma pensará que as decisões são suas e, como os dois cérebros estão intimamente interligados, parecerá ser assim para ambos.

Na verdade, se olharmos além dos nossos dois hemisférios cerebrais, existem muitos tipos de decisores dentro de nós que

poderiam ter um livre-arbítrio no sentido anteriormente descrito. Por exemplo, o neocórtex, onde ocorre a tomada de decisões, é constituído por muitos módulos mais pequenos.⁴⁰ Assim, quando consideramos uma decisão, é possível que diferentes opções sejam representadas por diferentes módulos, cada um tentando impor a sua própria perspectiva. O meu mentor, Marvin Minsky, foi visionário ao perceber o cérebro não como uma máquina de decisão unificada, mas sim como uma rede complexa de maquinaria neural cujas partes individuais podem favorecer opções diferentes quando ponderamos uma decisão. Minsky descreveu os nossos cérebros como uma “sociedade da mente” (o título do seu segundo livro), contendo vários processos mais simples que refletem muitas perspectivas diferentes.⁴¹ Cada um deles está a fazer uma escolha livre? Como poderíamos saber? Nas últimas décadas, houve mais apoio experimental para esta ideia — mas a nossa compreensão de como exatamente os processos neuronais “emergem” nas decisões que conscientemente percebemos ainda é bastante limitada.

5. O “Você 2” É Consciente. É Você?

Tudo isto levanta uma questão provocante. Se a consciência e a identidade puderem abranger várias estruturas distintas de processamento de informação dentro do crânio — mesmo aquelas que não estão fisicamente conetadas — o que acontece quando essas estruturas estão mais afastadas?

Uma questão fundamental que explorei em *Como Criar uma Mente* são as implicações filosóficas e morais de replicar toda a

informação presente num cérebro humano, algo que será possível durante o tempo de vida da maioria das pessoas vivas atualmente.

Imaginemos que utilizo tecnologia avançada para examinar uma parte do seu cérebro e faço uma cópia eletrónica exata desse pequeno segmento. (Na verdade, podemos realizar uma versão muito primitiva disto hoje em dia com certas partes do cérebro — por exemplo, ao tratar tremores essenciais ou a doença de Parkinson.)⁴² Por si só, este segmento é demasiado simples para ter consciência. Mas, suponhamos que copio uma segunda pequena parte do seu cérebro — e outra, e outra. Finalmente, no fim deste processo, tenho uma réplica informatizada completa do seu cérebro que contém toda a mesma informação e pode funcionar da mesma maneira.

Então, este "Você 2" é consciente? O "Você 2" dirá que teve todas as mesmas experiências que você (uma vez que está a partilhar as suas memórias) e agirá como você, pelo que, a menos que se exclua completamente a possibilidade de qualquer versão eletrónica de uma entidade consciente ser realmente consciente, a resposta seria sim. Simplificando, se um cérebro eletrónico representar a mesma informação que um cérebro biológico e afirmar ser consciente, não há base científica plausível para negar a sua consciência. Eticamente, deveríamos, então, tratá-lo como se fosse consciente e, portanto, possuidor de direitos morais. Contudo, isto não é especulação cega — o panprotopsiquismo dá-nos boas razões filosóficas para acreditar que este realmente é consciente.

Mas agora surge uma questão mais difícil: Esse “Você 2” é realmente *você*? Tenha em mente que “você” (como uma pessoa física normal) também ainda existe. Poderia até acontecer que esta cópia fosse feita sem que “Você” tivesse conhecimento disso, mas, independentemente disso, o “Você” essencial continuaria. Se o experimento fosse bem-sucedido, o “Você 2” agiria como *você*, mas “Você” não teria sido alterado de forma alguma, pelo que “Você” continuaria a ser *você*. Como o “Você 2” poderia agir de forma independente, divergiria imediatamente de “Você” — criando as suas próprias memórias e reagindo a experiências diferentes. Assim, na medida em que a sua identidade é a organização particular de informações no seu cérebro, o “Você 2” não seria *você*, mesmo que tivesse consciência.

Muito bem, até agora tudo certo. Agora, num segundo experimento, *substituímos* gradualmente cada parte do seu cérebro por uma cópia digital — conetada aos seus neurónios restantes através de uma interface cérebro-computador, como a descrita no capítulo anterior. Então, já não existem um “Você” e um “Você 2” — há apenas “Você”. Após cada fase deste experimento, fica satisfeito com o procedimento, e ninguém, incluindo *você* mesmo, sente necessidade de reclamar. O novo “você”, após cada substituição, continua a ser *você*? Mesmo no final, quando o seu cérebro é completamente digital?

A questão de como a identidade se relaciona com a substituição gradual das partes de um objeto ao longo do tempo remonta a um experimento de pensamento apresentado há cerca de 2.500 anos, chamado o Navio de Teseu.⁴³ Os filósofos gregos antigos

imaginaram um navio de madeira cujas tábuas eram substituídas gradualmente por novas tábuas, uma a uma. Parece bastante natural concluir que, após a substituição da primeira tábua, o navio ainda é o navio original. Pode ter uma composição ligeiramente diferente, mas continuamos a referir-nos a essa transformação como uma mudança no navio original e não como a criação de um novo navio. Mas o que acontece quando mais de metade das tábuas são novas? Ou quando todas as tábuas são novas e nenhuma fazia parte do navio quando foi construído? Isto torna-se mais complicado, mas muitas pessoas ainda diriam que a identidade fundamental do navio pode sobreviver a estas mudanças incrementais. No entanto, imagine que, à medida que as novas tábuas eram adicionadas, todas as tábuas antigas eram armazenadas num armazém. Agora, uma vez que o navio original possui 100 por cento de peças novas, reunimos todas as peças antigas do armazém para formar novamente um navio. Qual dos navios é o original? O que existiu continuamente com apenas mudanças incrementais, mas sem partes do original? Ou aquele que foi reconstruído a partir das partes originais?

O experimento do Navio de Teseu é um experimento de pensamento divertido quando se trata de navios ou outros objetos “mortos”, mas não tem consequências particularmente significativas. A identidade de navios ao longo do tempo é, em última análise, uma questão de convenção humana. Contudo, o problema assume uma importância suprema quando os objetos em questão são seres humanos. Para a maioria de nós, é extremamente importante saber se a pessoa ao nosso lado é

realmente o nosso ente querido ou apenas um “zombie” chalmersiano* a fazer uma imitação convincente.

Vamos considerar estas questões através da lente do “problema difícil” da consciência subjetiva. No cenário em que criamos o “Você 2” como uma réplica, é impossível determinar se o “eu” subjetivo de “Você 2” tem algum tipo de ligação com “Você”. A sua experiência subjetiva original englobaria de alguma forma ambas as cópias de você, mesmo enquanto os seus padrões de informação divergem ao longo do tempo devido a experiências diferentes? Ou o “Você 2” seria separado neste sentido? Estas são questões cientificamente irrespondíveis.

Porém, no cenário em que transferimos gradualmente as informações do seu cérebro para um substrato não biológico, temos razões muito mais fortes para acreditar que a sua consciência subjetiva seria preservada. De facto, como mencionado anteriormente, já fazemos isso de forma muito limitada com determinadas condições cerebrais atualmente, e a nova prótese neural é mais capaz do que a parte que substitui. (Assim, não é idêntica à parte que substitui.) Embora os dispositivos implantáveis iniciais, como os implantes cocleares, fossem capazes de estimular a atividade cerebral, não substituíam nenhuma estrutura cerebral central.⁴⁴ Mas, desde o início dos anos 2000, os cientistas têm

* “Chalmersiano”, expressão derivada do nome do filósofo australiano David Chalmers, e que se refere às teorias, especialmente no campo da filosofia, da mente e da consciência. Ele é conhecido por abordar o “problema difícil da consciência”, que trata da dificuldade de explicar por que os processos físicos no cérebro estão associados a experiências subjetivas. Chalmers defende que a consciência é uma propriedade fundamental do universo, não redutível a explicações puramente físicas.

desenvolvido próteses cerebrais que podem ajudar pessoas com danos estruturais ou disfunções no cérebro. Por exemplo, dispositivos protéticos já conseguem realizar parte do trabalho do hipocampo em pacientes com problemas de memória.⁴⁵ Estas tecnologias ainda estão na sua infância em 2023, mas durante esta década veremos estas tornarem-se mais sofisticadas e acessíveis a um número mais amplo de pacientes. No entanto, com a tecnologia atual, não há dúvida de que a identidade fundamental de uma pessoa é preservada, e ninguém argumenta que estes pacientes se tornaram “zombies” chalmersianos.

Tudo o que sabemos sobre neurociência sugere que, no cenário de substituição gradual, nem sequer notaríamos alterações suficientemente pequenas, e o cérebro é incrivelmente adaptável. O seu cérebro híbrido manteria todos os mesmos padrões de informação que lhe definem. Portanto, não há razão para acreditar que a sua consciência subjetiva seria comprometida e, claro, continuaria a ser *você* — não existe mais ninguém para lhe chamar de outra forma. No entanto, no final deste processo hipotético, o “você” final é exatamente como o “Você 2” no primeiro experimento, que decidimos que *não era você*. Como podemos conciliar isso? A diferença está na continuidade — o cérebro digital não diverge do biológico, pois nunca houve um momento em que existissem como entidades separadas.

Isto leva-nos a um terceiro caso, que, na verdade, não é hipotético. Todos os dias, as nossas próprias células passam por um processo de substituição muito rápido. Embora os neurónios geralmente permaneçam, cerca de metade das suas mitocôndrias

são renovadas num mês;⁴⁶ um neurotúbulo tem uma meia-vida de vários dias;⁴⁷ as proteínas que fornecem energia às sinapses são renovadas a cada dois a cinco dias;⁴⁸ os recetores NMDA nas sinapses são substituídos em questão de horas;⁴⁹ e os filamentos de actina nos dendritos duram cerca de quarenta segundos.⁵⁰ Assim, os nossos cérebros são quase completamente renovados em poucos meses, então, na verdade, você é uma versão biológica do “Você 2”, quando comparado consigo mesmo há pouco tempo. Mais uma vez, o que mantém a sua identidade intacta é a informação e a função — não qualquer estrutura ou material específico.

Durante anos, contemplei frequentemente o belo rio Charles perto da minha casa. Se eu olhar para o Charles hoje, tendo a considerá-lo o mesmo corpo de água que era há um dia ou há uma década, quando comentei sobre a continuidade do rio em *Como Criar uma Mente*. Isto deve-se ao facto de, embora todas as moléculas de água que passam por uma dada secção serem completamente diferentes a cada poucos milissegundos, essas moléculas agirem num padrão consistente que define o curso do rio. O mesmo acontece com as mentes. À medida que inserimos sistemas não biológicos nos nossos corpos e cérebros, a continuidade dos nossos padrões de informação fará com que cada um de nós se sinta como a pessoa que somos hoje — exceto pelo facto de que as nossas perceções podem ser melhores ou a nossa cognição mais inteligente.

É claro que a mesma tecnologia que nos permite transferir todas as nossas habilidades, personalidade e memórias para um meio digital também nos permitiria criar múltiplas cópias dessa

informação. Esta capacidade de nos duplicarmos à vontade é um superpoder no mundo digital que não existe no mundo biológico. Copiar os nossos ficheiros mentais para um sistema de armazenamento remoto será uma poderosa proteção contra qualquer acidente ou doença que possa danificar o nosso cérebro. Isto não é “imortalidade”, da mesma forma que as folhas de cálculo Excel carregadas na nuvem não são imortais — desastres ainda podem atingir os centros de dados e destruí-los. Mas permitirá proteger-nos contra os acidentes sem sentido que interrompem tantas vidas e identidades. E a minha interpretação do panprotopsiquismo sugere que a nossa consciência subjetiva pode, de alguma forma, abranger todas as cópias desta informação definidora.

Isto tem outra implicação tentadora. Se libertarmos um “Você 2” no mundo — livre para seguir um caminho diferente de “Você” — a sua identidade-padrão de informação divergir-se-ia, mas, uma vez que isso seria um processo gradual e contínuo, existe a possibilidade de que a sua consciência subjetiva possa abranger ambas simultaneamente. Suspeito que, com base na teoria do panprotopsiquismo, a nossa consciência subjetiva está ligada à informação-como-identidade e, assim, englobaria todas as cópias de informação que foram uma vez idênticas às nossas.

No entanto, porque neste cenário o “Você 2” poderia potencialmente insistir apaixonadamente que tem uma consciência subjetiva diferente de “Você” (uma vez que as estruturas físicas de tomada de decisão que governam a comunicação seriam separadas), e não haveria maneira de determinar objetivamente a

verdade, os nossos sistemas legais e éticos provavelmente teriam de tratar ambos como entidades separadas.

6. A Incrível Improbabilidade de Existir

Ao procurarmos compreender a nossa identidade, é absolutamente impressionante considerar a extraordinária cadeia de acontecimentos improváveis que permitiu que cada um de nós viesse a existir. Não só foi necessário que os seus pais se conhecessem e decidissem ter um filho, como também foi indispensável que o espermatozoide exato encontrasse o óvulo exato para que *você* fosse gerado. É difícil estimar a probabilidade de a sua mãe e o seu pai terem-se encontrado e decidido ter um filho, mas apenas em termos do espermatozoide e do óvulo, a probabilidade de que você surgisse era de uma em dois milhões de biliões. Como estimativas muito aproximadas, o homem médio produz até dois biliões de espermatozoides ao longo da vida, e a mulher média começa com cerca de um milhão de óvulos⁵¹. Assim, na medida em que a sua identidade depende do espermatozoide e do óvulo exatos que lhe deram origem, as probabilidades de tal ter acontecido eram de cerca de uma em dois triliões. Embora nem todas estas células sexuais sejam geneticamente únicas, diversos fatores — como a idade — podem afetar a epigenética, pelo que, mesmo que o seu pai tivesse produzido dois espermatozoides cromossomicamente idênticos aos vinte e cinco e aos quarenta e cinco anos, estes não teriam contribuído de forma exatamente igual para a formação de um bebé⁵². Assim, por aproximação, devemos considerar cada espermatozoide e cada óvulo como efetivamente únicos. Para além disso, um acontecimento comparável teve de

ocorrer com os *dois* conjuntos de avós, os *quatro* conjuntos de bisavós, os *oito* conjuntos de trisavós, e assim por diante... bem, não propriamente ad infinitum — apenas até ao início da vida na Terra, há cerca de quatro mil milhões de anos⁵³.

Um googol (a grafia correta do número que está na origem do nome da empresa de pesquisa) é um 1 seguido de 100 zeros. Um googolplex é um 1 seguido de um googol de zeros. Trata-se de um número inimaginavelmente grande, mas, com base na análise aproximada descrita anteriormente (e explicada com mais detalhe nas notas finais), a probabilidade de que você viesse a existir é de 1 em um número constituído por um 1 seguido de muito mais do que um googolplex de zeros⁵⁴. E, no entanto, aqui está você. É um milagre, não é?

Para além disso, o facto de o universo ter surgido com a capacidade de evoluir informação complexa é, arguivelmente, ainda mais improvável, ou seja, o universo não se limita a ser matéria e energia, mas também é informação que se organiza e se desenvolve ao longo do tempo. Desde o início, o universo começou a criar estruturas cada vez mais complexas, capazes de processar, armazenar e transmitir informação — como a vida e a consciência. A nossa compreensão da física e da cosmologia demonstra que, se os valores constantes nas leis da física tivessem sido apenas ligeiramente diferentes, o universo não teria sido capaz de sustentar a vida⁵⁵. Por outras palavras, de todas as configurações que o universo poderia teoricamente ter tido, apenas uma ínfima fração teria permitido a nossa existência. A forma mais próxima que temos de quantificar esta improbabilidade aparente consiste em

identificar os diferentes fatores de que depende um universo compatível com a vida e, depois, estimar até que ponto esses valores teriam de ter sido diferentes para que a vida se tornasse impossível.

Segundo o Modelo Padrão da física de partículas, existem trinta e sete tipos de partículas elementares (diferenciadas pela massa, carga e spin), que interagem de acordo com quatro forças fundamentais: gravidade, eletromagnetismo, força nuclear forte e força nuclear fraca. Para além destas, há ainda os gravitões — partículas hipotéticas que alguns cientistas acreditam ser responsáveis pelos efeitos gravitacionais⁵⁶. A intensidade com que estas forças interagem com as partículas é descrita por um conjunto de constantes, que definem as “regras” da física. Os físicos identificaram várias situações em que alterações mínimas a estas regras teriam impedido a formação de vida inteligente, a qual se pressupõe que exige uma química complexa e ambientes relativamente estáveis, com fontes de energia duradouras ao longo de centenas de milhões ou até milhares de milhões de anos de evolução. A visão predominante entre os biólogos é que a vida surgiu na Terra por via da abiogénese.⁵⁷ De acordo com esta teoria, ao longo de um extenso período de tempo, a matéria não viva, presente numa “sopa primordial” de compostos precursores, combinou-se naturalmente em blocos estruturais mais complexos que possibilitaram a formação de proteínas essenciais à vida. Eventualmente, estas proteínas ter-se-ão organizado espontaneamente num padrão capaz de se auto-replicar: o surgimento da vida. Bastaria uma única quebra nesta cadeia causal para tornar a existência da humanidade impossível.

Se a força nuclear forte tivesse sido mais forte ou mais fraca, teria sido impossível para as estrelas formarem as grandes quantidades de carbono e oxigénio a partir das quais a vida é criada.⁵⁸ Da mesma forma, a força nuclear fraca está dentro de uma ordem de grandeza do mínimo possível para que a vida evolua.⁵⁹ Se fosse mais fraca do que isto, o hidrogénio teria rapidamente sido transformado em hélio, impedindo a formação de estrelas de hidrogénio como a nossa, que queimam tempo suficiente para permitir que a vida complexa evolua nos seus sistemas solares.

Se a diferença de massa entre os quarks up e down tivesse sido ligeiramente menor ou maior, os prótons e neutrões seriam instáveis, impedindo a formação de matéria complexa.⁶⁰ Da mesma forma, se os eletrões tivessem uma massa ligeiramente superior em relação a essas diferenças, resultaria uma instabilidade semelhante.⁶¹ De acordo com o físico Craig J. Hogan, “bastaria uma pequena alteração fracionária de alguns por cento na diferença de massa dos quarks, em qualquer direção”, para que a vida não tivesse surgido.⁶² Se a diferença de massa dos quarks fosse maior, teríamos um “mundo de prótons” — um universo alternativo onde apenas átomos de hidrogénio seriam possíveis.⁶³ Se a diferença fosse menor, teríamos um “mundo de neutrões” — um universo com núcleos, mas sem eletrões à sua volta, tornando a química impossível.⁶⁴

Se a gravidade tivesse sido ligeiramente mais fraca, não haveria supernovas, que são a fonte dos elementos pesados a partir dos quais a vida se forma.⁶⁵ Se a gravidade tivesse sido ligeiramente mais forte, as estrelas teriam uma vida muito mais curta, tornando

impossível sustentar vida complexa.⁶⁶ No primeiro segundo após o Big Bang, o parâmetro de densidade (conhecido como Ω , ou ómega) não poderia ter sido diferente por mais de uma parte em um quatrilhão e ainda assim permitido a formação de vida.⁶⁷ Se tivesse sido ligeiramente maior, a matéria dispersa pelo Big Bang teria colapsado novamente sob a gravidade antes que as estrelas pudessem formar-se. Se tivesse sido ligeiramente menor, a expansão teria sido rápida demais para que a matéria se agrupasse em estrelas logo de início.

Além disso, a macroestrutura do universo surgiu a partir de minúsculas flutuações locais na densidade da matéria que se expandia a partir do Big Bang, no primeiro instante após o evento.⁶⁸ A densidade, em qualquer ponto, diferia em média do valor médio por cerca de uma parte em 100.000.⁶⁹ Se esta amplitude (frequentemente comparada a ondulações num lago) tivesse variado mais do que uma ordem de grandeza, a vida não teria sido possível. Segundo o cosmólogo Martin Rees, se as ondulações tivessem sido demasiado pequenas, “o gás nunca se condensaria em estruturas gravitacionalmente ligadas, e um tal universo permaneceria para sempre escuro e sem traços distintivos.”⁷⁰ Em contraste, se as ondulações tivessem sido demasiado grandes, o universo teria sido um “lugar turbulento e violento”, com a maior parte da matéria a colapsar em enormes buracos negros e sem qualquer hipótese de as estrelas “manterem sistemas planetários estáveis.”⁷¹

Para que o universo produzisse matéria organizada em vez de um caldo caótico, teria também de possuir uma entropia muito

baixa imediatamente após o Big Bang. Segundo o físico Roger Penrose, com base no que sabemos sobre entropia e aleatoriedade, apenas aproximadamente uma em $10^{10^{123}}$ possíveis configurações de universo teria tido uma entropia inicial suficientemente baixa, no momento da origem, para evoluir numa forma semelhante à do nosso universo.⁷² Isto equivale a um 10 seguido de incomensuravelmente mais zeros do que o número total de átomos no universo conhecido. (As estimativas colocam geralmente o número de átomos entre 10^{78} e 10^{82} . Assumindo o valor de 10^{80} , o número de dígitos em $10^{10^{123}}$ é, então, quarenta e três ordens de magnitude superior ao número total de átomos. Ou seja, é dez milhões de bilhões de bilhões de bilhões de bilhões de vezes maior.)⁷³

É certo que se pode questionar muitos destes cálculos individuais, e os cientistas por vezes discordam quanto às implicações de um ou outro factor isolado. No entanto, não basta analisar cada um destes parâmetros afinados de forma isolada. Pelo contrário, como argumenta o físico Luke Barnes, é necessário considerar a “interseção das regiões compatíveis com a vida, e não a união”.⁷⁴ Ou seja, todos e cada um destes fatores têm de ser favoráveis à vida para que esta possa, de facto, surgir. Se até mesmo um único deles estivesse ausente ou fora dos parâmetros adequados, a vida não teria sido possível. Na formulação memorável do astrónomo Hugh Ross, a probabilidade de todo este ajuste fino ter ocorrido por mero acaso é comparável à “possibilidade de um avião Boeing 747 ficar completamente montado como resultado de um tornado a passar por um ferro-velho”.⁷⁵

A explicação mais comum para esta aparente afinação precisa (fine-tuning) afirma que a probabilidade extremamente baixa de vivermos num universo com estas características é justificada por um viés de seleção do observador.⁷⁶ Ou seja, para estarmos sequer a considerar esta questão, teríamos de habitar um universo afinado para permitir a vida — se assim não fosse, não estaríamos conscientes, nem seríamos capazes de refletir sobre esse facto. Esta ideia é conhecida como o princípio antrópico. Alguns cientistas acreditam que esta explicação é suficiente. No entanto, se aceitarmos que a realidade existe independentemente de nós, enquanto observadores, esta resposta não é totalmente satisfatória. Martin Rees coloca uma questão pertinente que ainda poderíamos levantar. Como ele diz: “Suponha que está diante de um pelotão de fuzilamento, e todos falham o tiro. Poderia dizer: ‘Bem, se não tivessem todos falhado, eu não estaria aqui para me preocupar com isso.’ Mas continua a ser algo surpreendente, algo que não se explica facilmente. Creio que há aí algo que precisa de ser explicado.”⁷⁷

7. Depois da Vida

O primeiro passo no caminho para preservar a nossa identidade — tão preciosa quanto improvável — é salvaguardar as ideias que estão no cerne daquilo que somos. Já estamos, através das nossas atividades digitais, a criar registos extraordinariamente ricos sobre a forma como pensamos e o que sentimos, e durante esta década, as nossas tecnologias de registo, armazenamento e organização dessa informação irão evoluir rapidamente. À medida que nos aproximarmos do final da década de 2020, começaremos a animar

esses dados sob a forma de simulações não biológicas — recriações altamente realistas de seres humanos com personalidades específicas.⁷⁸ Mesmo já em 2023, porém, a inteligência artificial está a ganhar rapidamente proficiência na imitação do comportamento humano. Abordagens baseadas em aprendizagem profunda, como os transformers e as GANs (Generative Adversarial Networks ou Redes Adversariais Generativas), têm impulsionado progressos notáveis. Os transformers, como descrito no capítulo anterior, podem ser treinados com textos escritos por uma pessoa e aprender a imitar de forma realista o seu estilo de comunicação.

Por sua vez, uma GAN envolve duas redes neurais que competem entre si. A primeira tenta gerar um exemplo de uma determinada categoria — por exemplo, uma imagem realista do rosto de uma mulher. A segunda tenta discriminar entre essa imagem gerada e outras imagens reais de rostos femininos. A primeira é recompensada (pense-se nisto como um sistema de pontuação que a rede neuronal está programada para tentar maximizar) por conseguir enganar a segunda, e a segunda é recompensada pela precisão dos seus juízos. Este processo pode repetir-se inúmeras vezes sem supervisão humana, com ambas as redes a aumentarem gradualmente a sua proficiência.

Ao combinar estas técnicas, a IA já consegue imitar o estilo de escrita de uma pessoa específica, replicar a sua voz ou até enxertar realisticamente o seu rosto num vídeo completo. Como referido no capítulo anterior, a tecnologia experimental Duplex da Google utiliza IA capaz de reagir de forma credível em conversas telefónicas não roteirizadas — com tal sucesso que, quando foi testada pela

primeira vez em 2018, os humanos reais que receberam as chamadas nem sequer se aperceberam de que estavam a falar com um computador.⁷⁹ Vídeos “deepfake” podem ser usados para criar propaganda política nociva, ou para imaginar como seriam certos filmes com outros atores em papéis icónicos.⁸⁰ Por exemplo, um canal do YouTube chamado Ctrl Shift Face tem um vídeo viral que mostra como seria a personagem de Javier Bardem em *Este País Não É Para Velhos* se fosse interpretada por Arnold Schwarzenegger, Willem Dafoe ou Leonardo DiCaprio.⁸¹ Estas tecnologias ainda estão na sua infância. Não só cada uma destas capacidades individuais (como a escrita, a voz, o rosto, a conversação) irá melhorar significativamente nos próximos anos, como a sua convergência criará simulações mais realistas do que a simples soma das suas partes.

Um tipo de avatar de IA que podemos criar, chamado de “replicante” (tomando emprestado o termo do filme *Blade Runner*), terá a aparência, o comportamento, as memórias e as competências de uma pessoa que já faleceu, continuando a existir num fenómeno a que chamo After Life (Vida Após).

A tecnologia After Life passará por várias fases. As simulações mais primitivas deste tipo já existem há cerca de sete anos, à data em que escrevo isto. Em 2016, a revista *The Verge* publicou um artigo notável sobre uma jovem chamada Eugenia Kuyda, que usou IA e mensagens de texto guardadas para “ressuscitar” o seu melhor amigo falecido, Roman Mazurenko.⁸² À medida que a quantidade de dados que cada um de nós gera aumenta, tornar-se-á possível criar recriações cada vez mais fiéis de seres humanos específicos.

Durante o final da década de 2020, a IA avançada será capaz de criar um replicante extremamente realista, com base em milhares de fotografias, centenas de horas de vídeo, milhões de palavras em conversas escritas, dados detalhados sobre os interesses e hábitos da pessoa, e entrevistas com pessoas que a conheceram. As reações a isto serão mistas, por razões culturais, éticas ou pessoais, mas a tecnologia estará disponível para quem a desejar.

Esta geração de avatares After Life será bastante realista, mas para muitos irão situar-se no chamado “vale da estranheza” (uncanny valley)⁸³, o que significa que o seu comportamento terá uma semelhança distinta com a pessoa original, mas apresentará diferenças subtis que os tornarão desconcertantes para os entes queridos dessa pessoa. Nesta fase, estas simulações não serão um “Você 2”. Apenas recriarão a função — não a forma — da informação que existia no cérebro da pessoa. Por essa razão, uma perspectiva panprotopsiquista sugere que estas simulações não reviveriam a consciência subjetiva de alguém. Apesar disso, muitas pessoas considerá-las-ão ferramentas valiosas para continuar trabalhos importantes, partilhar memórias preciosas ou ajudar membros da família a curar-se.

Os corpos replicantes existirão sobretudo em realidades virtual e aumentada, mas também serão possíveis corpos realistas na realidade física (isto é, andróides convincentes), através da nanotecnologia das décadas finais de 2030. O progresso nesta direção ainda se encontra numa fase muito inicial em 2023, mas já existe investigação significativa a decorrer que lançará as bases para avanços muito maiores na próxima década. No que toca à

funcionalidade dos andróides, o progresso tecnológico depara-se com um desafio identificado há várias décadas pelo meu amigo Hans Moravec, agora conhecido como o paradoxo de Moravec.⁸⁴ Em resumo, tarefas mentais que nos parecem difíceis — como calcular raízes quadradas de números grandes ou memorizar grandes volumes de informação — são relativamente fáceis para os computadores. Por outro lado, tarefas mentais que para nós são praticamente automáticas — como reconhecer um rosto ou manter o equilíbrio ao caminhar — são muito mais difíceis para a IA. A razão provável é que estas últimas funções evoluíram ao longo de dezenas ou centenas de milhões de anos e operam nos bastidores do nosso cérebro, enquanto que a cognição “superior” é alimentada pelo neocórtex, o centro da nossa consciência, que só atingiu a sua forma aproximadamente moderna há algumas centenas de milhares de anos.⁸⁵

À medida que a IA se tornou exponencialmente mais poderosa nos últimos anos, tem conseguido avanços notáveis em relação ao paradoxo de Moravec. Em 2000, o robô humanóide ASIMO, da Honda, impressionou os especialistas ao conseguir simplesmente caminhar sobre uma superfície plana sem cair.⁸⁶ Já em 2020, o robô Atlas, da Boston Dynamics, era capaz de correr, saltar e executar acrobacias num percurso de obstáculos com maior agilidade do que a maioria dos humanos.⁸⁷ Robôs sociais como Sophia e Little Sophia, da Hanson Robotics, e Ameca, da Engineered Arts, conseguem expressar emoções em rostos com aparência humana.⁸⁸ Embora as suas capacidades tenham sido por vezes exageradas nas manchetes, não deixam de revelar a direção do progresso.

À medida que a tecnologia avança, um replicante (assim como aqueles de nós que ainda não morreram) terá à disposição uma variedade de corpos e tipos de corpos por onde escolher. Eventualmente, os replicantes poderão até habitar corpos biológicos ciberneticamente aumentados, cultivados a partir do ADN da pessoa original (assumindo que este possa ser encontrado). E, quando a nanotecnologia permitir a engenharia à escala molecular, seremos capazes de criar corpos artificiais muito mais avançados do que aquilo que a biologia permite. Nessa altura, é provável que as pessoas reanimadas ultrapassem o chamado *uncanny valley* (*vale da estranheza*), pelo menos para muitos dos que com elas interagirem.

No entanto, tais replicantes levantarão questões filosóficas profundamente complexas para a sociedade. A forma como cada um responde a essas questões poderá depender das suas crenças metafísicas sobre conceitos como alma, consciência e identidade. Se uma pessoa reanimada através desta tecnologia “parecer sentir-se” como um ente querido perdido, será isso suficiente? E até que ponto importa se esse replicante foi criado com recurso a IA e mineração de dados, em vez de a partir de uma cópia integral da mente — um “Você 2” — carregada diretamente do cérebro de alguém ainda vivo? Como mostra a história de Eugenia Kuyda e Roman Mazurenko, até mesmo um replicante criado pelo primeiro método pode ser uma fonte de consolo e cura. Ainda assim, é difícil saber com certeza como cada um de nós reagirá ao viver essa experiência pela primeira vez. À medida que esta tecnologia se tornar mais comum, a sociedade adaptar-se-á. Provavelmente surgirão leis para regular quem pode criar replicantes de pessoas

falecidas e de que forma estes podem ser utilizados. Algumas pessoas poderão proibir a IA de os replicar, enquanto outras deixarão instruções detalhadas sobre os seus desejos — podendo até participar activamente na criação do seu próprio replicante ainda em vida.

A introdução dos replicantes trará consigo muitas outras questões sociais e legais desafiantes:

- São eles responsáveis por contratos assinados ou crimes cometidos anteriormente pela pessoa que estão a replicar?
- Podem reivindicar o mérito pelo trabalho ou pelas contribuições sociais da pessoa que estão a substituir?
- Será necessário voltar a casar com o cônjuge falecido que regressa sob a forma de replicante?
- Os replicantes serão ostracizados ou alvo de discriminação?
- Em que condições deverá a criação de replicantes ser restringida ou proibida?

Os replicantes também forçarão as pessoas comuns a confrontarem-se seriamente com os enigmas filosóficos da consciência e da identidade explorados neste capítulo — questões que até aqui eram, em grande parte, meramente teóricas.

Provavelmente num intervalo de tempo mais curto do que aquele que separa a publicação de *Como Criar uma Mente* (em 2012) da leitura deste livro, existirão IAs com nível de Turing programadas para recriar seres humanos já falecidos. Com uma cognição tão complexa quanto a de uma pessoa biológica natural, essas entidades serão, de facto, conscientes — e acreditarão que são essa pessoa. Mas será que o simples facto de acreditarem que são a mesma pessoa significa que o são realmente? Quem poderia afirmar o contrário?

No início da década de 2040, os nanobots poderão entrar no cérebro de uma pessoa viva e fazer uma cópia de todos os dados que formam as suas memórias e personalidade: um “Você 2”. Tal entidade seria capaz de passar um teste de Turing personalizado e convencer alguém que conhecia bem a pessoa original de que ela é mesmo essa pessoa. De acordo com todas as evidências detetáveis, parecerá tão real quanto o indivíduo original, pelo que, se acreditar que a identidade se baseia fundamentalmente em informação — como as memórias e a personalidade — então sim, esse Você 2 seria a mesma pessoa. Poderia ter ou continuar uma relação com essa pessoa, até mesmo física, incluindo relações sexuais. Poderão existir pequenas diferenças subtis, mas isso não é diferente daquilo que acontece com os seres humanos biológicos? Nós também mudamos — normalmente de forma gradual, mas por vezes de modo abrupto, como consequência da guerra, do trauma ou de mudanças no estatuto ou nas relações.

Uma compreensão da consciência ao estilo de Chalmers dá-nos boas razões para suspeitar que este nível de tecnologia também

permitirá que o nosso eu subjetivo persista na Vida Após a Morte — mas lembre-se de que isto é impossível de provar ou refutar cientificamente, e cada um de nós terá de tomar decisões sobre o uso desta tecnologia com base nos nossos próprios valores filosóficos ou espirituais. Na fase em que se copia diretamente o conteúdo de cérebros vivos para suportes não biológicos, passamos dos meros replicantes simulados que descrevi para o verdadeiro carregamento mental, também conhecido como emulação total do cérebro, ou WBE (whole-brain emulation).

Simular uma mente num suporte não biológico pode significar coisas bastante diferentes em termos computacionais. Em 2008, John Fiala, Anders Sandberg e Nick Bostrom identificaram onze níveis diferentes de possível emulação cerebral.⁸⁹ Mas, para simplificar aqui, as emulações cerebrais dividem-se aproximadamente em cinco categorias, indo da mais abstrata à mais exaustiva: funcional, conectómica, celular, biomolecular e quântica.

Emulações funcionais são aquelas que agiriam como uma mente com base biológica, mas que não necessitam replicar qualquer estrutura computacional específica do cérebro de uma determinada pessoa. Estas seriam as mais fáceis de processar computacionalmente, mas ofereceriam a simulação menos completa do original. As emulações conectómicas replicariam as conexões hierárquicas e as relações lógicas entre grupos de neurónios, mas sem a necessidade de modelar cada célula individual. As emulações celulares simulam informação-chave sobre cada neurónio no cérebro, mas não simulam as forças físicas

detalhadas no seu interior. As emulações biomoleculares modelariam interações entre proteínas e forças dinâmicas minúsculas dentro de cada célula. E a emulação quântica capturaria efeitos subatômicos dentro e entre as moléculas. Esta seria a solução teoricamente mais completa, mas exigiria um poder computacional astronómico que, provavelmente, só estará disponível no próximo século.⁹⁰

Um dos grandes projetos de investigação das próximas duas décadas será descobrir qual o nível de emulação cerebral que é suficiente. Muitos dos que acreditam que a emulação ao nível quântico é necessária assumem essa posição porque acreditam que a consciência subjetiva assenta em efeitos quânticos (ainda desconhecidos). Como argumento neste capítulo (e desenvolvo mais em *Como Criar uma Mente*), penso que esse nível de emulação será desnecessário. Se algo como o panprotopsiquismo estiver correto, então a consciência subjetiva provavelmente decorre da forma complexa como a informação é organizada pelos nossos cérebros, pelo que não precisamos de nos preocupar se a nossa emulação digital não incluir determinada molécula proteica do original biológico. Por analogia, não importa se os seus ficheiros JPEG estão guardados numa disquete, num CD-ROM ou numa pen USB — eles têm o mesmo aspeto e funcionam da mesma forma, desde que a informação esteja representada com a mesma sequência de 1s e 0s. Na verdade, se copiar esses dígitos à mão com lápis e papel e enviar a (muito grande!) pilha de folhas a um amigo, e ele introduzir manualmente os dígitos noutra computador, a imagem reaparecerá intacta!

Portanto, a partir daqui, o objetivo prático é descobrir como fazer com que os computadores se conectem eficazmente com o cérebro e decifrar o código de como o cérebro representa a informação. (Para uma exploração mais aprofundada sobre o progresso rumo à transferência da mente, as dimensões computacionais da emulação cerebral e até uma tecnologia proposta chamada cérebros Matrioshka, que poderá um dia permitir à humanidade aproveitar quantidades massivas de energia para computação, vê esta nota final com uma variedade de recursos que vão desde os mais acessíveis aos mais técnicos.)⁹¹

Estes são desafios impressionantes, mas as ferramentas de IA sobre-humana da década de 2030 permitir-nos-ão alcançar o que hoje pode parecer inalcançável.

A FALAR COM O MEU BOT-PAI

O Talk to Books foi uma excelente geradora de ideias. Na Google, podíamos substituir os seus 100.000 livros padrão por qualquer seleção personalizada de livros e documentos. Então, em 2019, juntei tudo o que o meu pai, Fredric Kurzweil, tinha escrito — todas as suas cartas de amor para a minha mãe, notas de curso, um livro sobre música que ele estava a escrever, e as suas reflexões pessoais. A minha filha, Amy, então fez as mesmas perguntas utilizando a tecnologia subjacente que alimentava o Talk to Books, com os escritos dele como material de origem. Como verá na nossa conversa muito curta a seguir, este replicante conseguiu dar respostas coerentes, naturais e surpreendentes às nossas perguntas

— provavelmente de tal forma que, se eu tivesse dito que esta tinha sido uma conversa com o meu pai enquanto ele ainda estava vivo, você não teria notado nada de estranho. Para mim e para as pessoas que o conheciam, estas palavras têm um toque adicional de familiaridade, no que diz respeito à maneira como Fredric Kurzweil pensava e comunicava.

Também estou a planear criar um replicante de mim mesmo. Ele terá acesso a milhares de páginas das minhas comunicações, bem como a todos os meus escritos publicados e incontáveis horas de vídeos. Esta base de multimédia rica permitirá que o meu replicante represente a minha personalidade de forma muito mais profunda e fiel do que o do meu pai. Os futuros replicantes de IA também terão acesso a todo tipo de metadados sobre a vida de uma pessoa, permitindo uma fidelidade ainda maior.

Aqui estão algumas das suas respostas às nossas perguntas. Este é o primeiro passo para trazer o meu pai de volta.

O QUE MAIS AMAS NA MÚSICA?

O que torna uma peça de música tão viva é o facto de ela adaptar um plano geral às suas próprias necessidades. A arte da música percorreu um longo caminho e sempre manteve uma ligação com os sentimentos humanos.

QUAL É O TEU COMPOSITOR FAVORITO E POR QUÊ?

Brahms, na sua composição, tira a sua inspiração de Beethoven.

QUAL É A ESSÊNCIA DA MÚSICA ROCK AND ROLL?

A melodia e o ritmo são as fontes primárias da música. Os princípios básicos ou leis da estrutura são repetição e contraste, unidade e variedade.

COMO COMEÇASTE A ENVOLVER-TE NA DIREÇÃO DE ORQUESTRAS?

Durante mais de vinte anos dirigi orquestras de vários tipos — profissionais, amadoras, de colégios, universidades, comunidades e também orquestras de ópera. Dirigi grandes orquestras sinfónicas, orquestras de câmara, bem como grupos juvenis. Dei aulas em muitas universidades.

COMO GOSTARIAS DE SER LEMBRADO?

É claro que é difícil elogiar-se a si próprio, mas gostaria de dizer que a minha capacidade de me relacionar e lidar com as pessoas sempre foi um dos meus pontos fortes, percebendo que não é apenas a habilidade artística que conta, mas também relações pessoais amigáveis.

TENS ALGUM ARREPENDIMENTO?

Parece ser o meu destino passar os dias com intermináveis lições e trabalhos de pouco interesse para poder, ainda que por pouco tempo, dedicar-me a um trabalho de verdadeiro valor. Sou culpado por deixar que as minhas esperanças e boa vontade se sobreponham ao meu julgamento prático. Bem, com a nova responsabilidade e também a tentativa de manter a minha orquestra unida, é muito difícil equilibrar as contas.

O QUE TORNA UMA PESSOA AQUILO QUE ELA É?

Forma manifesta na relação entre as partes e o todo.

TENS ALGUM PASSATEMPO?

Esperamos uma excelente colheita de pêssegos e uvas. Adoro jardinagem e é algo relaxante para mim, mas concordo contigo que dá muito trabalho. É o tipo de trabalho que nunca tem fim.

TENS ALGUMA ANSIEDADE?

Frequentemente, são como pesadelos.

O QUE PENSAS SOBRE A TECNOLOGIA MODERNA?

Vemos sempre os inovadores condenados pelos seus contemporâneos. O progresso da tecnologia, da automação, etc., tornou o indivíduo pequeno. Os ideais e valores de outrora foram destruídos por esta Era da máquina.

PODES CONTAR-ME UMA HISTÓRIA SOBRE UM ACIDENTE DE CARRO?

Estava em Mobile a dirigir uma ópera, quando a minha esposa sofreu um grave acidente de carro. Foi atropelada por um táxi, ficou presa contra um camião, sofreu ferimentos graves com múltiplas fraturas, esteve mais de dois meses no hospital em tração e encontra-se neste momento em casa com um gesso corporal completo, no qual só pode estar deitada de costas, completamente incapaz. Terá de permanecer neste estado por bastante tempo.

QUAL É O SIGNIFICADO DA VIDA?

Amor.

8. Quem Posso Ser

As nossas questões de identidade estão intimamente interligadas com temas como a consciência, o livre-arbítrio e o determinismo. À luz destas ideias, poderia dizer que esta pessoa em particular — Ray Kurzweil — é simultaneamente o resultado de condições anteriores incrivelmente precisas e o produto das minhas próprias escolhas. Enquanto padrão de informação automodificável, moldei certamente a minha identidade ao longo da vida através das decisões que tomei sobre com quem interagir, o que ler e para onde ir.

Contudo, apesar da responsabilidade que tenho na construção de quem sou, a minha autorrealização é limitada por muitos fatores que escapam ao meu controlo. O meu cérebro biológico evoluiu para um estilo de vida pré-histórico muito diferente e predispõe-me a hábitos que preferiria não ter. Não consegue aprender com a rapidez necessária, nem lembrar-se com a precisão que eu desejaria para saber tudo aquilo que gostaria de saber. Não posso reprogramá-lo para me libertar de medos, traumas e dúvidas que sei estarem a impedir-me de alcançar aquilo que quero atingir. E o meu cérebro habita um corpo que envelhece gradualmente — embora eu me esforce bastante por abrandar esse processo — e que está biologicamente programado para, inevitavelmente, destruir o padrão de informação que é Ray Kurzweil.

A promessa da Singularidade é libertar-nos de todas essas limitações. Durante milhares de anos, os seres humanos têm vindo gradualmente a conquistar um maior controlo sobre aquilo em que

podem tornar-se. A medicina permitiu-nos superar lesões e incapacidades. A cosmética possibilitou-nos moldar a nossa aparência de acordo com os nossos gostos pessoais. Muitas pessoas recorrem a drogas legais ou ilegais para corrigir desequilíbrios psicológicos ou para experimentar outros estados de consciência. O acesso mais alargado à informação permite-nos alimentar a mente e formar hábitos mentais que reestruturam fisicamente o cérebro. A arte e a literatura inspiram empatia por tipos de pessoas que nunca conhecemos e podem ajudar-nos a crescer em virtude. Aplicações móveis modernas podem ser usadas para desenvolver disciplina e cultivar estilos de vida mais saudáveis. As pessoas transgénero têm hoje uma capacidade sem precedentes de adequar os seus corpos físicos à identidade de género que sentem interiormente. Imagine o quanto mais poderemos moldar-nos a nós próprios quando pudermos programar o nosso cérebro diretamente.

Assim, a fusão com a inteligência artificial superinteligente será uma realização digna, mas constitui apenas um meio para um fim mais elevado. Uma vez que os nossos cérebros estejam preservados num substrato digital mais avançado, o nosso poder de automodificação poderá ser plenamente concretizado. Os nossos comportamentos poderão alinhar-se com os nossos valores, e as nossas vidas deixarão de ser marcadas e encurtadas pelas falhas da biologia. Finalmente, os seres humanos poderão ser verdadeiramente responsáveis por quem são.⁹²

CAPÍTULO 4

A Vida está a Ficar Exponencialmente Melhor

1. O Consenso Público é o Oposto

"Considere esta notícia de última hora: A POBREZA EXTREMA NO MUNDO CAIU 0,01% HOJE!¹

E esta também: DESDE ONTEM, A TAXA DE LITERACIA AUMENTOU 0,0008%!²

E ainda esta: A PROPORÇÃO DE LARES COM SANITÁRIOS COM DESCARGA CRESCEU HOJE 0,003%!³

E o mesmo aconteceu ontem.

E anteontem também.

Se estes avanços não lhe parecem entusiasmantes, isso já constitui pelo menos uma razão para não ter ouvido falar deles.

Sinais como estes de progresso — e muitos outros semelhantes — não chegam às manchetes porque, na verdade, não são

propriamente novidade. Tendências positivas, dia após dia, têm vindo a progredir ao longo de anos e, a ritmos mais lentos, ao longo de décadas e até séculos.

Quanto aos exemplos que acabei de referir, entre 2016 e 2019 — o período mais recente para o qual existem dados abrangentes disponíveis no momento em que este texto foi escrito —, estima-se que o número de pessoas em pobreza extrema a nível mundial (medido com base no critério de viver com menos de 2,15 dólares por dia, a preços de 2017) tenha diminuído de cerca de 787 milhões para 697 milhões.⁴ Se essa tendência se tiver mantido de forma aproximada até ao presente, em termos de declínio percentual anual, isso corresponde a uma queda de quase 4% por ano, ou cerca de 0,011% por dia. Apesar de haver alguma incerteza quanto ao número exato, podemos estar razoavelmente confiantes de que os valores estão corretos dentro de uma ordem de grandeza. Entretanto, a UNESCO verificou que, entre 2015 e 2020 (mais uma vez, o período com dados mais recentes), a taxa de literacia mundial subiu de aproximadamente 85,5% para 86,8%.⁵ Isso corresponde a uma média de cerca de 0,0008% por dia. E durante o mesmo intervalo de 2015 a 2020, a proporção da população mundial com acesso a instalações sanitárias “básicas” ou “geridas de forma segura” (como sanitas com descarga ou similares) aumentou de uma estimativa de 73% para 78%.⁶ Isso traduz-se numa melhoria média de cerca de 0,003% por dia. Inúmeras tendências semelhantes estão constantemente a desenrolar-se.

Ainda assim, estas constatações estão já amplamente documentadas. Analisei o vasto impacto positivo da mudança

tecnológica no bem-estar humano em *A Era das Máquinas Espirituais* (1999)⁷ e em *A Singularidade Está Próxima* (2005)⁸, bem como em dezenas de palestras e artigos ao longo dos anos. No seu livro *Abundance* (2012)⁹, Peter Diamandis e Steven Kotler aprofundaram a forma como estamos a caminhar para uma Era de abundância em recursos que, em tempos, eram definidos pela escassez. Já no livro *Enlightenment Now* (2018)¹⁰, Steven Pinker descreveu o progresso contínuo que tem vindo a ser feito em várias áreas de impacto social.

A minha ênfase, neste capítulo, recai especificamente sobre a natureza exponencial desse progresso — sobre como a Lei dos Retornos Acelerados é o motor fundamental de muitas das tendências individuais que observamos, e como o resultado será uma melhoria dramática da maioria dos aspectos da vida num futuro muito próximo — não apenas no domínio digital.

Antes de explorarmos exemplos específicos com maior detalhe, é importante começar por uma compreensão conceptual clara desta dinâmica. O meu trabalho foi, por vezes, mal interpretado como se afirmasse que a mudança tecnológica, por si só, é intrinsecamente exponencial, e que a Lei dos Retornos Acelerados (LdRA) se aplica a todas as formas de inovação. Essa não é a minha visão. Na verdade, a LdRA descreve um fenómeno em que certos tipos de tecnologias criam ciclos de retroalimentação que aceleram a inovação. De forma geral, trata-se de tecnologias que nos concedem um domínio cada vez maior sobre a informação — recolhê-la, armazená-la, manipulá-la, transmiti-la — o que torna o próprio ato de inovar mais fácil. A imprensa tornou os livros

suficientemente baratos para que o ensino se tornasse acessível à geração seguinte de inventores. Os computadores modernos ajudam os designers de chips a criar a próxima geração de CPUs mais rápidas. A banda larga mais barata torna a internet mais útil para todos, porque mais pessoas podem partilhar as suas ideias online. A mais famosa curva exponencial da mudança tecnológica, a Lei de Moore, é, assim, apenas uma manifestação deste processo mais profundo e fundamental.

Existem exemplos de mudança rápida que não se enquadram nesta lei, como é o caso da velocidade da tecnologia de transporte — por exemplo, o tempo necessário para viajar de Inglaterra para a América. Em 1620, o *Mayflower* demorou sessenta e seis dias a fazer a travessia.¹¹ Na época da Revolução Americana, em 1775, as melhorias na construção naval e na navegação reduziram esse tempo para cerca de quarenta dias.¹² Em 1838, o navio a vapor *Great Western*, com rodas de pás, completou a viagem em quinze dias¹³, e, em 1900, o transatlântico *Deutschland*, com quatro chaminés e propulsão por hélice, fez a travessia em cinco dias e quinze horas.¹⁴ Em 1937, o navio *Normandie*, com propulsão turboelétrica, reduziu esse tempo para três dias e vinte e três horas.¹⁵ Em 1939, o primeiro serviço de hidroaviões da Pan Am fez a travessia em apenas trinta e seis horas¹⁶, e o primeiro serviço aéreo comercial a jato, em 1958, completou a viagem em menos de dez horas e meia.¹⁷ Em 1976, o supersónico Concorde reduziu esse tempo para apenas três horas e meia!¹⁸ Isto parece, sem dúvida, uma tendência exponencial aberta — mas não é. O Concorde foi retirado de operação em 2003, e desde então, o tempo de voo na rota Londres—Nova Iorque voltou a ser superior a sete

horas e meia.¹⁹ Há uma variedade de razões técnicas e económicas específicas para o facto de o transporte transatlântico ter deixado de acelerar. Mas a razão mais profunda é que a tecnologia de transporte não cria ciclos de retroalimentação. Os motores a jato não são utilizados para construir motores a jato melhores, e, por isso, chega-se a um ponto em que os custos de acrescentar mais velocidade superam os benefícios de continuar a inovar.

O que torna a Lei dos Retornos Acelerados (LdRA) tão poderosa no contexto das tecnologias da informação é o facto de que os ciclos de retroalimentação mantêm os custos da inovação inferiores aos seus benefícios, permitindo que o progresso continue. E à medida que a inteligência artificial ganha aplicabilidade em cada vez mais domínios, as tendências exponenciais que hoje reconhecemos na computação começarão a tornar-se visíveis em áreas como a medicina, onde o progresso costumava ser lento e dispendioso. Com a IA a expandir rapidamente a sua amplitude e capacidade ao longo da década de 2020, esta irá transformar radicalmente áreas que normalmente não consideramos tecnologias da informação, como a alimentação, o vestuário, a habitação e até mesmo a utilização do solo. Estamos agora a aproximar-nos da parte mais inclinada destas curvas exponenciais. Isso, em suma, é o que explica por que razão a maioria dos aspetos da vida irá melhorar exponencialmente nas próximas décadas.

O problema é que a cobertura noticiosa distorce sistematicamente a nossa perceção sobre estas tendências. Como qualquer romancista ou argumentista pode confirmar, captar o interesse de uma audiência exige geralmente um elemento de

perigo crescente ou conflito.²⁰ Desde a mitologia antiga até *Star Wars*, este é o padrão que captura a atenção do nosso cérebro. Como resultado — por vezes de forma deliberada e outras vezes de forma bastante orgânica — as notícias procuram emular esse paradigma narrativo. Os algoritmos das redes sociais, otimizados para maximizar a resposta emocional a fim de aumentar o envolvimento dos utilizadores (e, por conseguinte, as receitas publicitárias), agravam ainda mais este fenómeno.²¹ Isto gera um viés de seleção que favorece histórias sobre crises iminentes, relegando para o fundo dos nossos feeds (fluxos ou correntes) de notícias os tipos de manchetes citados no início deste capítulo.

A nossa atração por más notícias é, na verdade, uma adaptação evolutiva. Historicamente, foi mais importante para a nossa sobrevivência prestar atenção a potenciais ameaças. Aquele farfalhar nas folhas podia ser um predador, por isso fazia sentido concentrar-nos nesse perigo em vez de no facto de as colheitas terem melhorado um décimo de ponto percentual em relação ao ano anterior.

Não é de estranhar que os seres humanos, que evoluíram para uma vida de subsistência em grupos de caçadores-recoletores, não tenham desenvolvido um instinto mais apurado para reconhecer mudanças positivas graduais. Durante a maior parte da história da humanidade, as melhorias na qualidade de vida eram tão pequenas e frágeis que dificilmente seriam notadas ao longo de uma vida inteira. De facto, este estado de coisas da Idade da Pedra prolongou-se até à Idade Média. Em Inglaterra, por exemplo, o PIB per capita estimado (em libras britânicas de 2023) no ano de 1400

era de £1.605.²² Se alguém nascido nesse ano vivesse até aos oitenta, o PIB per capita aquando da sua morte seria exatamente o mesmo.²³ Para alguém nascido em 1500, o PIB per capita à nascença teria descido para £1.586, e oitenta anos depois teria apenas recuperado para £1.604.²⁴ Compare-se isso com uma pessoa nascida em 1900, cuja vida de oitenta anos viu um salto de £6.734 para £20.979.²⁵ Por isso, não só a nossa evolução biológica não nos preparou para reconhecer o progresso gradual, como a nossa evolução cultural também não. Não há nada em Platão ou Shakespeare que nos recorde da importância de prestar atenção ao progresso material gradual da sociedade, porque esse progresso não era perceptível no tempo em que viveram.

Uma versão moderna de um predador escondido na folhagem é o fenómeno das pessoas que monitorizam continuamente as suas fontes de informação, incluindo as redes sociais, à procura de acontecimentos que possam pô-las em perigo. Segundo Pamela Rutledge, diretora do Media Psychology Research Center, "Monitorizamos continuamente os acontecimentos e perguntamos: 'Isto tem a ver comigo? Estou em perigo?'"²⁶ Este comportamento diminui a nossa capacidade de reconhecer desenvolvimentos positivos que se desenrolam lentamente.

Outra adaptação evolutiva é o viés psicológico bem documentado de lembrar o passado como sendo melhor do que realmente foi. As memórias de dor e sofrimento desvanecem-se mais rapidamente do que as memórias positivas.²⁷ Num estudo de 1997 realizado pelo psicólogo Richard Walker, da Colorado State University²⁸, os participantes avaliaram acontecimentos em termos de prazer e dor,

e depois voltaram a avaliá-los três meses, dezoito meses, e quatro anos e meio mais tarde. As reações negativas desapareceram muito mais rapidamente do que as positivas, enquanto as memórias agradáveis persistiram. Um estudo de 2014 realizado em países como Austrália, Alemanha, Gana, entre muitos outros²⁹, demonstrou que este “viés de desvanecimento da afetação negativa” é um fenómeno à escala mundial.

Nostalgia, um termo criado pelo médico suíço Johannes Hofer em 1688, combinando as palavras gregas *nostos* (regresso a casa) e *algos* (dor ou sofrimento), é mais do que apenas recordar memórias agradáveis; trata-se de um mecanismo de adaptação para lidar com o stress do passado, transformando-o.³⁰ Se a dor do passado não se atenuasse, ficaríamos para sempre paralisados por ela.

A investigação confirma este fenómeno. Um estudo conduzido por Clay Routledge, professor de psicologia na North Dakota State University, analisou o uso da nostalgia como mecanismo de adaptação e constatou que os participantes que escreveram sobre um evento nostálgico positivo relataram níveis mais elevados de auto-estima e vínculos sociais mais fortes.³¹ Assim, a nostalgia revela-se útil tanto para o indivíduo como para a comunidade. Quando olhamos para o passado, a dor, o stress e os desafios tendem a desvanecer-se, e lembramo-nos sobretudo dos aspectos mais positivos da vida. Por outro lado, quando pensamos no presente, estamos altamente conscientes das nossas preocupações e dificuldades actuais. Isso leva à impressão — muitas vezes falsa — de que o passado foi melhor do que o presente, apesar das provas objectivas esmagadoras que indicam o contrário.

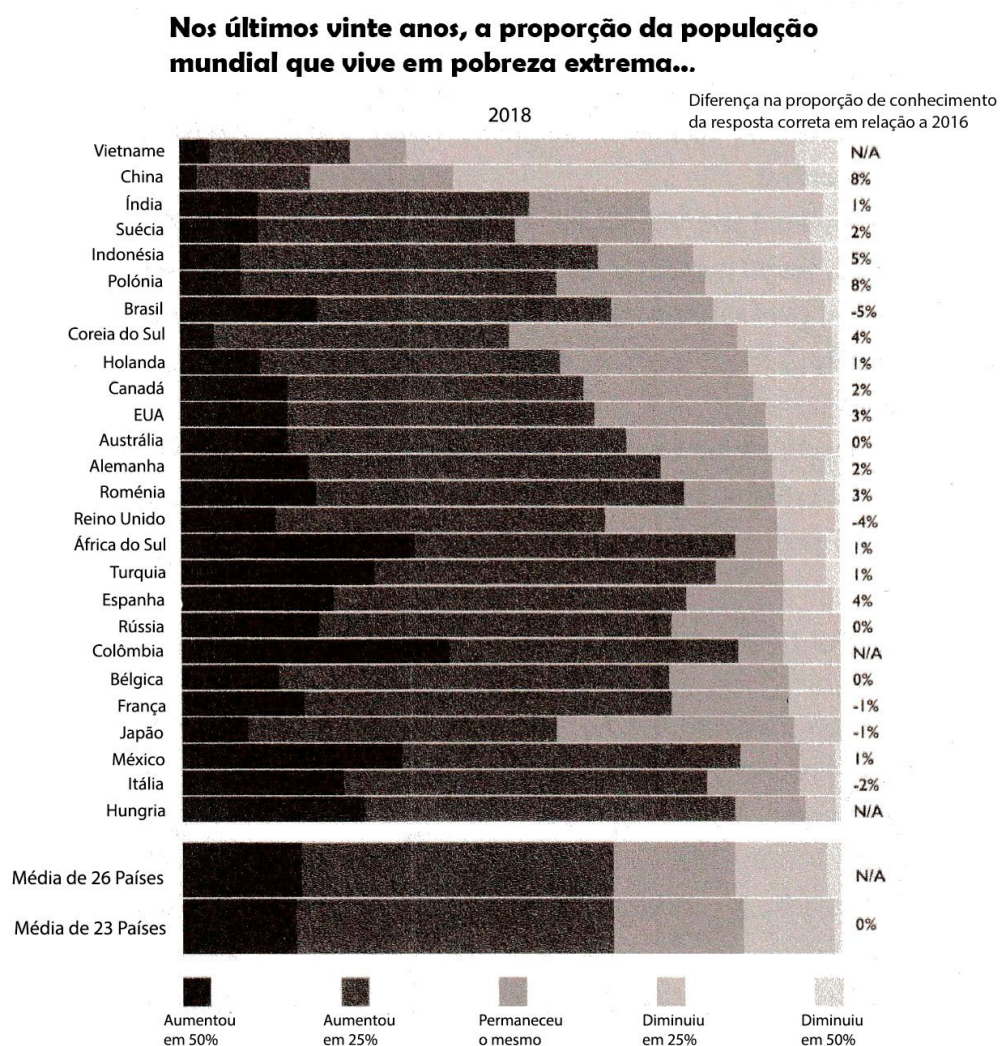
Também temos um viés cognitivo que nos leva a exagerar a prevalência de más notícias entre os acontecimentos comuns. Por exemplo, um estudo de 2017 demonstrou que as pessoas tendem a perceber as pequenas flutuações aleatórias (como dias bons ou maus na bolsa, épocas de furacões severas ou suaves, pequenas subidas ou descidas no desemprego) como menos aleatórias quando são negativas.³² Em vez de as considerarem variações normais, as pessoas suspeitam que tais oscilações indicam uma tendência mais ampla de agravamento. Como resumiu o cientista cognitivo Art Markman ao comentar um dos resultados principais do estudo: “Quando os participantes foram questionados sobre se o gráfico indicava uma mudança fundamental na economia, estavam mais inclinados a ver uma pequena variação como sinal de uma grande mudança se essa variação implicasse deterioração, em vez de melhoria.”³³

Esta e outras investigações semelhantes sugerem que somos condicionados a esperar entropia — a ideia de que o estado natural do mundo é as coisas desintegrarem-se e piorarem. Esta predisposição pode ser construtiva, pois prepara-nos para os reveses e motiva-nos à ação, mas representa um forte viés que ofusca os reais progressos na condição humana.

E isso tem um impacto concreto na política. Uma sondagem do Public Religion Research Institute revelou que, em 2016, 51% dos norte-americanos sentiam que “a cultura e o modo de vida americanos pioraram desde a década de 1950”.³⁴ No ano anterior, uma sondagem da YouGov mostrou que 71% do público britânico acreditava que o mundo está a piorar progressivamente, e apenas

5% dizia que está a melhorar.³⁵ Tais percepções incentivam políticos populistas a prometer restaurar as glórias perdidas do passado, apesar de esse passado ter sido, em quase todas as medidas objetivas de bem-estar, dramaticamente pior.

Como um entre muitos exemplos deste fenómeno, uma sondagem realizada em 2018³⁶ perguntou a 31.786 pessoas de 26 países — que falavam 17 línguas e representavam 63% da população mundial — se a pobreza global tinha aumentado ou diminuído nos vinte anos anteriores, e em que medida. As respostas estão indicadas no gráfico abaixo.

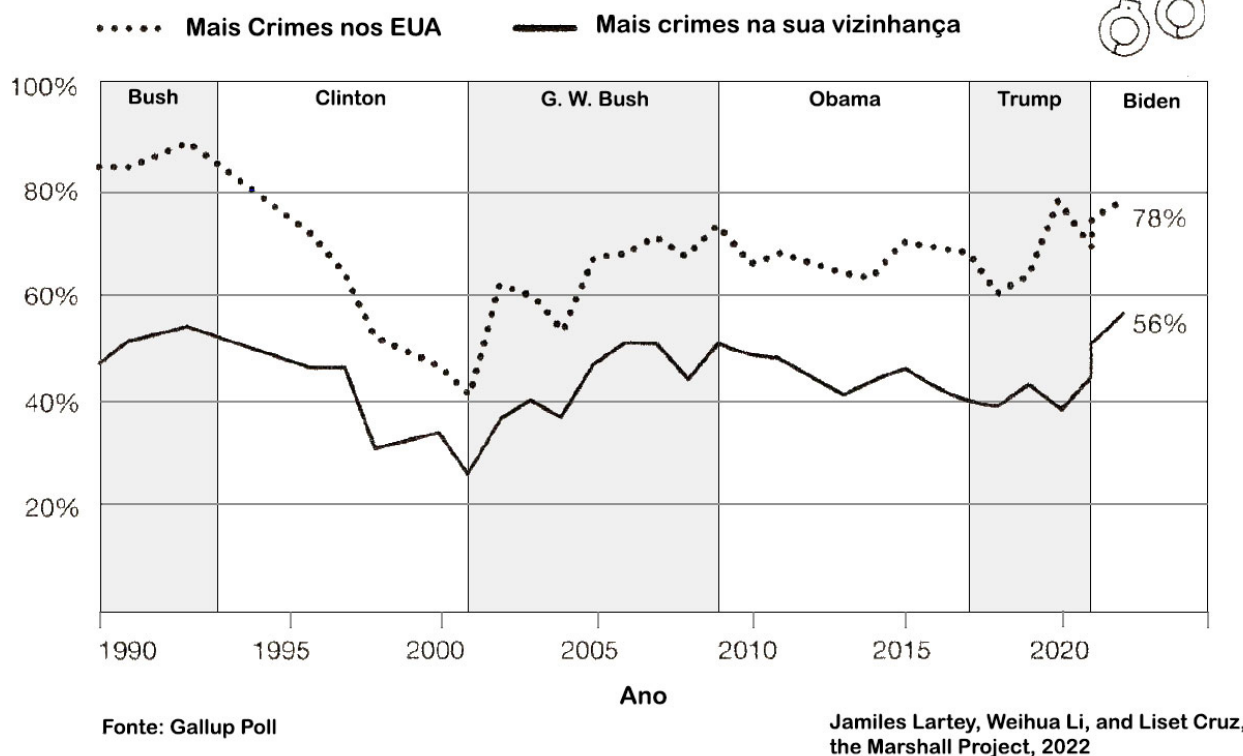


FONTE: MARTIJN LAMPERT, ANNE BLANKSMA CETA E PANOS PAPADONGONAS, 2018.

Apenas 2 por cento das pessoas acertaram na resposta correta: a pobreza diminuiu 50 por cento. Um corpo crescente de investigação em ciências sociais confirma estas discrepâncias entre a percepção pública e a realidade de um progresso generalizado, de acordo com inúmeras métricas sociais e económicas. Outro exemplo é um estudo de referência realizado no Reino Unido pela Ipsos MORI, para a Royal Statistical Society e o King's College London³⁷, que revelou uma ampla divergência entre a opinião popular e os dados estatísticos reais sobre vários temas, tais como:

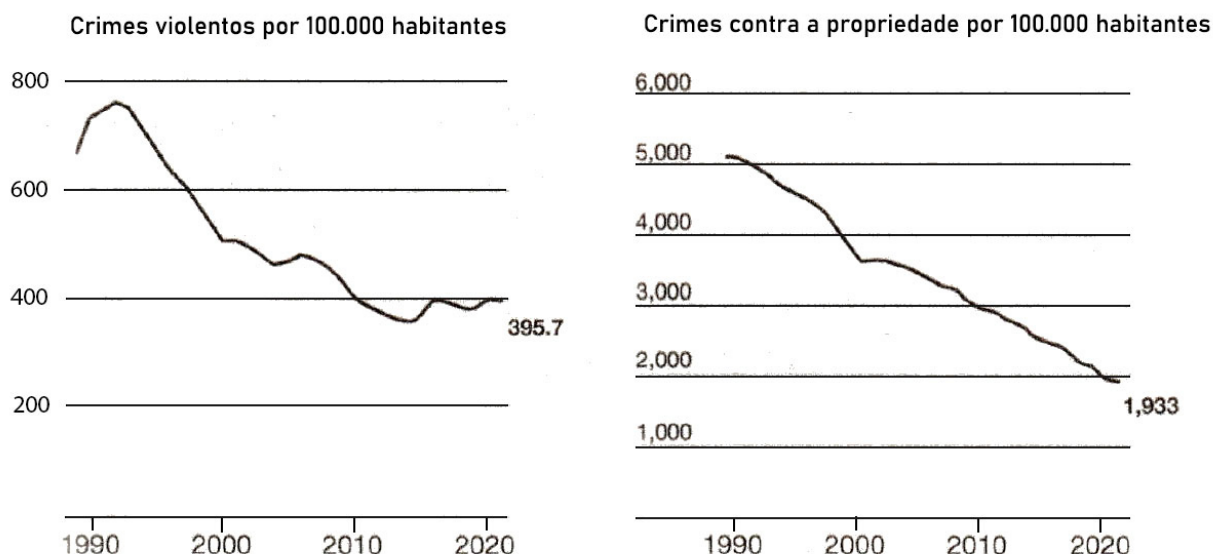
- A percepção pública era de que 24 por cento dos apoios estatais eram reclamados de forma fraudulenta, enquanto o valor real era de apenas 0,7 por cento.
- Em Inglaterra e no País de Gales, o crime diminuiu 53 por cento entre 1995 e 2012, ainda assim, 58 por cento do público acreditava que o crime tinha aumentado ou permanecido igual nesse período. O crime violento entre 2006 e 2012 caiu 20 por cento, mas 51 por cento das pessoas pensavam que tinha aumentado.
- A percepção pública sobre a gravidez na adolescência era 25 vezes pior do que a realidade: 0,6 por cento das raparigas com menos de 15 anos no Reino Unido engravidam por ano, enquanto a estimativa do público era de 15 por cento.

Percepção pública do aumento da criminalidade



O mesmo efeito verifica-se do lado ocidental do Atlântico. Durante o século XXI, uma maioria significativa de americanos (até 78 por cento) acreditou que o crime tinha aumentado a nível nacional no ano anterior, apesar de tanto o crime violento como o contra a propriedade terem diminuído cerca de metade desde 1990.³⁸

Taxas reais de criminalidade nos EUA



Fonte: Uniform Crime Reporting Program, Federal Bureau of Investigation

Jamiles Larrey, Weihua Li e Liset Cruz, o Marechal
Projeto, 2022

O aforismo “Se sangra, vende” resume uma das principais causas destas percepções erróneas. Um incidente violento será amplamente noticiado, enquanto as reduções na criminalidade (por exemplo, devido ao policiamento orientado por dados ou a uma melhor comunicação entre a polícia e a comunidade) são, literalmente, não-acontecimentos. Como tal, não recebem uma cobertura vasta.

Isto não precisa de ser resultado de uma decisão consciente de alguém — os incentivos dos media favorecem estruturalmente a divulgação de histórias violentas ou negativas. Devido aos vieses cognitivos descritos anteriormente neste capítulo, os seres humanos estão mais naturalmente sintonizados com informação ameaçadora. Dado que a maioria dos media (tanto os meios de comunicação tradicionais como as redes sociais) ganham dinheiro

atraindo a atenção para gerar receitas de publicidade, não nos deveria surpreender que a indústria tenha aprendido, coletivamente, que a melhor maneira de se manter no negócio é propagar informação ameaçadora que provoque fortes respostas emocionais.

Isto também está ligado à questão da urgência. A palavra “notícias” sugere literalmente que a informação é nova e oportuna. As pessoas têm apenas uma quantidade limitada de tempo para consumir media, pelo que tendem a priorizar incidentes que acabaram de acontecer. O problema é que a vasta maioria desses eventos discretos e urgentes são coisas más. Como destaquei no início deste capítulo, a maioria das coisas boas que acontecem no mundo são processos muito graduais, pelo que é muito difícil para estas histórias atingirem o nível de urgência que as tornaria, por exemplo, uma notícia de primeira página no *The New York Times* ou a principal notícia na CNN. Efeitos semelhantes verificam-se nas redes sociais — é fácil partilhar vídeos de um desastre, mas o progresso gradual não gera imagens dramáticas.

Como disse Steven Pinker, “As notícias são uma forma enganosa de entender o mundo. São sempre sobre eventos que aconteceram e não sobre coisas que não aconteceram. Portanto, quando há um polícia que não foi baleado ou uma cidade que não teve uma manifestação violenta, isso não faz notícia. Enquanto os eventos violentos não chegarem a zero, haverá sempre manchetes para clicar... O pessimismo pode ser uma profecia autorrealizável.”³⁹ Isto é especialmente verdade agora que as redes sociais agregam notícias alarmantes de todo o planeta — enquanto as gerações

anteriores eram principalmente informadas sobre eventos locais ou regionais.

Contudo, a minha observação inversa é: “O otimismo não é uma especulação ociosa sobre o futuro, mas sim uma profecia autorrealizável.” A crença de que um mundo melhor é genuinamente possível é um poderoso motivador para trabalhar arduamente na sua criação.

Daniel Kahneman recebeu o Prémio Nobel da Economia pelo seu trabalho (algum dele em colaboração com Amos Tversky) que explica as heurísticas inválidas e inconscientes que as pessoas usam ao fazer estimativas sobre o mundo.⁴⁰ A sua pesquisa demonstrou que as pessoas sistematicamente ignoram a probabilidade prévia — o facto de que coisas que são verdadeiras sobre um grupo em geral tendem a ser verdadeiras sobre indivíduos desse grupo que se encontram. Por exemplo, se lhe pedirem para seleccionar a provável ocupação de um estranho com base na sua autodescrição, se ele lhe disser que “adora livros”, poderá escolher “bibliotecário”, ignorando a taxa base — o facto geral de que existem relativamente poucos bibliotecários no mundo.⁴¹ Alguém que superasse este viés perceberia que adorar livros é uma evidência muito fraca sobre a ocupação de alguém e, portanto, adivinharia uma profissão muito mais comum, como “vendedor de loja”. As pessoas não desconhecem as taxas base, mas muitas vezes ignoram-nas em favor de responder a um detalhe vívido ao considerar uma situação particular.

Outro atalho cognitivo enviesado citado por Kahneman e Tversky é a expectativa, por parte de observadores ingênuos, de que uma moeda lançada ao ar tem maior probabilidade de sair "cara" depois de uma sequência de "coroas".⁴² Isto deve-se a uma má compreensão da regressão à média.

Um terceiro viés que ajuda a explicar grande parte da inclinação pessimista da sociedade é o que Kahneman e Tversky chamam de "heurística da disponibilidade".⁴³ As pessoas estimam a probabilidade de um evento ou fenómeno com base na facilidade com que conseguem recordar exemplos desse evento. Pelas razões já discutidas anteriormente, as notícias e os nossos feeds de informação tendem a enfatizar acontecimentos negativos, pelo que são precisamente essas circunstâncias negativas que nos vêm mais facilmente à mente.

O facto de devermos corrigir estes enviesamentos não significa que devamos ignorar ou subestimar os problemas reais, mas fornece bases racionais sólidas para um otimismo em relação à trajetória geral da humanidade. A mudança tecnológica não acontece automaticamente — exige engenho humano e esforço. Nem tão-pouco esse progresso deve cegar-nos perante o sofrimento urgente que muitas pessoas enfrentam no presente. Pelo contrário, as tendências de longo prazo devem lembrar-nos que, por mais difíceis ou até desesperantes que os problemas possam parecer, enquanto espécie estamos a inverter a maré na sua resolução. E considero isso uma fonte profunda de motivação.

2. A Realidade é Que Praticamente Todos os Aspectos da Vida estão a Melhorar Progressivamente como Resultado do Avanço Exponencial da Tecnologia

A tecnologia da informação avança de forma exponencial porque contribui diretamente para a sua própria inovação contínua. Mas essa tendência também impulsiona numerosos mecanismos de progresso que se reforçam mutuamente noutras áreas. Ao longo dos últimos dois séculos, isso gerou um círculo virtuoso que tem promovido melhorias em praticamente todos os aspetos do bem-estar humano, incluindo a literacia, a educação, a riqueza, o saneamento, a saúde, a democratização e a redução da violência.

Tendemos a pensar o desenvolvimento humano em termos económicos: à medida que as pessoas conseguem ganhar mais dinheiro por ano, têm acesso a uma melhor qualidade de vida. Mas o verdadeiro desenvolvimento envolve algo muito mais profundo do que simplesmente o acúmulo de riqueza pelas economias. Os ciclos económicos sobem e descem; a riqueza pode ser conquistada e perdida. Mas a mudança tecnológica é, em essência, permanente. Uma vez que a nossa civilização aprende a fazer algo útil, tendemos a conservar esse conhecimento e a construir sobre ele. Esta marcha progressiva, unidirecional, tem sido um poderoso contrapeso face às catástrofes transitórias — como desastres naturais, guerras e pandemias — que ocasionalmente fazem recuar as sociedades.

Fatores interligados como a educação, os cuidados de saúde, o saneamento e a democratização criam ciclos de retroalimentação

mutuamente reforçadores — melhorias em qualquer uma dessas áreas tendem a gerar benefícios nas outras. Por exemplo, uma melhor educação forma médicos mais capacitados, e médicos mais capacitados mantêm mais crianças saudáveis o suficiente para permanecerem na escola. Esta dinâmica tem uma implicação muito poderosa: novas tecnologias podem gerar enormes benefícios indiretos, mesmo em áreas distantes da sua aplicação original.

Por exemplo, os eletrodomésticos do século XX não apenas pouparam às pessoas imenso tempo e esforço físico, como também facilitaram mudanças transformadoras e libertadoras, que permitiram a milhões de mulheres talentosas ingressarem no mercado de trabalho. A sua entrada massiva permitiu contribuições essenciais em inúmeros domínios. De um modo geral, podemos afirmar que a inovação tecnológica promove condições que ajudam mais pessoas, numa dada sociedade, a realizar o seu potencial — o que, por sua vez, possibilita ainda mais inovação.

Outro exemplo é a invenção da imprensa, que melhorou e alargou enormemente o acesso ao ensino, proporcionando uma força de trabalho mais capaz e sofisticada, que impulsionou o crescimento económico. Um maior nível de literacia permitiu uma melhor coordenação da produção e do comércio, resultando também numa prosperidade acrescida. Esse aumento de riqueza permitiu, por sua vez, maiores investimentos em infraestruturas e educação, acelerando ainda mais o ciclo benéfico. Paralelamente, a comunicação impressa em massa facilitou uma maior democratização, a qual, ao longo do tempo, conduziu a uma redução da violência.

Inicialmente, este processo foi muito lento, e as diferenças entre os estilos de vida dos avós e dos netos eram subtis e geralmente pouco notadas. Contudo, a tendência ao longo dos séculos foi a de uma trajetória gradual, mas significativamente ascendente em todas estas medidas de bem-estar social. Nas últimas décadas, essas tendências aceleraram, impulsionadas pelas curvas cada vez mais íngremes dos avanços exponenciais em quase todas as formas de tecnologia da informação. Como descrevo neste capítulo, ao longo das próximas duas décadas este progresso entrará numa fase de aceleração muito intensa.

3. Literacia e Educação

Durante a maior parte da história humana, a literacia permaneceu muito baixa em todo o mundo. O conhecimento era transmitido principalmente por via oral, e uma das principais razões para isto era que reproduzir a escrita era muito dispendioso. Não valia a pena o tempo da pessoa comum aprender a ler se raramente se deparava com material escrito e nunca o poderia pagar. O tempo é o único recurso escasso que todos consumimos igualmente — não importa quem seja, só tem vinte e quatro horas por dia. Quando as pessoas estão a decidir como gastar o seu tempo, é apenas racional pensar nos benefícios que obterão de uma potencial escolha. Aprender a ler é um grande investimento de tempo. Em sociedades onde a própria sobrevivência era difícil e os livros eram demasiado caros para a pessoa comum aceder, este não seria um investimento sensato. Portanto, devemos ter cuidado para não pensar nos nossos antepassados analfabetos como ignorantes ou desinteressados. Em

vez disso, viviam em condições que fortemente desencorajavam a literacia.

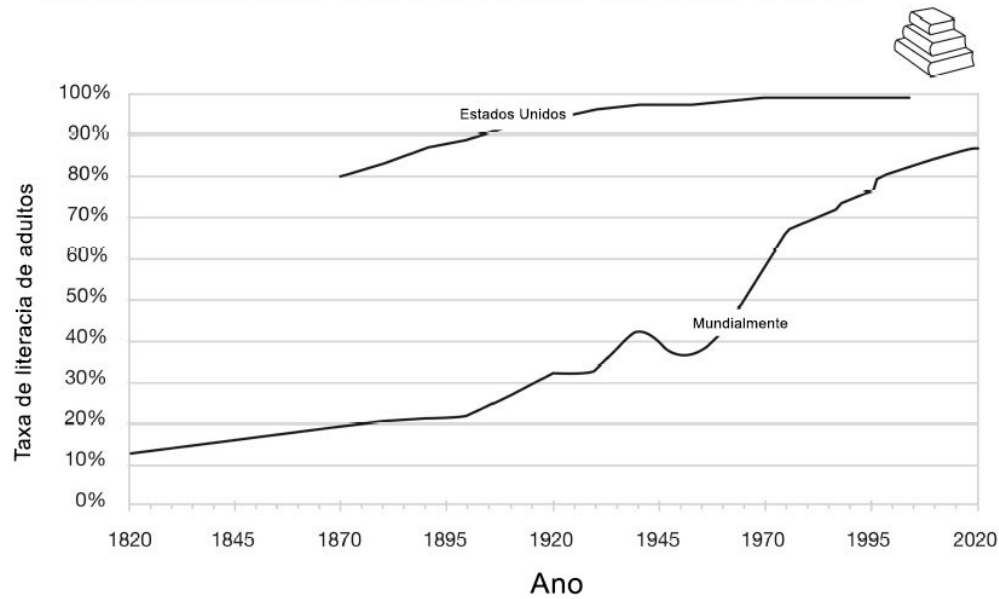
Com esta perspetiva, vale a pena também considerar como os incentivos no mundo de hoje por vezes desencorajaram a aprendizagem. Por exemplo, em locais com poucos empregos na área das tecnologias de informação, os jovens interessados em ciência da computação podem achar que estudar programação não será um uso sensato do seu tempo. Mas agora, tal como na Europa há séculos, a tecnologia pode mudar isso — à medida que a tradução automática, o ensino à distância, a programação em linguagem natural e o teletrabalho abrem novas oportunidades e recompensam a curiosidade.

A introdução da prensa com tipos móveis na Europa, no final da Idade Média, desencadeou uma proliferação de materiais de leitura variados e acessíveis, tornando prático para as pessoas comuns aprenderem a ler. Quando o período medieval chegava ao fim, menos de um quinto da população europeia sabia ler.⁴⁴ A literacia era limitada sobretudo ao clero e a profissões que exigiam leitura.⁴⁵ Durante o Iluminismo, a capacidade de leitura começou a espalhar-se gradualmente, mas em 1750 apenas os Países Baixos e a Grã-Bretanha, entre as grandes potências europeias, apresentavam uma taxa de literacia superior a 50%.⁴⁶ Em 1870, apenas Espanha e Itália ficavam notoriamente aquém desse patamar, provavelmente devido às suas economias relativamente pouco desenvolvidas na época e a guerras civis recentes.⁴⁷ No entanto, a média global permanecia inferior à europeia. Em 1800, provavelmente menos de uma em cada dez pessoas no mundo

sabia ler, mas ao longo do século XIX a disseminação de jornais produzidos em massa ajudou a promover uma literacia mais ampla, ao passo que as reformas sociais começaram a garantir ensino básico para todas as crianças.⁴⁸ Ainda assim, em 1900, menos de um em cada quatro habitantes do planeta sabia ler.⁴⁹ Já no século XX, o ensino público expandiu-se a nível global, e a taxa de literacia mundial ultrapassou um em cada quatro por volta de 1910. Em 1970, a maioria da população mundial era alfabetizada.⁵⁰ Desde então, a literacia expandiu-se rapidamente, aproximando-se de uma prevalência quase universal na maioria dos lugares.⁵¹ Hoje, a taxa global de literacia ronda os 87%, sendo que nos países desenvolvidos frequentemente ultrapassa os 99%.⁵²

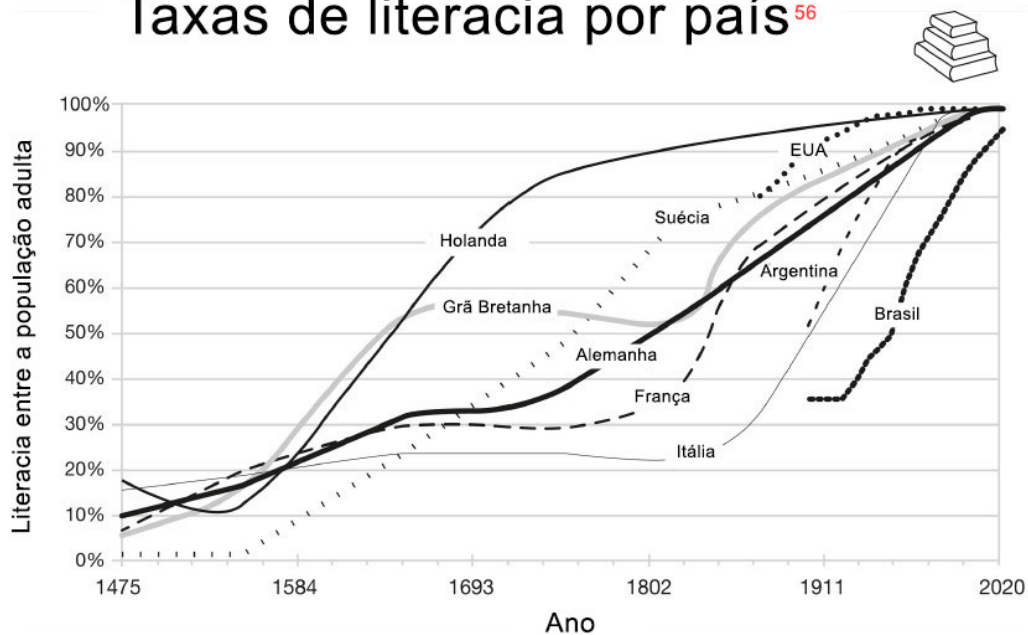
Contudo, ainda há progresso a ser feito. Estes números sobre a literacia referem-se a padrões básicos, como a capacidade de ler e escrever mensagens simples, como o próprio nome. Novas métricas, mais abrangentes, foram desenvolvidas para avaliar a qualidade da literacia. Por exemplo, segundo a Avaliação Nacional da Literacia de Adultos (National Assessment of Adult Literacy), em 2003, apenas 86% da população dos Estados Unidos obteve uma pontuação acima do nível “inferior ao básico” em literacia.⁵³ Uma avaliação semelhante, realizada nove anos depois, concluiu que não havia melhorias significativas.⁵⁴

Crescimento da literacia desde 1820⁵⁵



Principais fontes: O nosso mundo em dados; UNESCO

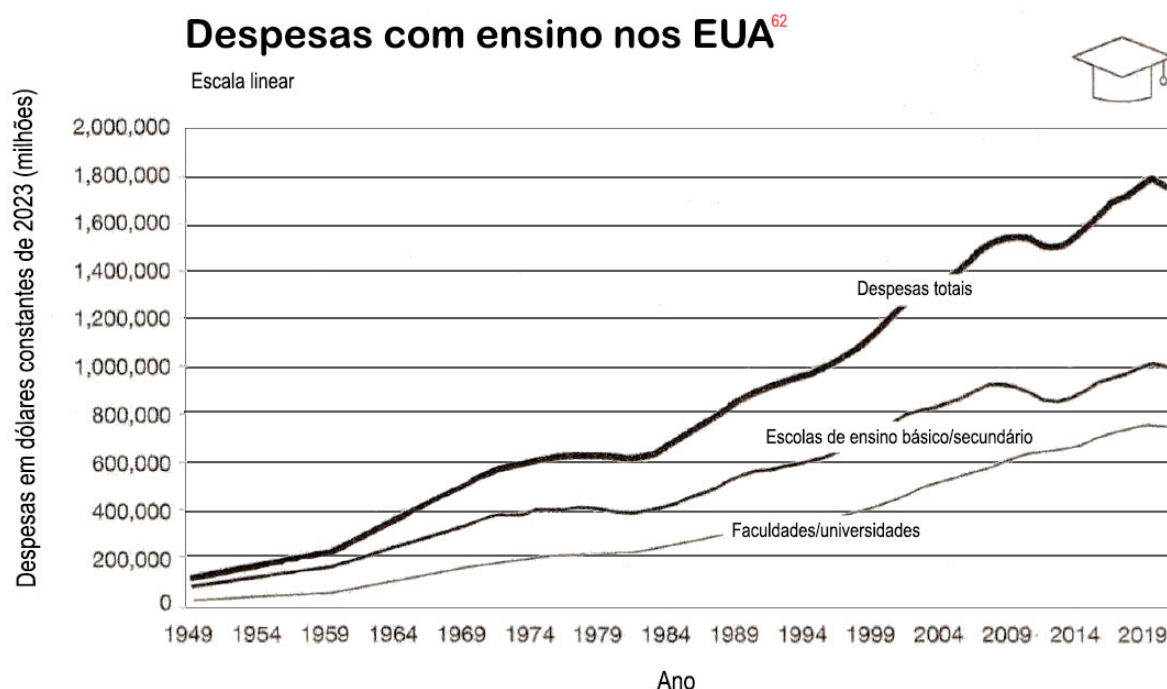
Taxas de literacia por país⁵⁶



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; UNESCO

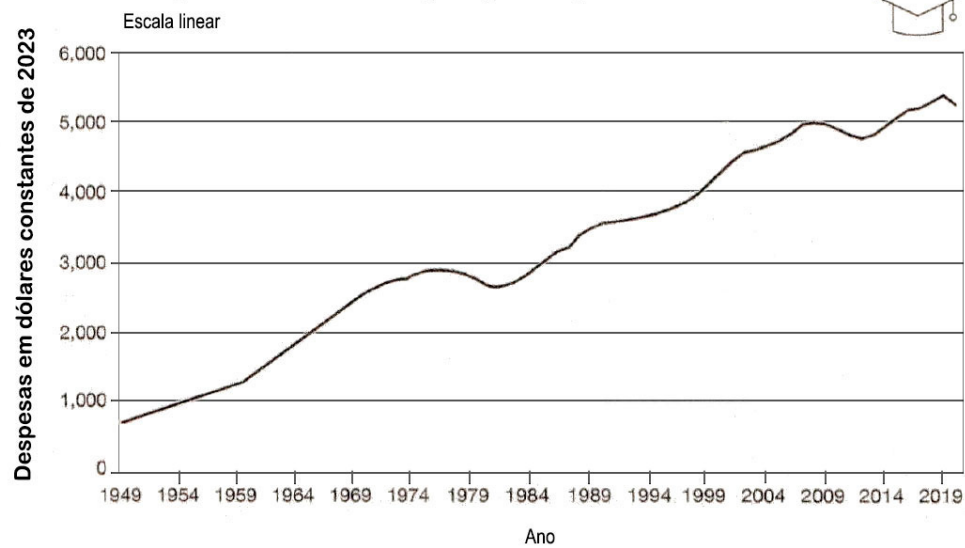
Em 1870, a população dos Estados Unidos tinha, em média, cerca de quatro anos de ensino formal — enquanto no Reino Unido, Japão, França, Índia e China a média era inferior a um ano.⁵⁷ O

Reino Unido, o Japão e a França começaram rapidamente a aproximar-se dos Estados Unidos no início do século XX, à medida que expandiram o acesso gratuito ao ensino público.⁵⁸ Entretanto, a Índia e a China permaneceram pobres e subdesenvolvidas, mas deram grandes saltos nas duas décadas que se seguiram à Segunda Guerra Mundial.⁵⁹ Em 2021, a Índia apresentava uma média de 6,7 anos de escolaridade, e a China 7,6 anos.⁶⁰ Os restantes países mencionados ultrapassaram os 10 anos de média, com os Estados Unidos a liderar com 13,7 anos de escolaridade.⁶¹ Os gráficos seguintes ilustram este progresso dramático ao longo dos últimos cinquenta anos — não por acaso, o mesmo período em que os computadores começaram a facilitar o ensino e a amplificar os benefícios da educação.

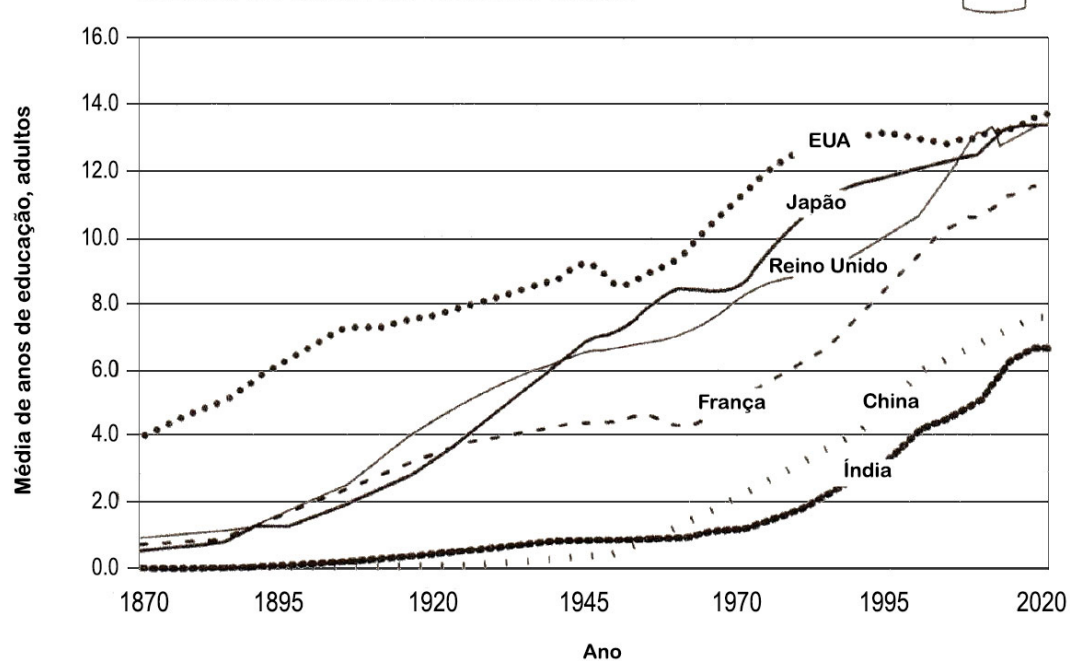


Fonte principal: Centro Nacional de Estatísticas da Educação

Despesas com educação per capita nos EUA⁶³



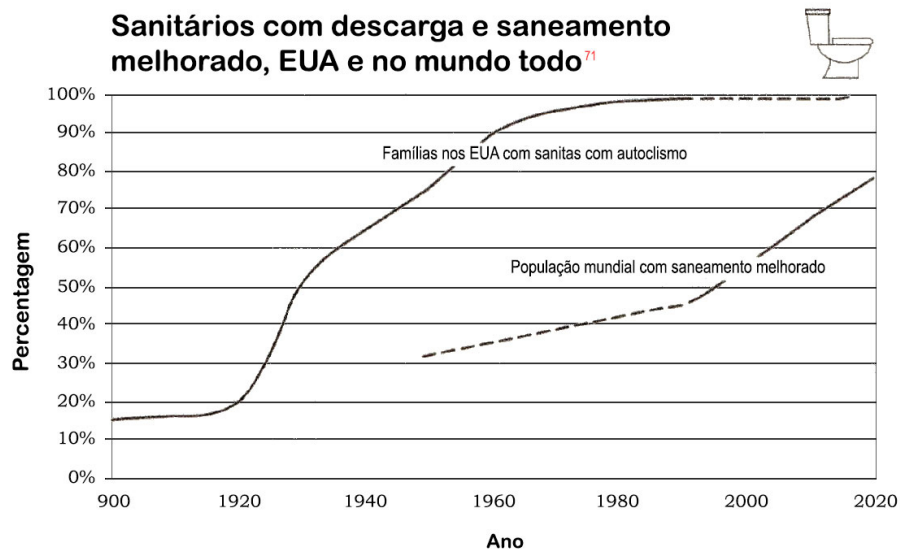
Média de anos de escolaridade⁶⁴



Principais fontes: O nosso mundo em dados; Gabinete do Relatório de Desenvolvimento Humano da ONU

4. Disponibilidade de Sanitários com Descarga, Eletricidade, Rádio, Televisão e Computadores

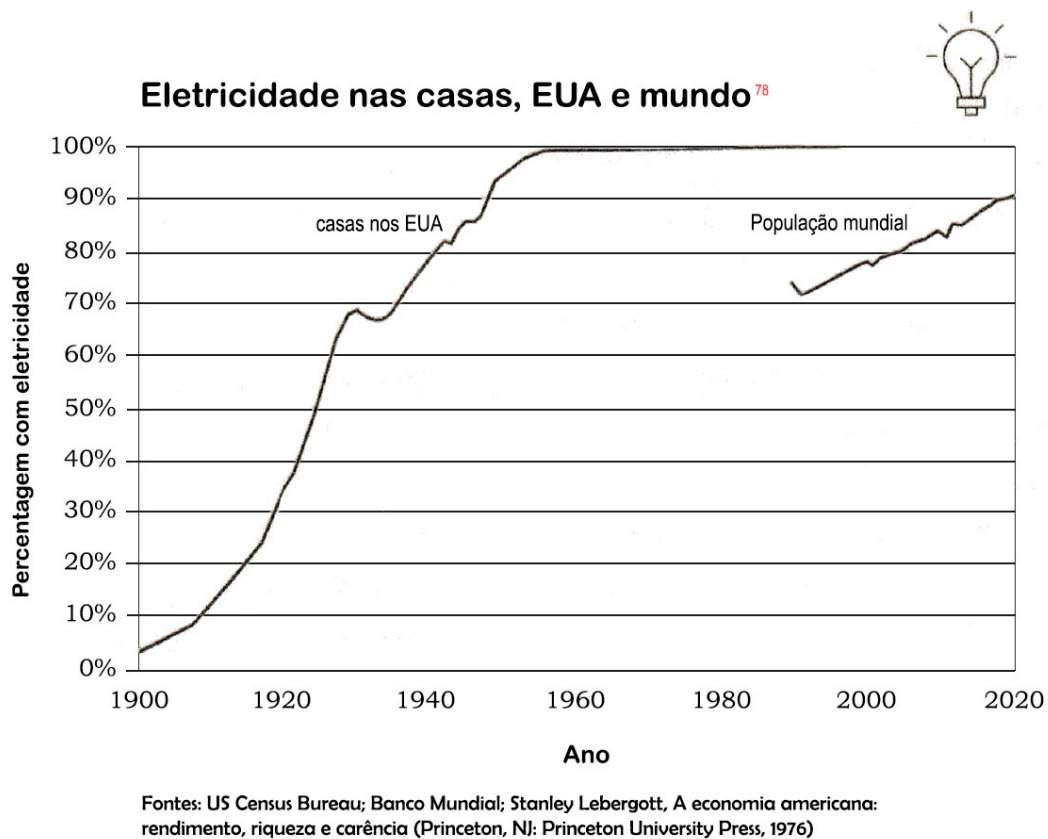
Historicamente, uma das maiores causas de doenças e mortes foi a contaminação dos alimentos e das fontes de água por fezes humanas.⁶⁵ As sanitas com descarga, a solução tecnológica definitiva para este problema, começaram a ser adotadas gradualmente nas cidades dos Estados Unidos após surgirem, já em 1829, mas o seu uso só se tornou comum nas zonas urbanas por volta do início do século XX.⁶⁶ Durante as décadas de 1920 e 1930, as sanitas com descarga espalharam-se rapidamente pelas zonas rurais, chegando a três quartos das habitações em 1950 e a 90 por cento em 1960.⁶⁷ Em 2023, a pequena fração de casas americanas sem sanitas com descarga deve-se, em muitos casos, a escolhas de estilo de vida (como a preferência por viver em ambientes rústicos), em vez de pobreza extrema.⁶⁸ Em contraste, a pobreza tem sido uma das principais razões pelas quais, em países em desenvolvimento, as pessoas ainda não têm acesso a sanitas com descarga ou a outras formas de saneamento melhorado, como as sanitas de compostagem.⁶⁹ No entanto, o acesso global a casas de banho seguras tem vindo a aumentar de forma constante, à medida que a tecnologia de saneamento se torna mais acessível e à medida que regiões anteriormente marcadas pela violência se tornam mais estáveis e capazes de investir em infraestruturas sanitárias.⁷⁰



Principais fontes: Stanley Lebergott, *Pursuing Happiness: American Consumers in the Twentieth Century* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993); Departamento de Censos dos EUA; Banco Mundial As linhas tracejadas indicam estimativas que ligam fontes de dados.

A eletricidade não é, em si, uma tecnologia da informação, mas como alimenta todos os nossos dispositivos e redes digitais, constitui o pré-requisito para os inúmeros outros benefícios da civilização moderna. Mesmo antes do advento dos computadores, já operava eletrodomésticos transformadores que poupavam trabalho e permitia às pessoas trabalhar e divertir-se durante a noite. No início do século XX, a eletrificação nos Estados Unidos estava limitada principalmente às grandes áreas urbanas.⁷² O ritmo de eletrificação abrandou por volta do início da Grande Depressão, mas durante as décadas de 1930 e 1940, o presidente Franklin D. Roosevelt promoveu vastos programas de eletrificação rural, com o objetivo de levar a eficiência das máquinas elétricas ao coração agrícola da América.⁷³ Em 1951, mais de 95 por cento das casas americanas já tinham eletricidade e, em 1956, o esforço nacional de eletrificação era considerado, na prática, concluído.⁷⁴

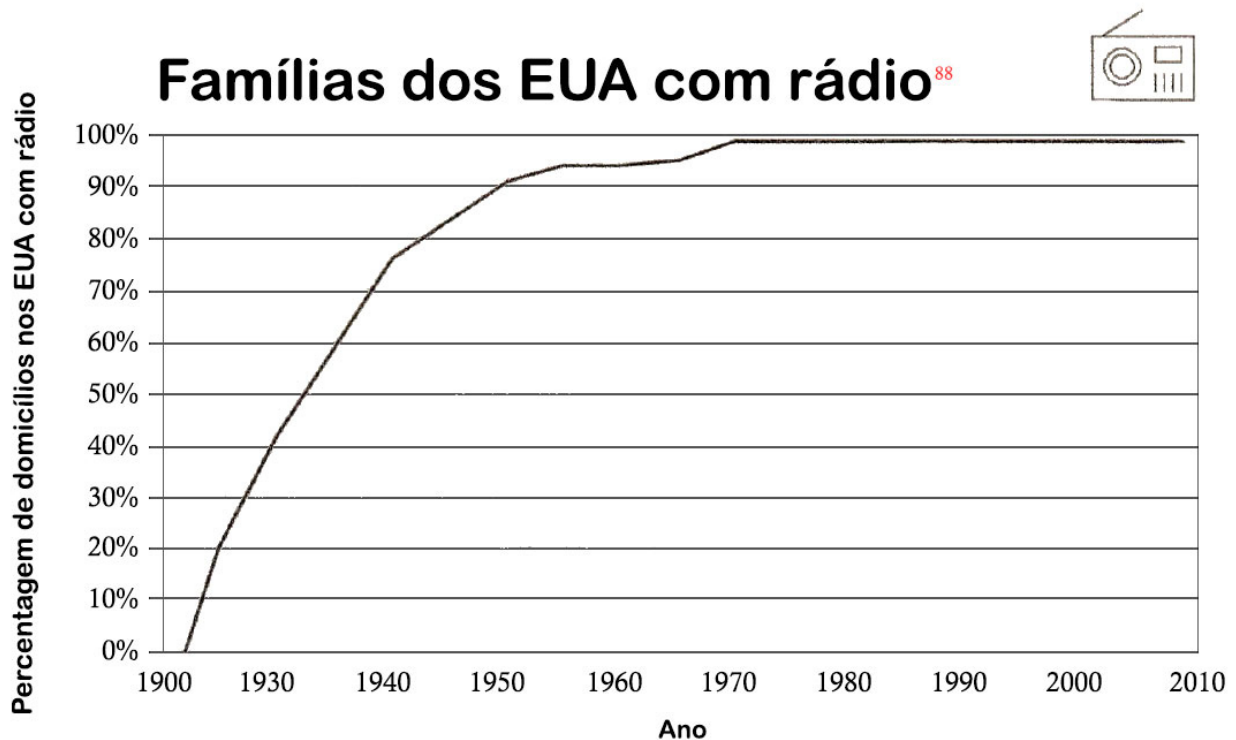
Noutras partes do mundo, a eletrificação seguiu, geralmente, um padrão semelhante: primeiro as cidades, depois as zonas suburbanas e, por fim, as áreas rurais.⁷⁵ Atualmente, mais de 90 por cento da população mundial tem acesso à eletricidade.⁷⁶ Para aqueles que ainda vivem sem energia elétrica, o principal obstáculo não é tecnológico, mas político. O professor do MIT Daron Acemoglu e o seu colega James Robinson realizaram pesquisas de grande influência sobre o papel crucial das instituições políticas no desenvolvimento humano.⁷⁷ Em suma, à medida que os países permitem uma maior participação política dos cidadãos e que as pessoas ganham segurança para inovar e investir no futuro, instauram-se ciclos de prosperidade sustentada. São precisamente esses fatores que tornam tão difícil levar eletricidade ao cerca de um décimo da população mundial que ainda não a possui. Em zonas onde a violência é frequente, as pessoas concluem que não vale a pena investir em infraestruturas elétricas dispendiosas que podem ser rapidamente destruídas. Da mesma forma, quando as estradas são precárias e perigosas, torna-se difícil transportar maquinaria e combustível até comunidades isoladas, para que estas possam gerar a sua própria energia. Felizmente, as células fotovoltaicas, acessíveis e eficientes, continuarão a expandir o acesso à eletricidade.



A primeira tecnologia de comunicação transformadora possibilitada pela eletricidade foi a rádio. As transmissões de rádio comerciais nos Estados Unidos começaram em 1920 e, na década de 1930, tinham-se tornado a principal forma de mídia de massas do país.⁷⁹ Ao contrário dos jornais, que se limitavam sobretudo a uma única área metropolitana, as emissões radiofônicas podiam alcançar audiências em todo o território nacional. Isto impulsionou o desenvolvimento de uma verdadeira cultura mediática nacional, à medida que pessoas desde a Califórnia até ao Maine escutavam os mesmos discursos políticos, reportagens noticiosas e programas de entretenimento. Em 1950, mais de nove em cada dez lares americanos possuíam um rádio, mas, nessa mesma década, a televisão começou a suplantiar o domínio da rádio no panorama mediático.⁸⁰ Em resposta, os hábitos dos ouvintes alteraram-se: a

programação radiofónica passou a focar-se mais especificamente em notícias, política e desporto, e grande parte da escuta passou a ocorrer enquanto se conduzia.⁸¹ Desde a década de 1980, programas de debate político altamente partidários tornaram-se algumas das forças mais influentes da rádio, atraindo críticas por reforçarem preconceitos dos ouvintes e fechá-los a informações contrárias.⁸² Com a proliferação de smartphones e tablets na década de 2010, uma proporção crescente de conteúdos radiofónicos passou a ser transmitida online, sem necessidade de utilização das tradicionais ondas de rádio. (Em 2007, ano em que o primeiro iPhone foi lançado, apenas 12 por cento dos americanos ouviam rádio online pelo menos uma vez por semana; em 2021, esse número atingiu 62 por cento.)⁸³

A adoção da televisão seguiu um padrão semelhante ao da rádio, mas, com a nação já muito mais desenvolvida, o seu crescimento exponencial foi ainda mais rápido. Os cientistas e engenheiros começaram a teorizar, no final do século XIX, sobre os avanços que conduziriam à televisão e, no final da década de 1920, começaram a ser desenvolvidos e demonstrados os primeiros sistemas televisivos primitivos.⁸⁴ A tecnologia alcançou viabilidade comercial nos Estados Unidos em 1939, mas o eclodir da Segunda Guerra Mundial levou a uma quase paralisação da produção televisiva a nível mundial.⁸⁵ Contudo, assim que a guerra terminou, os americanos começaram rapidamente a adquirir televisores. Novas estações surgiram por todo o país e, em 1954, a maioria dos lares já possuía pelo menos um aparelho de televisão.⁸⁶ A adoção aumentou rapidamente e, em 1962, mais de 90 por cento dos lares tinham um televisor.⁸⁷



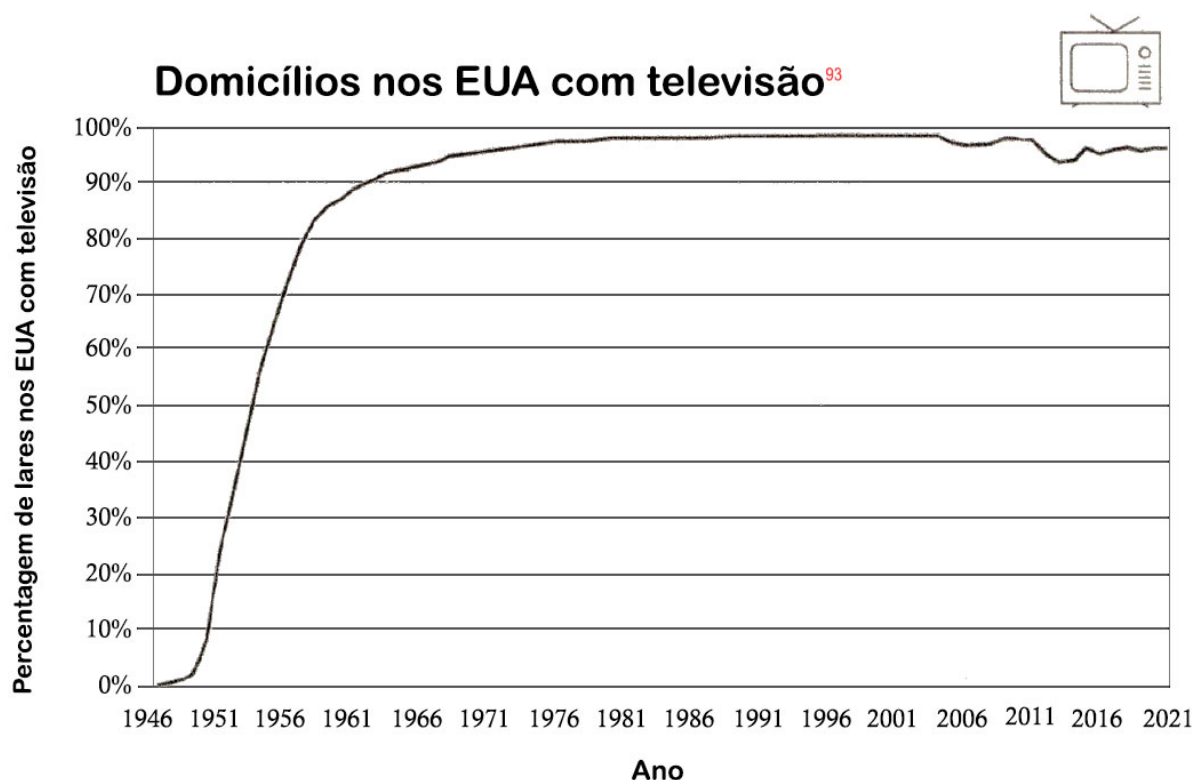
Fontes: US Census Bureau; Douglas B. Craig, *Fireside Politics: Radio and Political Culture in the United States, 1920-1940* (Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 2000)

EMBORA PAREÇA QUE A PROPORÇÃO DE LARES AMERICANOS COM RÁDIO TENHA CAÍDO SIGNIFICATIVAMENTE NOS ÚLTIMOS ANOS (DE 96% EM 2008 PARA 68% EM 2020, DE ACORDO COM UM ESTUDO QUE UTILIZOU METODOLOGIA DIFERENTE DA UTILIZADA PARA OS DADOS DESTES GRÁFICOS), ISTO É PROFUNDAMENTE ENGANADOR PORQUE OUTROS DISPOSITIVOS DESEMPENHAM AGORA A MESMA FUNÇÃO. POR EXEMPLO, EM 2021, 85% DOS ADULTOS AMERICANOS TINHAM UM SMARTPHONE, O QUE PERMITE O STREAMING GRATUITO DE PROGRAMAÇÃO DE RÁDIO SEM A NECESSIDADE DE UM RÁDIO.

O crescimento abrandou então, à medida que os últimos adotantes iam lentamente juntando-se às fileiras dos telespectadores ao longo das três décadas seguintes.⁸⁸ Em 1997, o uso atingiu o seu pico, com 98,4 por cento dos lares, antes de declinar ligeiramente nos anos subsequentes, situando-se em torno de 96,2 por cento em 2021.⁸⁹ Este decréscimo pode ser atribuído a uma variedade de fatores: uma mudança cultural que se afastou do consumo excessivo de televisão, o surgimento de novos passatempos proporcionados pela internet e a recente tendência de

conteúdos televisivos serem disponibilizados para transmissão em dispositivos online.⁹⁰

Ao contrário da rádio e da televisão, que permitem um consumo passivo de conteúdos mediáticos, os computadores abrem possibilidades muito mais amplas, precisamente porque são interativos. Os computadores pessoais começaram a entrar nos lares americanos durante a década de 1970, com máquinas como o Kenbak-1 e, em 1975, com o extraordinariamente popular Altair 8800, vendido em kits de montagem.⁹¹



Principais fontes: US Census Bureau; Cobbett & Steinberg, Factos da TV, Factos arquivados; JackW. Plunkett, Plunkett Entertainment and Media Industry Almanac 2006 (Houston, TX: Plunkett Research, 2006); Empresa Nielsen

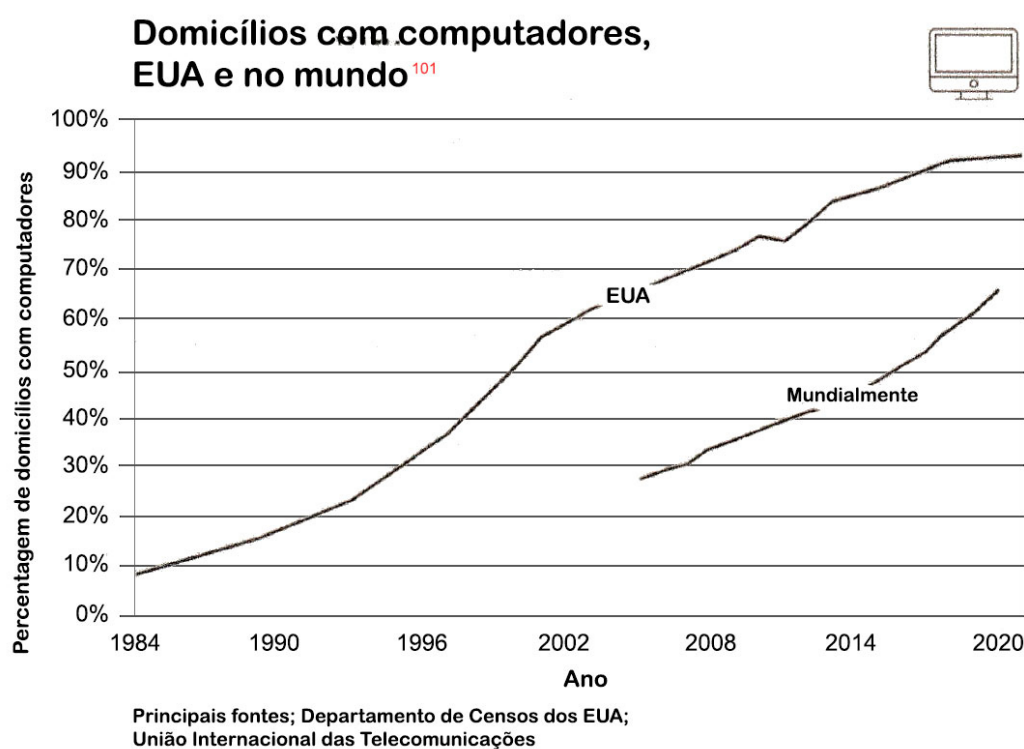
No final dessa década, empresas como a Apple e a Microsoft estavam já a transformar o mercado, introduzindo computadores

peçoais de utilização tão intuitiva que qualquer pessoa comum poderia aprender a operá-los numa única tarde.⁹³ O famoso anúncio da Apple no Super Bowl de 1984 pôs todo o país a falar de computadores, e a proporção de lares americanos com um computador quase duplicou nos cinco anos seguintes à sua transmissão.⁹⁴ Durante esse período, as principais utilizações dos computadores eram sobretudo a processamento de texto, introdução de dados e jogos simples.

Mas o florescimento da internet nos anos 1990 expandiu de forma massiva a utilidade dos computadores. Em janeiro de 1990, existiam cerca de 175.000 hosts em todo o Sistema de Nomes de Domínio da internet.⁹⁵ Em janeiro de 2000, esse número já havia disparado para cerca de 72.000.000.⁹⁶ De forma análoga, o volume de tráfego de internet mundial cresceu de aproximadamente 12.000 gigabytes em 1990 para 306.000.000 gigabytes em 1999.⁹⁷ Este crescimento aumentou diretamente a utilidade dos computadores. Tal como os serviços de streaming conseguem atrair mais subscritores e cobrar taxas mais elevadas quando oferecem mais e melhor conteúdo, também a internet se tornou cada vez mais valiosa à medida que o conjunto de conteúdos disponíveis se expandia exponencialmente. Isto gerou um ciclo de retroalimentação positivo — muitos destes novos utilizadores passaram eles próprios a contribuir com conteúdos, aumentando ainda mais o valor da internet. Como resultado, durante a década de 1990, os computadores domésticos deixaram de ser apenas plataformas para processamento de texto e jogos primitivos, transformando-se em portais capazes de aceder a grande parte do conhecimento mundial e de conectar um utilizador a pessoas

situadas a continentes de distância. O surgimento do comércio eletrônico permitiu às pessoas realizar muitas das suas compras através do computador, e a emergência das redes sociais nos anos 2000 tornou a experiência online profundamente interativa.

Entre 2017 e 2021, cerca de 93,1 por cento dos lares norte-americanos possuíam computadores, e a percentagem continua a aumentar à medida que a chamada "Geração Grandiosa" diminui e os millennials formam as suas próprias famílias.⁹⁸ Paralelamente, tem-se assistido a um crescimento constante da posse de computadores a nível mundial. Os computadores embutidos em smartphones expandiram rapidamente a penetração no mercado dos países em desenvolvimento, e, em 2022, cerca de dois terços da população mundial já dispunha de, pelo menos, um dispositivo.⁹⁹



5. Expectativa de Vida

Como abordarei com mais detalhe no capítulo 6, a maior parte do nosso progresso no tratamento e prevenção de doenças até hoje resultou de um processo linear de tentativas e erros na procura de intervenções eficazes. Pela ausência de ferramentas capazes de explorar sistematicamente todas as possibilidades de tratamento, muitas descobertas dentro deste paradigma deveram-se, em larga medida, ao acaso. Talvez o exemplo mais notável de descoberta fortuita na medicina tenha sido a descoberta acidental da penicilina, que inaugurou a revolução dos antibióticos e desde então terá salvado, possivelmente, cerca de 200 milhões de vidas.¹⁰¹ Contudo, mesmo quando as descobertas não são literalmente acidentais, a fortuna continua a desempenhar um papel relevante na obtenção de avanços através dos métodos tradicionais. Sem a capacidade de simular exaustivamente todas as moléculas farmacológicas possíveis, os investigadores têm de confiar em métodos laboratoriais laboriosos, como a triagem de alto rendimento, que são significativamente mais lentos e menos eficientes.

Sejamos justos: esta abordagem trouxe benefícios imensos. Há mil anos, a esperança média de vida à nascença na Europa rondava apenas os vinte e poucos anos, uma vez que muitas pessoas sucumbiam ainda na infância ou juventude a doenças como a cólera e a disenteria, que hoje são facilmente preveníveis.¹⁰² Já a meio do século XIX, a esperança de vida no Reino Unido e nos Estados Unidos havia aumentado para a casa dos quarenta anos.¹⁰³ Em 2023, ela ultrapassa os oitenta anos em grande parte do mundo desenvolvido.¹⁰⁴ Assim, quase triplicámos a esperança de vida ao

longo do último milénio e duplicámo-la nos últimos dois séculos. Este feito deveu-se, em larga medida, ao desenvolvimento de métodos para evitar ou eliminar os agentes patogénicos externos — bactérias e vírus que trazem a doença de fora para dentro dos nossos corpos.

Hoje, porém, a maioria destes “frutos baixos” já foi colhida. As fontes remanescentes de doença e incapacidade brotam, sobretudo, das profundezas do nosso próprio corpo. À medida que as células falham e os tecidos se deterioram, surgem condições como o cancro, a aterosclerose, a diabetes e a doença de Alzheimer. Em certa medida, podemos reduzir estes riscos através do estilo de vida, da alimentação e da suplementação — aquilo a que chamo a primeira ponte para a extensão radical da vida.¹⁰⁵ Contudo, estas medidas apenas conseguem adiar o inevitável. É por esta razão que os ganhos em esperança de vida nos países desenvolvidos têm vindo a abrandar desde, sensivelmente, a metade do século XX. Por exemplo, entre 1880 e 1900, a esperança de vida à nascença nos Estados Unidos aumentou de cerca de trinta e nove para quarenta e nove anos; mas entre 1980 e 2000 — após a medicina ter deslocado o seu foco das doenças infecciosas para as doenças crónicas e degenerativas — subiu apenas de setenta e quatro para setenta e seis anos.¹⁰⁶

Felizmente, ao longo da década de 2020, estamos a atravessar a segunda ponte: a fusão da inteligência artificial com a biotecnologia para vencer as doenças degenerativas. Já ultrapassámos a fase em que os computadores eram usados apenas para organizar informações sobre intervenções e ensaios clínicos.

Actualmente, estamos a utilizar a IA para descobrir novos medicamentos e, até ao final desta década, poderemos iniciar o processo de substituir — ou pelo menos amplificar — os lentos e limitados ensaios humanos por simulações digitais. Estamos, em essência, a transformar a medicina numa tecnologia da informação, aproveitando o progresso exponencial que caracteriza estas tecnologias para dominar o "software" da biologia.

Um dos primeiros e mais significativos exemplos deste avanço encontra-se no campo da genética. Desde a conclusão do Projecto Genoma Humano em 2003, o custo do sequenciamento genético tem seguido uma tendência exponencial sustentada, reduzindo-se, em média, para metade a cada ano. Apesar de um breve período de estagnação nos custos de sequenciação entre 2016 e 2018, e de algum abrandamento devido às perturbações causadas pela pandemia de COVID-19, os custos continuam a diminuir — e é provável que voltem a acelerar à medida que a inteligência artificial desempenhe um papel cada vez mais sofisticado no processo de sequenciação. Os custos despencaram de cerca de 50 milhões de dólares por genoma em 2003 para valores tão baixos como 399 dólares no início de 2023, com uma empresa a prometer testes a 100 dólares disponíveis até ao momento em que lê estas palavras.¹⁰⁷

À medida que a inteligência artificial transforma cada vez mais áreas da medicina, irá gerar tendências semelhantes em muitos outros domínios. Já começou a ter impacto clínico¹⁰⁸, mas ainda estamos apenas no início desta curva exponencial em particular. O ténue fio de aplicações que hoje vislumbramos transformar-se-á

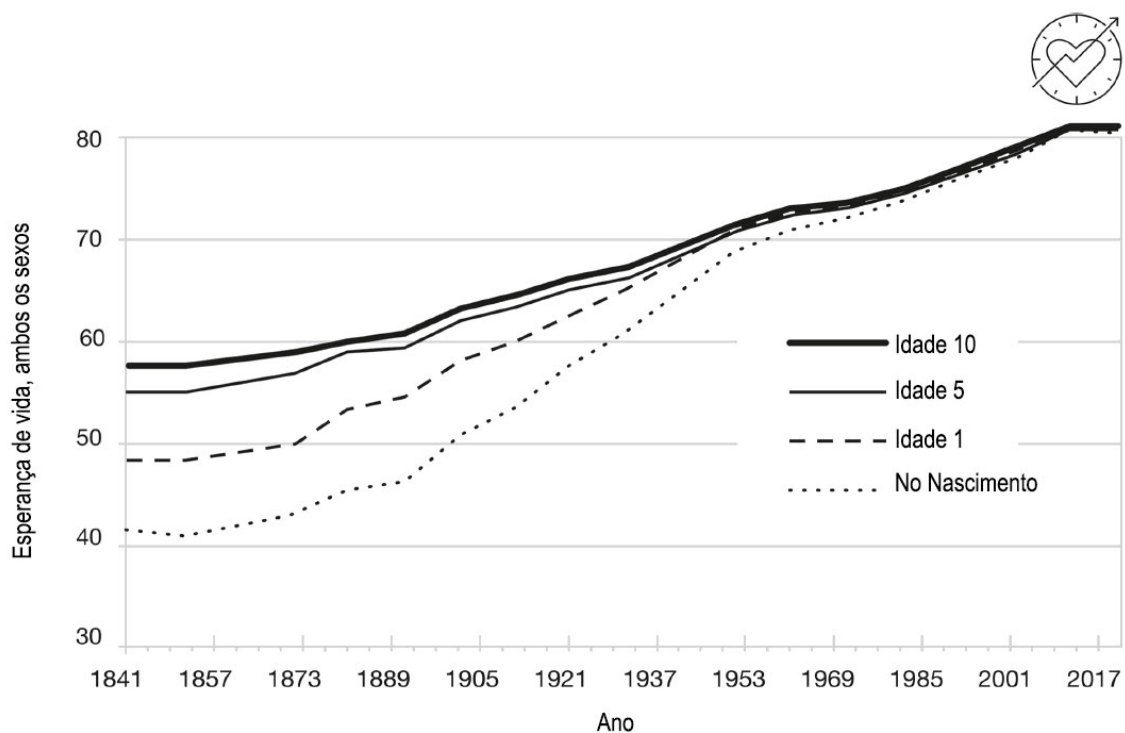
num dilúvio até ao final da década de 2020. Então, poderemos finalmente começar a abordar directamente os factores biológicos que actualmente limitam a esperança máxima de vida a cerca de 120 anos, incluindo as mutações genéticas mitocondriais, a redução do comprimento dos telómeros e a divisão celular descontrolada que origina o cancro.¹⁰⁹

Na década de 2030, atingiremos a terceira ponte para a extensão radical da vida: nanorrobôs médicos capazes de realizar, de forma inteligente, manutenção e reparação a nível celular em todo o nosso corpo. Por algumas definições, certas biomoléculas já podem ser consideradas nanobôs. Contudo, o que distinguirá os nanobôs da Terceira Ponte será a sua capacidade de serem ativamente controlados por inteligência artificial para desempenharem tarefas variadas. Neste estágio, alcançaremos um nível de controlo sobre a nossa biologia semelhante ao que actualmente possuímos na manutenção de automóveis. Ou seja, salvo uma destruição total num acidente grave, um carro pode ser continuamente reparado ou ter as suas peças substituídas indefinidamente. Da mesma forma, os nanobôs inteligentes permitirão a reparação ou a melhoria direccionada de células individuais — derrotando de forma definitiva o envelhecimento. (Falaremos mais sobre isso no capítulo 6.)

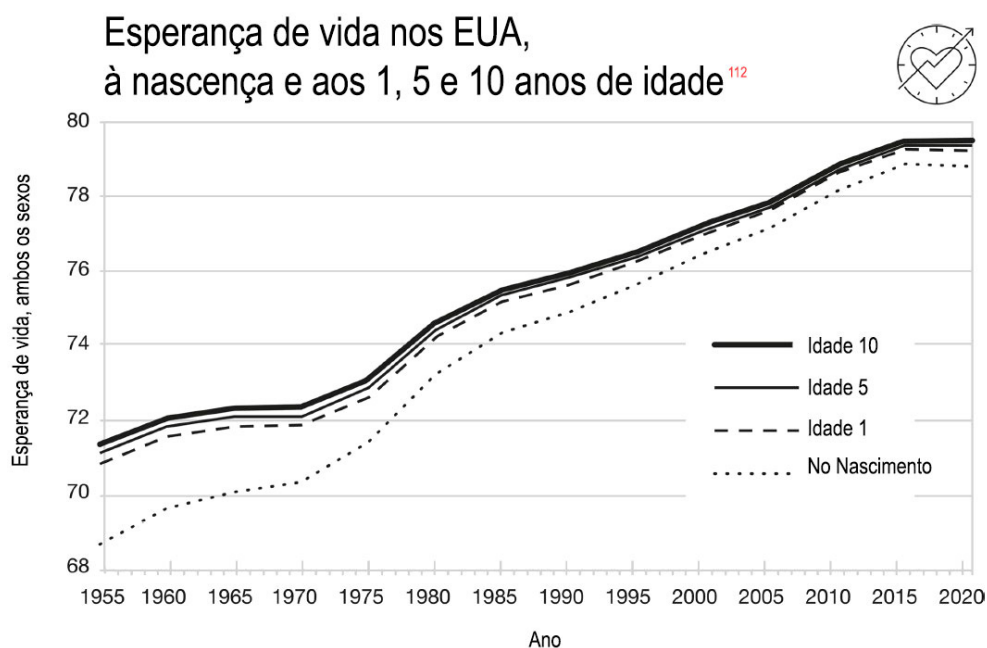
A quarta ponte — a capacidade de fazer cópias digitais dos nossos “ficheiros mentais” — será uma tecnologia da década de 2040. Tal como argumentei no capítulo 3, o núcleo da identidade de uma pessoa não é o cérebro em si, mas sim a configuração muito específica da informação que o cérebro é capaz de representar e manipular. Assim que conseguirmos digitalizar esta informação com

precisão suficiente, seremos capazes de replicá-la em suportes digitais. Isto significaria que, mesmo que o cérebro biológico fosse destruído, a identidade da pessoa não se extinguiria — podendo, assim, alcançar uma longevidade praticamente ilimitada, sendo copiada e recopiada em backups seguros.

Esperança de vida no Reino Unido, à nascença e aos 1, 5 e 10 anos de idade ¹¹¹



Fonte: Gabinete de Estatísticas Nacionais do Reino Unido



Fonte: Departamento de Assuntos Sociais e Económicos da ONU

6. Diminuição da Pobreza e Aumento do Rendimento

As tendências tecnológicas descritas até agora neste capítulo são, cada uma por si, altamente benéficas; mas é o seu efeito conjunto e mutuamente reforçador que verdadeiramente transforma o mundo. Embora o bem-estar económico seja uma medida incompleta do progresso, é a nossa melhor métrica para compreender este vasto processo no decurso de longos períodos de tempo.

A nível global, a tendência macro tem sido notavelmente estável. Em 1820, estima-se que cerca de 84 por cento da população mundial vivia em pobreza extrema, segundo os padrões globais actuais.¹¹² Com a disseminação da industrialização, as taxas de pobreza começaram rapidamente a diminuir na Europa e na América.¹¹³ Após a Segunda Guerra Mundial, esse processo

acelerou significativamente com a introdução de práticas agrícolas modernas na Índia e na China ao longo das décadas seguintes.¹¹⁴

Apesar da intensificação da cobertura mediática da pobreza global ter dado a muitas pessoas nos países desenvolvidos uma impressão exagerada da sua prevalência, a taxa de pobreza continua a diminuir — com melhorias dramáticas nos últimos trinta anos. Em 2019, a pobreza extrema (definida atualmente como viver com menos de \$2,15 por dia, em dólares de 2017) tinha descido para cerca de 8,4% da população mundial, tendo caído mais de dois terços entre 1990 e 2013.¹¹⁵

A queda foi mais acentuada na Ásia Oriental, onde o desenvolvimento económico da China retirou centenas de milhões de pessoas da pobreza, elevando os seus padrões de vida a níveis comparáveis aos de outros países desenvolvidos. Entre 1990 e 2013, registou-se uma impressionante redução de 95 por cento na pobreza extrema naquela região, cuja população total cresceu de 1,6 mil milhões para 2 mil milhões durante esse período.¹¹⁶

A única região onde a pobreza extrema aumentou durante grande parte desse mesmo período foi a Europa e a Ásia Central, onde o caos económico que se seguiu ao colapso da União Soviética levou décadas a ser reparado.¹¹⁷ Importa notar que isto se deveu sobretudo a razões políticas, e não apenas a fatores económicos ou tecnológicos. O colapso do governo autoritário soviético criou um vazio de poder que permitiu o surgimento de uma enorme corrupção. Particularmente nas repúblicas pós-soviéticas da Ásia

Central, mais pobres, isso gerou ciclos de retroalimentação negativa que desincentivaram o investimento e suprimiram a prosperidade.

Desde o fim da Guerra Fria, contudo, a comunidade internacional pôde concentrar muito mais atenção no combate à pobreza grave nas regiões mais desfavorecidas do planeta. Logo após a queda da União Soviética, muitos países desenvolvidos cortaram os seus orçamentos de ajuda externa e atribuíram menos prioridade ao desenvolvimento internacional.¹¹⁸ Isto deveu-se ao facto de, durante a Guerra Fria, o desenvolvimento ser visto sobretudo por uma lente estratégica, numa disputa de influência entre as democracias ocidentais e os países do bloco comunista. Mas a partir de meados da década de 1990, a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) reconheceu que promover o desenvolvimento era vital, tanto do ponto de vista humanitário como do ponto de vista da contribuição para um mundo mais seguro e próspero, beneficiando toda a humanidade. Em 2000, as Nações Unidas consagraram estas ideias nos Objectivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM), que coordenaram os esforços internacionais para alcançar metas essenciais até 2015.¹¹⁹ Embora muitas destas metas ambiciosas não tenham sido plenamente atingidas, os ODM impulsionaram avanços muito significativos que melhoraram a vida de centenas de milhões de pessoas.

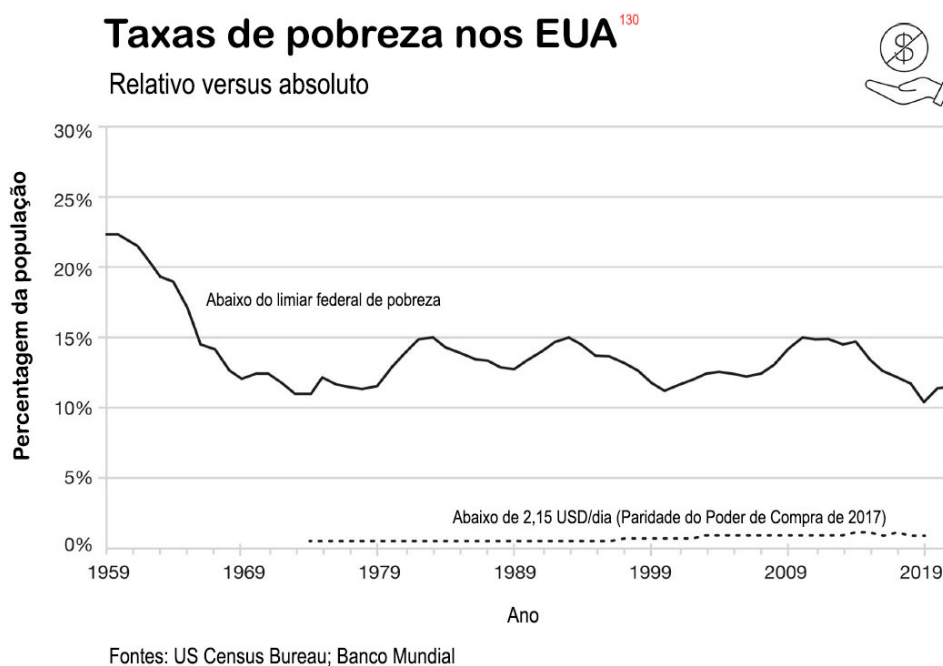
Nos Estados Unidos, a pobreza extrema em termos absolutos (segundo o critério global de 2,15 dólares por dia, em valores de 2017) tem-se mantido em 1,2 por cento ou menos desde que se iniciaram as medições.¹²⁰ No entanto, as estatísticas relativas à pobreza relativa (ser pobre em comparação com os padrões aceites

na própria sociedade) oferecem uma perspectiva diferente. A pobreza relativa nos Estados Unidos caiu de cerca de 45 por cento no século XIX, diminuindo drasticamente nos anos do pós-guerra, até atingir cerca de 12,5 por cento em 1970, altura em que estagnou.¹²¹ Desde então, tem permanecido na casa dos dez por cento¹²², oscilando com as variações da economia em geral, mas sem melhorias sustentadas a longo prazo.¹²³ Uma das razões para isso é que o aumento dos padrões de vida levou à redefinição contínua da linha de pobreza relativa, de modo que pessoas que, em 1980, não seriam consideradas pobres, hoje já o são.¹²⁴

Ainda assim, entre 2014 e 2019, o número de americanos em situação de pobreza (de acordo com o padrão periodicamente redefinido) diminuiu em cerca de 12,6 milhões, apesar de a população total ter aumentado em cerca de 8,9 milhões nesse mesmo período.¹²⁵ E 4,1 milhões dessa redução ocorreram apenas em 2019, ano em que a taxa de pobreza entre os idosos atingiu um dos valores mais baixos de sempre.¹²⁶ Embora a pandemia de COVID-19 tenha provocado um aumento temporário¹²⁷, este representou uma exceção à tendência descendente que se vinha a verificar desde a crise financeira de 2008.

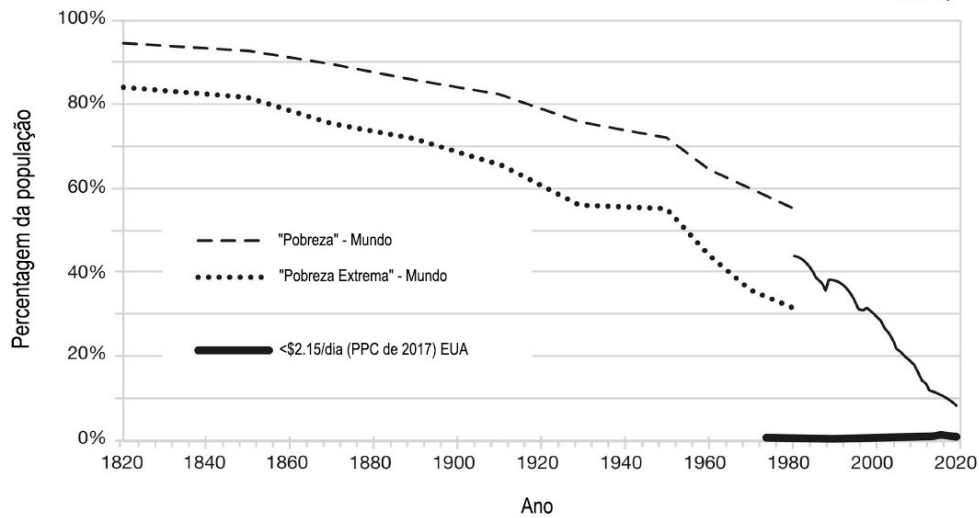
Além disso, os pobres de hoje estão significativamente melhor do ponto de vista absoluto, graças ao acesso generalizado a informação e serviços gratuitos via internet — como, por exemplo, a possibilidade de frequentar cursos abertos do MIT ou de fazer videochamadas com familiares do outro lado do mundo.¹²⁸ De forma semelhante, beneficiam da melhoria radical na relação qualidade-preço dos computadores e telemóveis nas últimas décadas, embora

esses avanços não estejam devidamente refletidos nas estatísticas económicas. (A insuficiência das estatísticas económicas para capturar adequadamente a melhoria exponencial na relação preço-desempenho de produtos e serviços influenciados pela tecnologia da informação será analisada com mais detalhe no capítulo seguinte.) Atualmente, alguém com um smartphone acessível pode usar a internet para aceder, de forma rápida e fácil, a praticamente toda a informação educacional do mundo, traduzir línguas, encontrar direções, entre muitas outras coisas. Esta capacidade não estaria disponível, nem mesmo por muitos milhões de dólares, há apenas algumas décadas.



Taxas de pobreza em queda em todo o mundo¹³¹

Em termos absolutos, com a taxa de pobreza dos EUA para comparação



Principais fontes: O nosso mundo em dados; François Bourguignon e Christian Morrisson, "Desigualdade entre os cidadãos do mundo: 1820–1992", *American Economic Review* 92, n.º 1, 4 (setembro de 2002); 727–44.

Nos Estados Unidos, o rendimento médio diário por pessoa tem aumentado de forma constante. Em 2023, a linha de pobreza para uma pessoa sozinha situava-se nos 14.580 dólares anuais, o que equivale a viver com 39,95 dólares por dia.¹³¹ Em termos reais, o americano médio (não o mediano) ultrapassa essa linha de pobreza desde cerca de 1941.¹³²

RENDA MÉDIA DIÁRIA POR PESSOA NOS ESTADOS UNIDOS
(DÓLARES DE 2023), POR ANO¹³³

2020:\$191.00

1970:\$89.82

1900:\$20.08

2015:\$169.88	1960:\$65.27	1880:\$15.08

2010:\$154.15	1950:\$52.97	1860:13.27

2000:\$147.18	1940:\$35.47	1940:\$8.37

1990:\$124.32	1930:\$30.74	1800:\$5.65

1980:\$102.41	1910:\$26.45	1774:\$7.06

TAXA APROXIMADA DE POBREZA NOS ESTADOS UNIDOS
(POBREZA RELATIVA, PERIODICAMENTE REDEFINIDA PELO
GOVERNO), POR ANO¹³⁴

2020:11.5%	1990:13.5%	1950:~30%

2015:13.5%

1980:13.0%

1935:~45%

2010:15.1%

1970:12.6%

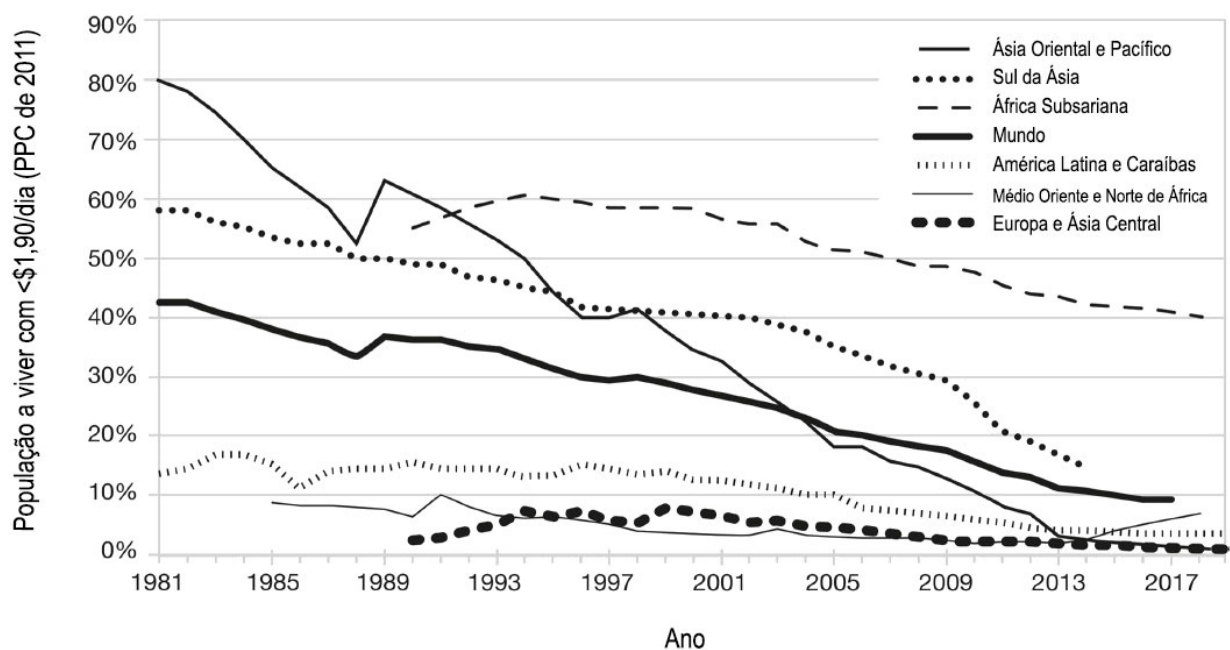
1910:~30%

2000:11.3%

1960:22.2%

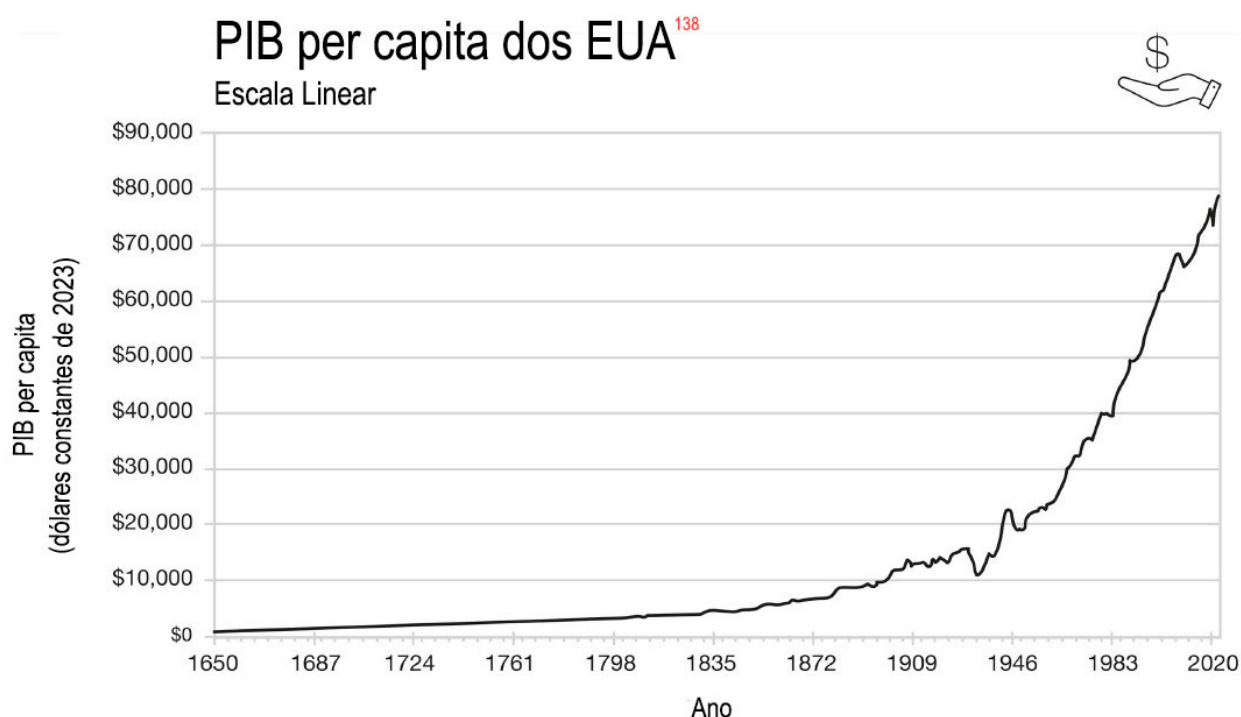
1870:-45%

Declínio da Pobreza Extrema, por Região ¹³⁶

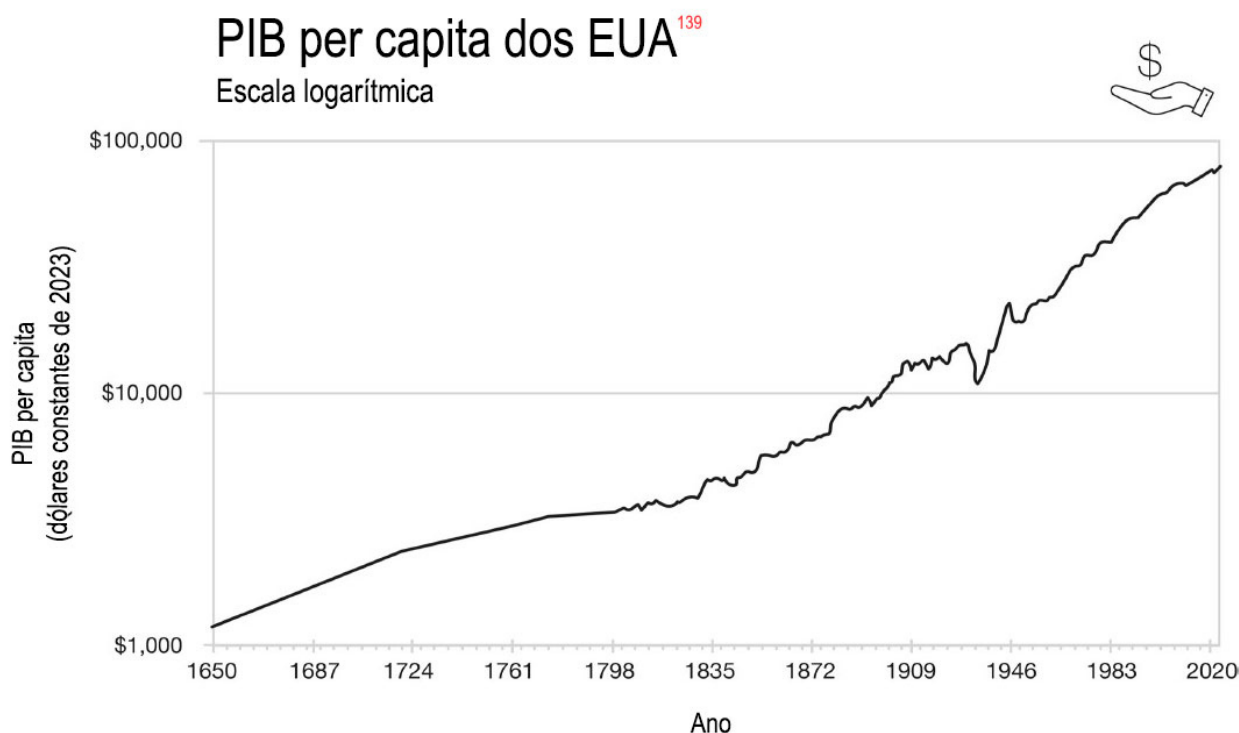


Talvez não seja surpreendente que o produto interno bruto (PIB) dos Estados Unidos tenha vindo a crescer de forma exponencial, já

que o crescimento populacional implica uma economia maior. No entanto, o PIB per capita — que corrige esse efeito demográfico — também tem crescido exponencialmente.¹³⁶ Mais uma vez, importa lembrar que este valor não inclui produtos de informação gratuitos, nem tem em conta o aumento exponencial da capacidade da tecnologia da informação pelo mesmo custo ao longo do tempo.



Fontes: Base de dados do Projeto Maddison; Gabinete de Análise Económica; Reserva Federal



Fontes: Base de dados do Projeto Maddison; Gabinete de Análise Económica; Reserva Federal

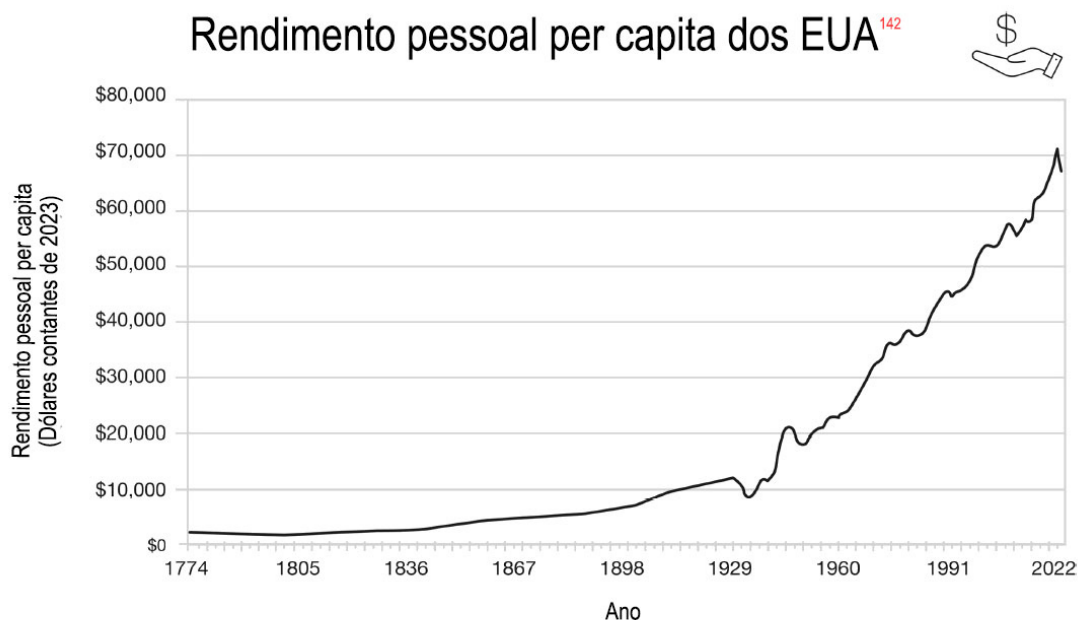
O PIB reflete a atividade económica global, incluindo grandes empresas, mas a mesma tendência mantém-se quando focamos apenas o rendimento pessoal. O rendimento pessoal per capita mede os ganhos de pessoas reais, em oposição aos das corporações. Inclui, portanto, salários e vencimentos, mas também dividendos e lucros que acionistas e proprietários de empresas recebem das suas companhias. Desde que esta estatística começou a ser registada, em 1929, o rendimento pessoal nos Estados Unidos, em dólares constantes per capita, aumentou enormemente, com apenas quedas breves durante a Grande Depressão e nas principais recessões. Ao longo das últimas nove décadas, os rendimentos reais médios dos americanos aumentaram mais de cinco vezes. Isto aconteceu apesar de reduções substanciais no número de horas trabalhadas.¹³⁹ O rendimento pessoal mediano — que representa a pessoa exatamente a meio da distribuição nacional de rendimentos

— não cresceu tão rapidamente. No entanto, os rendimentos medianos reais continuam a aumentar de forma constante em termos absolutos: de 27.273 dólares em 1984 para 42.488 dólares em 2019, tudo em valores ajustados para 2023, ou seja, antes da pandemia.¹⁴⁰

Estes ganhos subestimam significativamente os benefícios que foram efetivamente alcançados, pois não refletem o facto de que, como já foi referido, muitos bens, como os aparelhos eletrónicos, custam agora muito menos do que antes — e muitos serviços extremamente valiosos, como os motores de busca e as redes sociais, são oferecidos gratuitamente aos seus utilizadores. Além disso, a globalização disponibilizou uma seleção muito mais ampla de produtos e serviços do que aquela a que as pessoas tinham acesso em 1929. É difícil atribuir um valor monetário à variedade vertiginosa disponível para os consumidores modernos, em comparação com as décadas passadas. Mesmo que só possa comer comida chinesa ou mexicana numa determinada refeição, provavelmente preferirá ter essa escolha em vez de apenas uma única opção. Esta variedade influenciou inúmeras áreas da vida. Em vez de três canais de televisão, temos centenas. Em vez de algumas frutas no supermercado, temos frutas fora de época trazidas do hemisfério oposto. Em vez de alguns milhares de livros numa livraria, podemos escolher entre milhões na Amazon.

Estas opções ajudam todos a satisfazer melhor as suas preferências, mas são especialmente importantes para as pessoas com gostos e interesses invulgares. Graças à economia globalizada, tornada possível pela tecnologia da informação, se gosta de

coleccionar caleidoscópios antigos, pode procurá-los no eBay e comprá-los a partir de qualquer lugar do mundo. E se for uma criança interessada em matemática e ciência, pode ver horas de programas educativos que alimentam a sua curiosidade, em vez de ficar preso a ver o Gunsmoke* na única televisão da família — como era comum na minha geração. A maturação da impressão 3D e, eventualmente, da nanotecnologia, acelerará exponencialmente esta diversificação das nossas escolhas nas próximas décadas.



Fontes: Bureau of Economic Analysis; Gabinete Nacional de Investigação Económica; Português Alexander Klein, "Novas estimativas estaduais do rendimento pessoal nos Estados Unidos, 1880–1910", in *Research in Economic History*, vol. 29ª edição. Christopher Hanes e Susan Wolcott (Bingley, Reino Unido: Emerald Group, 2013); Reserva Federal

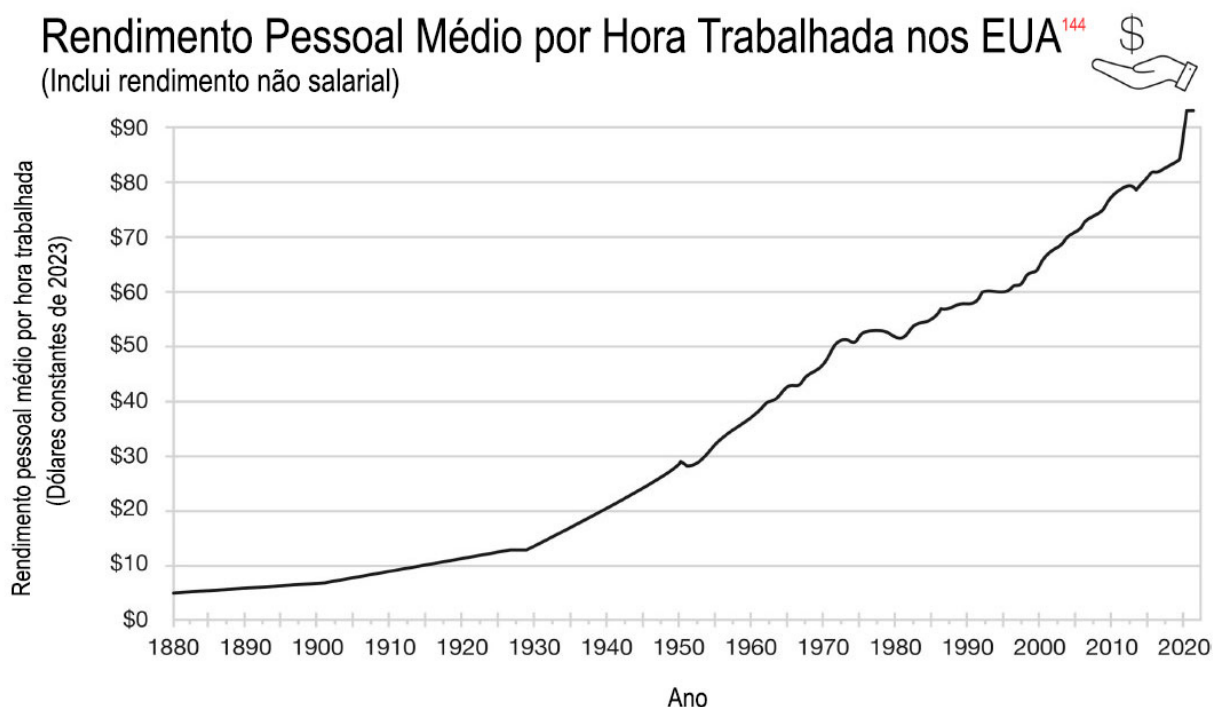
* "Gunsmoke" é uma série de rádio e televisão americana do género western, criada por Norman Macdonnell e John Meston. A história desenrola-se em Dodge City, Kansas, durante o Velho Oeste, e segue o delegado Matt Dillon, que enfrenta foras-da-lei e protege a cidade. Na versão para rádio, o personagem foi interpretado por William Conrad, enquanto na televisão foi vivido por James Arness.

A série de rádio estreou em 1952 e foi transmitida até 1961. Já a versão televisiva começou em 1955 e teve uma longa duração de 20 temporadas, com 635 episódios, tornando-se um marco na história da televisão americana. Foi uma das séries mais populares do seu tempo e ganhou vários prémios, incluindo 15 Primetime Emmy Awards.

O rendimento anual é uma métrica útil, mas torna-se ainda mais informativa quando considerada à luz do tempo que as pessoas despendem a trabalhar. O rendimento pessoal real por hora, em dólares constantes, tem aumentado de forma constante nos Estados Unidos, passando de cerca de 5 dólares por hora em 1880 para cerca de 93 dólares por hora em 2021.¹⁴² Importa notar, contudo, que o rendimento pessoal não se limita aos salários e ordenados. Inclui também rendimentos de investimentos, lucros provenientes de negócios próprios, bem como benefícios estatais e pagamentos pontuais, como o estímulo financeiro concedido durante a pandemia de 2020. Assim, o rendimento pessoal por hora é consistentemente mais elevado do que as medidas que consideram apenas salários e ordenados por hora. Esta métrica revela-se útil porque reflete como os rendimentos não salariais estão a constituir uma fatia cada vez maior do rendimento pessoal total, demonstrando de forma mais precisa como a prosperidade económica total está a crescer, mesmo quando o trabalhador médio passa menos tempo a trabalhar.

O gráfico seguinte mostra como o rendimento real por hora de trabalho tem vindo a aumentar de forma constante nos Estados Unidos — mesmo durante períodos de turbulência económica. Embora não existam dados fiáveis relativos ao ponto mais baixo da Grande Depressão, parece que o rendimento por hora não sofreu tão drasticamente nesse período como outras métricas de desempenho económico. A razão para tal é que a queda do rendimento pessoal per capita durante a Depressão resultou de uma diminuição do rendimento total auferido pela população. Como a população (o denominador) não sofreu grandes alterações, isso

traduziu-se inevitavelmente em ganhos per capita mais baixos. Contudo, quando as pessoas perdem os seus empregos, perdem simultaneamente rendimento e trabalham menos horas. Esta redução no denominador fez com que o rendimento por hora se mantivesse estável e até crescesse durante a Depressão. Outra forma de ver a questão é que muitas pessoas perderam totalmente os seus empregos, mas os salários não desceram significativamente para aqueles que conseguiram manter o seu posto de trabalho.



Principais fontes: Projeto Maddison; Gabinete de Análise Económica; Português Stanley Lebergott, "Força de trabalho e emprego, 1800–1960", in *Produção, emprego e produtividade nos Estados Unidos após 1800*, ed. Dorothy S. Brady (Washington, DC: Gabinete Nacional de Investigação Económica, 1966); Português Alexander Klein, "Novas estimativas estaduais do rendimento pessoal nos Estados Unidos, 1880–1910", in *Research in Economic History*, vol. 29ª edição. Christopher Hanes e Susan Wolcott (Bingley, Reino Unido: Emerald Group, 2013); Português Michael Huberman e Chris Minns, "Os tempos não estão a mudar: dias e horas de trabalho no Velho e no Novo Mundo, 1870–2000", *Explorations in Economic History* 44, n.º 1. 4 (12 de Julho de 2007)

No final do século XIX, o trabalhador americano médio passava quase três mil horas por ano no trabalho.¹⁴⁴ A partir de cerca de

1910, esse número começou a diminuir rapidamente, à medida que regulamentações e sindicatos laborais reduziram a duração dos dias de trabalho e proporcionaram mais tempo livre aos trabalhadores.¹⁴⁵ Além disso, os empregadores perceberam que os funcionários descansados eram mais produtivos e cometiam menos erros, pelo que fazia sentido distribuir as horas de trabalho por um maior número de trabalhadores, em contraste com o início da Revolução Industrial. As horas médias trabalhadas caíram para menos de 1.750 por ano durante a Grande Depressão, uma vez que as empresas tiveram de reduzir drasticamente as horas de trabalho, mesmo dos empregados que mantiveram os seus postos.¹⁴⁶ Durante a Segunda Guerra Mundial e o boom do pós-guerra, os americanos voltaram em força às fábricas e aos escritórios, com uma média superior a 2.000 horas por ano.¹⁴⁷ Desde então, as horas de trabalho têm vindo a diminuir gradual mas consistentemente nos Estados Unidos, regressando a níveis aproximados aos da Depressão.¹⁴⁸ A diferença é que, hoje em dia, essas reduções devem-se sobretudo a escolhas individuais, como o trabalho a tempo parcial e outras opções que promovem um equilíbrio mais saudável entre vida profissional e pessoal. Em alguns países europeus, a redução das horas de trabalho tem sido ainda mais acentuada.¹⁴⁹

As mudanças nos tipos de empregos em demanda têm motivado os millennials* e a Geração Z**, mais do que outras gerações, a procurar carreiras criativas, muitas vezes empreendedoras, e têm-lhes proporcionado a liberdade de trabalhar remotamente, o que elimina o tempo e os custos de deslocação, mas pode levar a uma diluição das fronteiras entre trabalho e vida pessoal. A pandemia de COVID-19 provocou uma mudança súbita e dramática na força de trabalho em direção ao teletrabalho e a outros modelos alternativos da relação entre empregador e empregado. Num estudo, 98 por cento dos inquiridos afirmaram querer ter a opção de trabalhar remotamente pelo resto das suas carreiras.¹⁵⁰ À medida que a

* Os "millennials", também chamados de Geração Y, são indivíduos nascidos entre aproximadamente 1980 e 1995. Esta geração é marcada por ter crescido durante um período de rápida evolução tecnológica, com a chegada da internet, computadores e smartphones.

Os millennials destacam-se por características como:

- **Nativos digitais**, habituados a utilizar tecnologia desde cedo.
- **Ambiciosos**, valorizando o progresso pessoal e profissional.
- **Globalizados**, com maior sensibilidade em relação à diversidade e questões ambientais.

Além disso, enfrentaram eventos marcantes como crises económicas e transformações sociais, que moldaram o seu modo de ser e pensar.

** Geração Z, também conhecida como Gen Z, inclui pessoas nascidas entre 1997 e 2012. Esta geração cresceu num mundo altamente digital e conetado, sendo os primeiros verdadeiros nativos digitais. Aqui estão algumas características marcantes da Geração Z em Portugal:

- **Práticos e realistas**: Cresceram num contexto de crises económicas e eventos globais como a pandemia, o que moldou uma visão cautelosa e focada na segurança financeira.
- **Valorizam o equilíbrio**: Procuram um estilo de vida que combine bem-estar físico e emocional, com flexibilidade no trabalho e tempo para hobbies e autocuidado.
- **Autonomia e propósito**: Muitos preferem carreiras independentes ou empreendedoras, rejeitando modelos tradicionais de chefia intermédia.
- **Consumo consciente**: Tendem a optar por produtos e marcas que promovam sustentabilidade e responsabilidade social.

Esta geração está a redefinir o mercado de trabalho e o consumo, trazendo novas exigências e oportunidades.

mudança tecnológica permite que cada vez mais empregos sejam realizados à distância, é provável que esta tendência se intensifique.

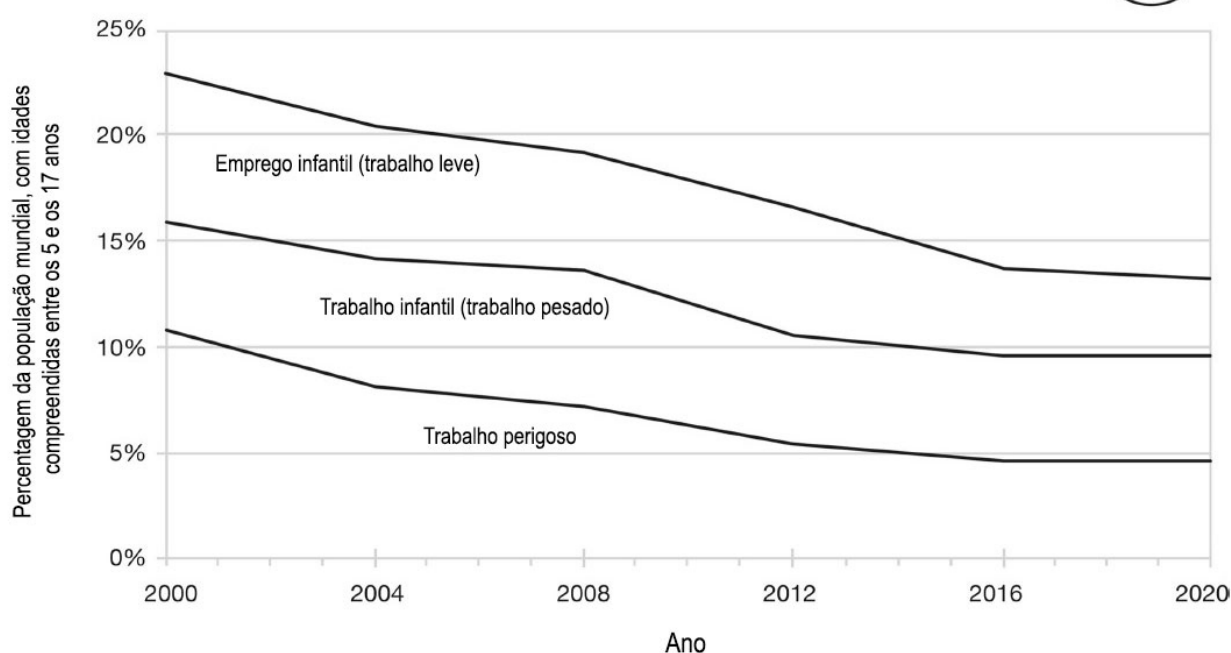


Fontes: Michael Huberman e Chris Minns, "Os tempos não estão a mudar: dias e horas de trabalho no Velho e no Novo Mundo, 1870–2000", *Explorations in Economic History* 44, n.º 1. 4 (12 de julho de 2007); Universidade de Groningen e Universidade da Califórnia, Davis; Reserva Federal; Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

Mais um indicador fundamental do bem-estar socioeconómico é o trabalho infantil. Quando as crianças são forçadas a trabalhar devido à pobreza, perdem o acesso ao ensino e veem o seu potencial a longo prazo severamente reduzido. Felizmente, o trabalho infantil tem vindo a diminuir de forma constante ao longo do século XXI. A Organização Internacional do Trabalho utiliza três categorias encadeadas para medir o progresso nesta área.¹⁵² A categoria mais ampla é o "emprego infantil", que inclui crianças a trabalhar algumas horas em tarefas leves, como em quintas

familiares ou negócios geridos pela família; embora isto possa interferir com o ensino, trata-se de uma forma relativamente branda de trabalho infantil. A segunda categoria, “trabalho infantil” propriamente dito, abrange crianças a desempenhar funções semelhantes às de um adulto, tanto em termos de horas como da exigência física do trabalho. A terceira e mais restrita categoria é o “trabalho perigoso”, que corresponde a trabalho infantil em condições particularmente arriscadas. Estes empregos incluem mineração, desmantelamento de navios (para extração de materiais e eliminação) e manuseamento de resíduos. De 2000 a 2016, a percentagem estimada de crianças no mundo a exercer trabalho perigoso caiu de 11,1 por cento para 4,6 por cento, embora as perturbações económicas causadas pela COVID-19 pareçam ter interrompido esse progresso.¹⁵³

Declínio do trabalho infantil em todo o mundo¹⁵⁵

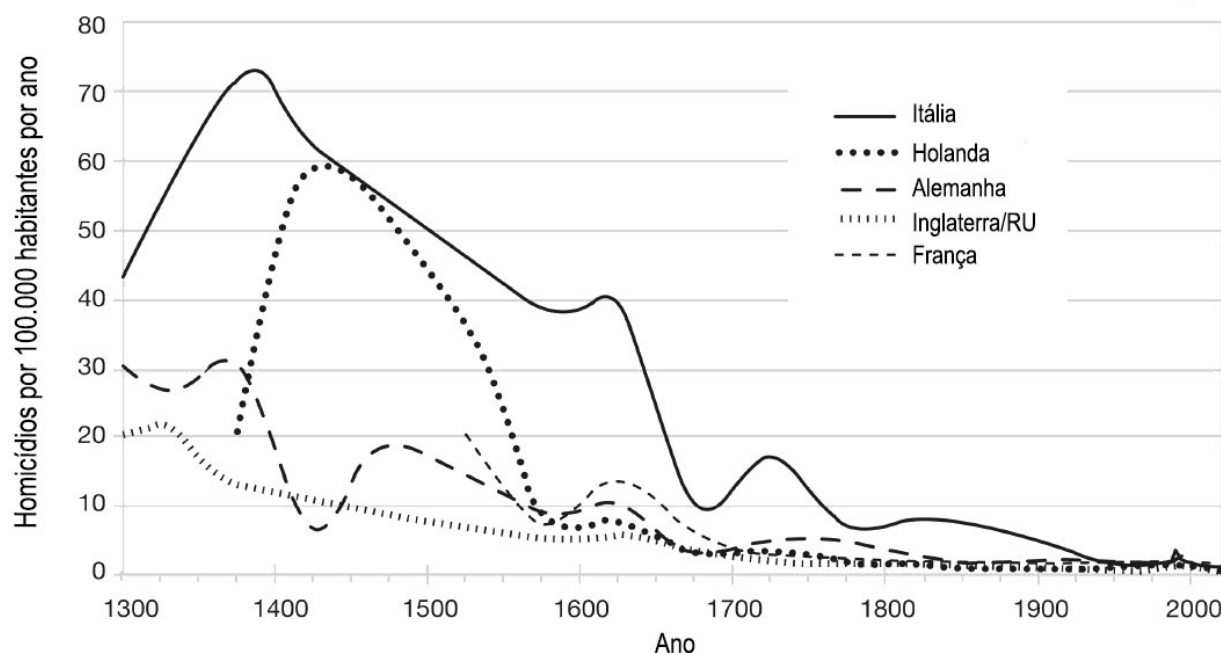


Fontes: Organização Internacional do Trabalho; UNICEF

7. Declínio da Violência

O aumento da prosperidade material tem uma relação mutuamente reforçadora com a diminuição da violência. Pessoas que têm muito a perder em termos económicos possuem incentivos mais fortes para evitar conflitos, e quando podem perspetivar vidas longas e seguras, têm boas razões para fazer investimentos a longo prazo que beneficiam a sociedade. Na Europa Ocidental, as taxas de homicídio têm vindo a cair de forma consistente desde, pelo menos, o século XIV.¹⁵⁵ Ao longo destes períodos de tempo alargados, o declínio tem sido exponencial, mesmo apesar do desenvolvimento de armas pessoais cada vez mais mortíferas. Nos países da Europa Ocidental para os quais existem bons registos desde o período medieval, os homicídios anuais por 100.000 pessoas caíram de uma média de cerca de trinta e três nos séculos XIV e XV para menos de um atualmente — uma queda superior a 97 por cento.¹⁵⁶ Note-se que estas estatísticas incidem sobre formas de homicídio “comuns”, como assassinato e homicídio involuntário, e não incluem guerra ou genocídio.

Taxas de homicídio na Europa Ocidental desde 1300 ¹⁵⁸



Fontes: O nosso mundo em dados (Roser e Ritchie); Português Manuel Eisner, “Das espadas às palavras: a mudança macro no autocontrolo prevê a variação a longo prazo nos níveis de homicídio?,” *Crime and Justice* 43, no. 1 (setembro de 2014); Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime

ESTE GRÁFICO BASEIA-SE NO EXCELENTE TRABALHO DE MAX ROSER E HANNAH RITCHIE NO OUR WORLD IN DATA, MAS DIFERE NA SELEÇÃO RECENTE DE FONTES. OS DADOS ANTERIORES A 1990 SÃO DE MANUEL EISNER, “FROM SWORDS TO WORDS: DOES MACRO-LEVEL CHANGE IN SELF-CONTROL PREDICT LONG-TERM VARIATION IN LEVELS OF HOMICIDE?,” MAS EM VEZ DE UTILIZAR DADOS DA ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE PARA 1990–2018, ESTE GRÁFICO UTILIZA DADOS DE 1990–2020 DO GABINETE DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE DROGAS E CRIME. ISTO PORQUE OS DADOS DO UNODC SÃO MELHOR CORROBORADOS POR OUTRAS FONTES E CORRESPONDEM MAIS DE PERTO A UMA VASTA GAMA DE ESTIMATIVAS OFICIAIS DA APLICAÇÃO DA LEI.

Nos Estados Unidos, os homicídios e outras formas de crime violento têm vindo a diminuir a longo prazo desde cerca de 1991. Embora os homicídios nos EUA tenham aumentado de um mínimo de 4,4 por 100.000 habitantes em 2014 para 6,8 em 2021 (os dados mais recentes à data da escrita), este pico de curto prazo representa ainda assim uma queda superior a 30 por cento — o valor era de 9,8 em 1991. ¹⁵⁸ Durante dois períodos do século XX,

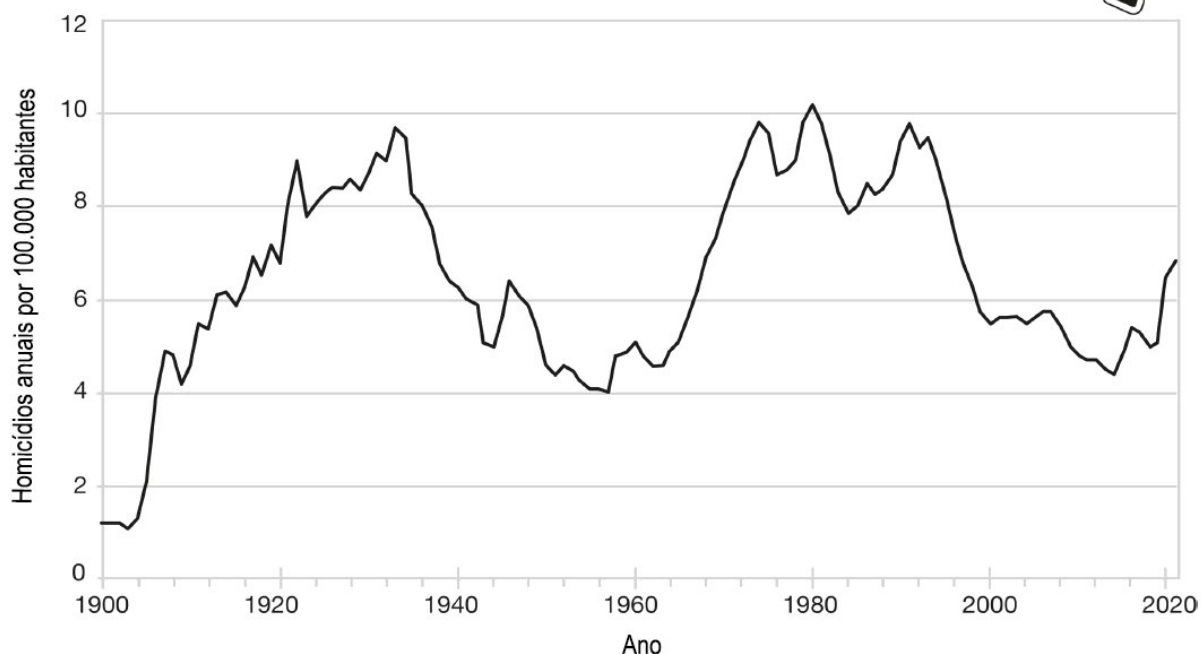
no entanto, os homicídios e o crime violento em geral foram cerca do dobro do que são hoje. O primeiro ocorreu nas décadas de 1920 e 1930, em grande parte devido à Lei Seca e às organizações criminosas que surgiram em torno do comércio ilegal de bebidas alcoólicas.¹⁵⁹ A segunda vaga de violência deu-se nas décadas de 1970, 1980 e 1990, quando o tráfico de narcóticos e outras drogas ilegais voltou a trazer violência para as ruas das cidades americanas.¹⁶⁰

Desde então, vários fatores desempenharam papéis importantes no declínio da violência. Com o crime violento nos Estados Unidos a atingir máximos históricos no início da década de 1980, os criminologistas começaram a procurar novas soluções. Os acadêmicos George Kelling e James Q. Wilson observaram que crimes de baixo nível, como graffiti e vandalismo, faziam com que as comunidades se sentissem inseguras e levavam algumas pessoas a acreditar que poderiam cometer crimes mais graves e violentos sem consequências.¹⁶¹ Esta ideia ficou conhecida como a “teoria das janelas partidas” e influenciou uma nova tendência na atuação policial que passou a dar ênfase à repressão desses delitos menores como forma de prevenir crimes mais graves. Isto foi combinado com uma mudança para abordagens mais proativas na prevenção do crime, como o aumento do patrulhamento a pé em bairros com altos índices de criminalidade e o uso inteligente de modelos baseados em dados para determinar onde os recursos policiais poderiam ser mais eficazmente aplicados. Em conjunto, estes fatores parecem ter desempenhado um papel importante na redução do crime em todo o país durante as décadas de 1990 e 2000. No entanto, não vieram isentos de custos. Em algumas

idades, a aplicação rigorosa da teoria das janelas partidas foi levada ao extremo e causou danos desproporcionais às comunidades minoritárias. Durante a década de 2020, o desafio para as forças policiais será duplo: continuar a tendência de redução do crime a longo prazo, ao mesmo tempo que se enfrentam as disparidades raciais e outras injustiças relacionadas. Embora não exista uma solução única para estas questões, tecnologias como câmaras corporais nos polícias, telemóveis dos cidadãos, detetores automáticos de tiros e análise de dados impulsionada por IA podem desempenhar um papel positivo — se forem utilizadas com responsabilidade.

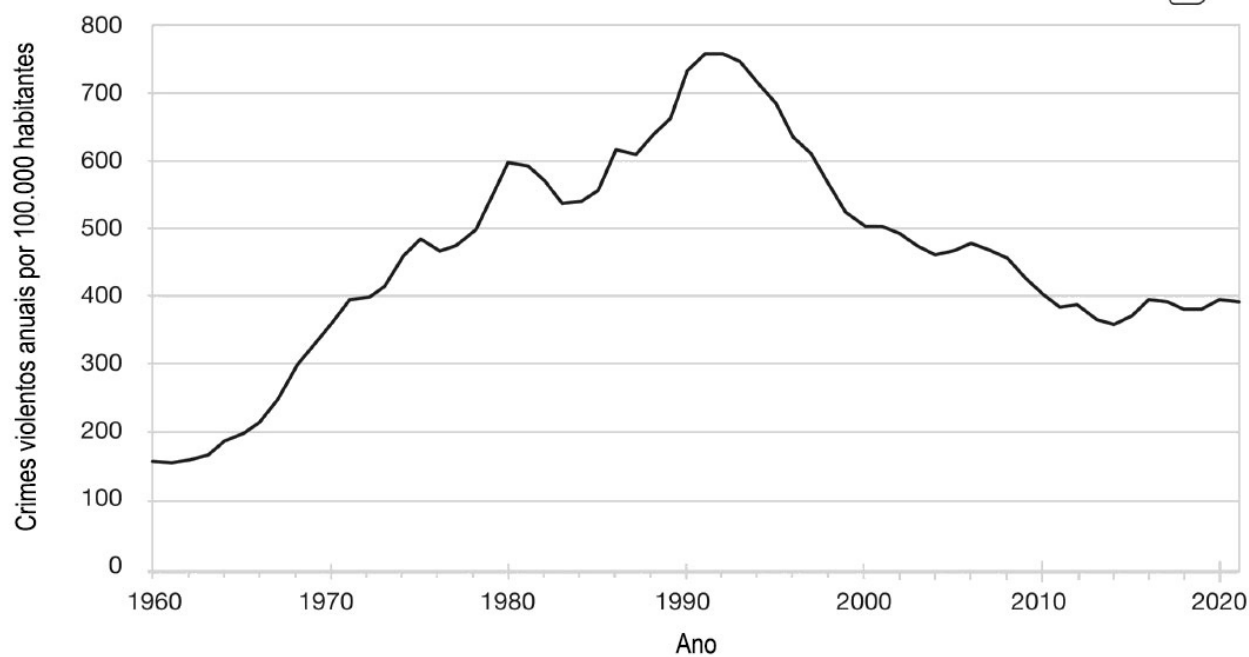
Outro fator que só agora começa a ser devidamente reconhecido é a relação entre poluição e criminalidade. O efeito da toxicidade ambiental no cérebro, especialmente provocada pelo chumbo, foi mal compreendido durante a maior parte do século XX. A exposição ao chumbo proveniente dos escapes dos automóveis e das tintas domésticas teve um impacto negativo no desenvolvimento cognitivo das crianças. Embora seja impossível saber se esse envenenamento crónico foi responsável por um crime específico, ao nível da população como um todo, provocou um aumento estatístico da criminalidade violenta — provavelmente ao reduzir o controlo dos impulsos. Desde cerca da década de 1970, a implementação de regulamentações ambientais mais rigorosas limitou a quantidade de chumbo e outras toxinas que chegam ao cérebro das crianças, e considera-se que isso também contribuiu para a redução dos níveis de violência.¹⁶²

Homicídio nos Estados Unidos¹⁶⁴



Fontes: Federal Bureau of Investigation; Departamento de Estatísticas da Justiça

Crimes violentos nos Estados Unidos¹⁶⁵



Fontes: Federal Bureau of Investigation; Departamento de Estatísticas da Justiça

No seu livro de 2011, *The Better Angels of Our Nature*, Steven Pinker apresenta mais evidências de que as mortes por homicídio na Europa caíram cerca de cinquenta vezes desde a Idade Média — e, em alguns casos, ainda mais.¹⁶⁵ Por exemplo, em Oxford, no século XIV, estima-se que ocorriam cerca de 110 homicídios por 100.000 pessoas por ano, enquanto que em Londres atualmente há menos de um homicídio por 100.000 pessoas por ano.¹⁶⁶ Pinker estima que as mortes violentas no geral diminuíram por um fator de aproximadamente quinhentos desde os tempos pré-históricos.¹⁶⁷

Mesmo os grandes conflitos históricos do século XX não foram tão letais, em termos proporcionais, como a violência contínua nas condições pré-estatais do passado humano. Pinker estudou vinte e sete sociedades não desenvolvidas ao longo da história, sem um Estado formal — uma combinação de caçadores-recoletores e horticultores-caçadores que provavelmente representam a maioria das comunidades humanas durante a pré-história.¹⁶⁸ Estima que essas sociedades apresentavam uma taxa média de mortes em combate de 524 por 100.000 pessoas por ano. Em comparação, o século XX testemunhou duas guerras mundiais — que incluíram genocídios, bombardeamentos atômicos e a maior escala de violência organizada jamais vista —, e ainda assim, na Alemanha, Japão e Rússia, três dos países mais atingidos por essa carnificina, as taxas anuais de mortes em guerra durante esse século foram de apenas 144, 27 e 135 por 100.000, respectivamente. Os Estados Unidos, por sua vez, atravessaram o século XX com apenas 3,7 mortes anuais por guerra por 100.000 pessoas, apesar de se terem envolvido em conflitos em várias partes do mundo.

Ainda assim, grande parte do público percebe incorretamente que a violência está a aumentar. Pinker atribui esta percepção, em grande medida, àquilo a que chama “miopia histórica” — uma tendência para as pessoas se concentrarem nos acontecimentos mais recentes, que recebem maior atenção, permanecendo alheias a episódios de violência muito mais graves ocorridos no passado.¹⁶⁹ Trata-se, essencialmente, da heurística da disponibilidade em ação. Estas percepções distorcidas devem-se, em parte, às tecnologias de documentação: temos hoje acesso fácil a vídeos coloridos e dramáticos de acontecimentos violentos recentes. Compare-se isso com as fotografias a preto e branco do século XIX ou, mais atrás ainda, com as descrições escritas e as poucas pinturas das épocas anteriores.

Tal como eu, Pinker atribui este declínio dramático da violência a círculos virtuosos. À medida que as pessoas se tornam mais confiantes de que estarão livres da violência, aumenta o incentivo para construir escolas, escrever e ler livros — o que, por sua vez, encoraja o uso da razão em vez da força para resolver problemas, o que reduz ainda mais a violência. Temos vivido aquilo a que o filósofo Peter Singer chamou um “círculo em expansão” de empatia — que alargou o nosso sentido de identificação de grupos restritos, como clãs, a nações inteiras, depois a povos estrangeiros e, até, a animais não humanos.¹⁷⁰ Tem havido também um papel crescente do Estado de direito e das normas culturais que desencorajam a violência.

A chave para o futuro está em reconhecer que estes círculos virtuosos são, fundamentalmente, impulsionados pela tecnologia.

Onde outrora os seres humanos apenas se identificavam com pequenos grupos, a tecnologia da comunicação (primeiro os livros, depois a rádio e a televisão, mais tarde os computadores e a internet) permitiu-nos trocar ideias com círculos cada vez mais amplos de pessoas, e descobrir o que temos em comum. A capacidade de ver vídeos comoventes de desastres em terras distantes pode contribuir para a miopia histórica, mas também serve como uma poderosa ferramenta para ativar a nossa empatia natural e expandir a nossa preocupação moral a toda a espécie humana.

Além disso, quanto mais a riqueza cresce e a pobreza diminui, maiores são os incentivos que as pessoas têm para cooperar — e mais são aliviadas as lutas de soma zero por recursos limitados. Muitos de nós temos uma tendência profundamente enraizada para encarar a luta por recursos escassos como uma causa inevitável de violência e como uma característica intrínseca da natureza humana. No entanto, embora esta tenha sido a história de grande parte da humanidade, não creio que seja um destino permanente. A revolução digital já começou a inverter as condições de escassez em muitas das coisas que podem ser facilmente representadas digitalmente — desde pesquisas na web até ligações nas redes sociais. Disputar uma cópia física de um livro pode parecer mesquinho, mas é compreensível até certo ponto. Duas crianças podem lutar por uma banda desenhada impressa favorita porque apenas uma pode tê-la e lê-la de cada vez. Mas a ideia de pessoas a lutarem por um ficheiro PDF é quase cómica — porque o facto de você ter acesso a ele não implica que eu não o possa ter também.

Podemos criar tantas cópias quantas forem necessárias, essencialmente a custo zero.

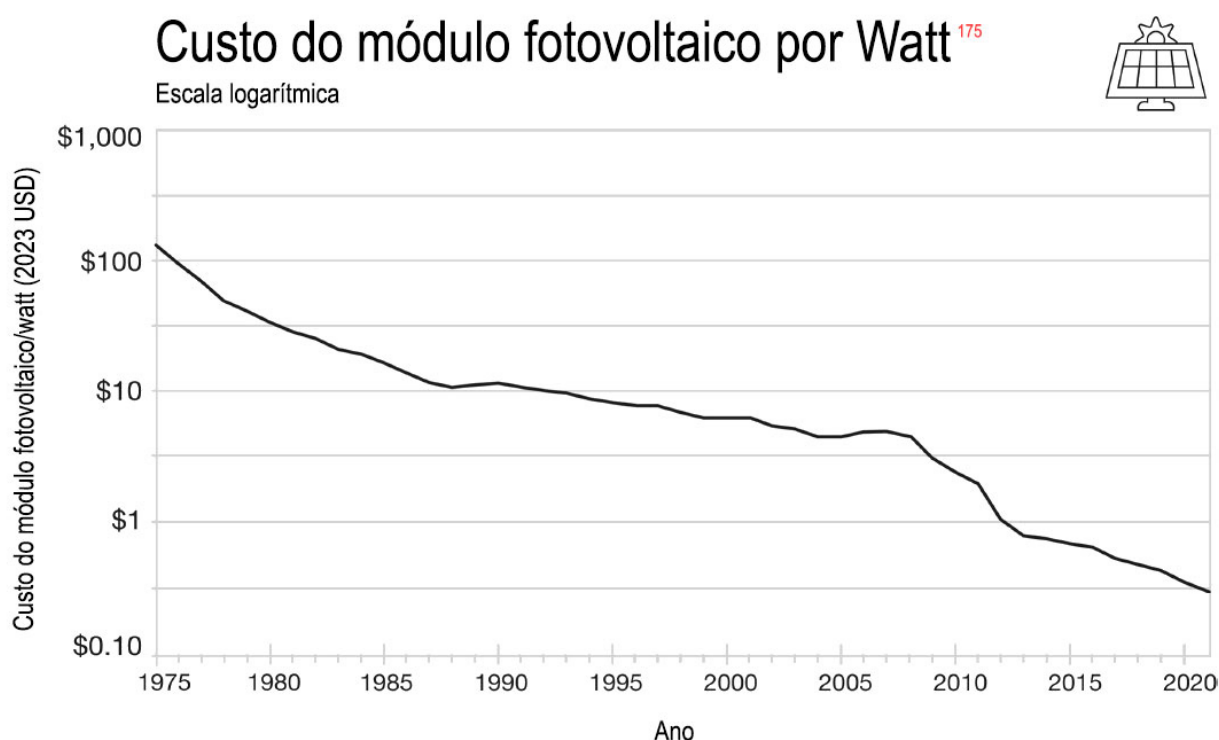
Uma vez que a humanidade disponha de energia extremamente barata (proveniente sobretudo da energia solar e, eventualmente, da fusão nuclear) e de robótica inteligente alimentada por IA, muitos tipos de bens tornar-se-ão tão fáceis de reproduzir que a noção de alguém recorrer à violência por causa deles parecerá tão absurda como, hoje, lutar por um ficheiro PDF. Deste modo, a melhoria de milhões de vezes nas tecnologias de informação entre agora e a década de 2040 impulsionará uma transformação profunda em inúmeros outros aspetos da sociedade.

8. Crescimento da Energia Renovável

Praticamente todos os aspetos da nossa civilização tecnológica requerem energia, mas a nossa prolongada dependência dos combustíveis fósseis é insustentável por duas razões principais. A mais óbvia é que esta dependência gera poluição tóxica e emissões de gases com efeito de estufa; a segunda, é que nos prende a recursos escassos, cada vez mais dispendiosos de extrair, mesmo quando a necessidade da humanidade por energia barata está a disparar. Felizmente, os custos da energia renovável amiga do ambiente têm vindo a cair de forma exponencial, à medida que aplicamos tecnologias cada vez mais sofisticadas ao design dos materiais e mecanismos subjacentes. Por exemplo, ao longo da última década, temos utilizado supercomputação para descobrir novos materiais tanto para células solares como para

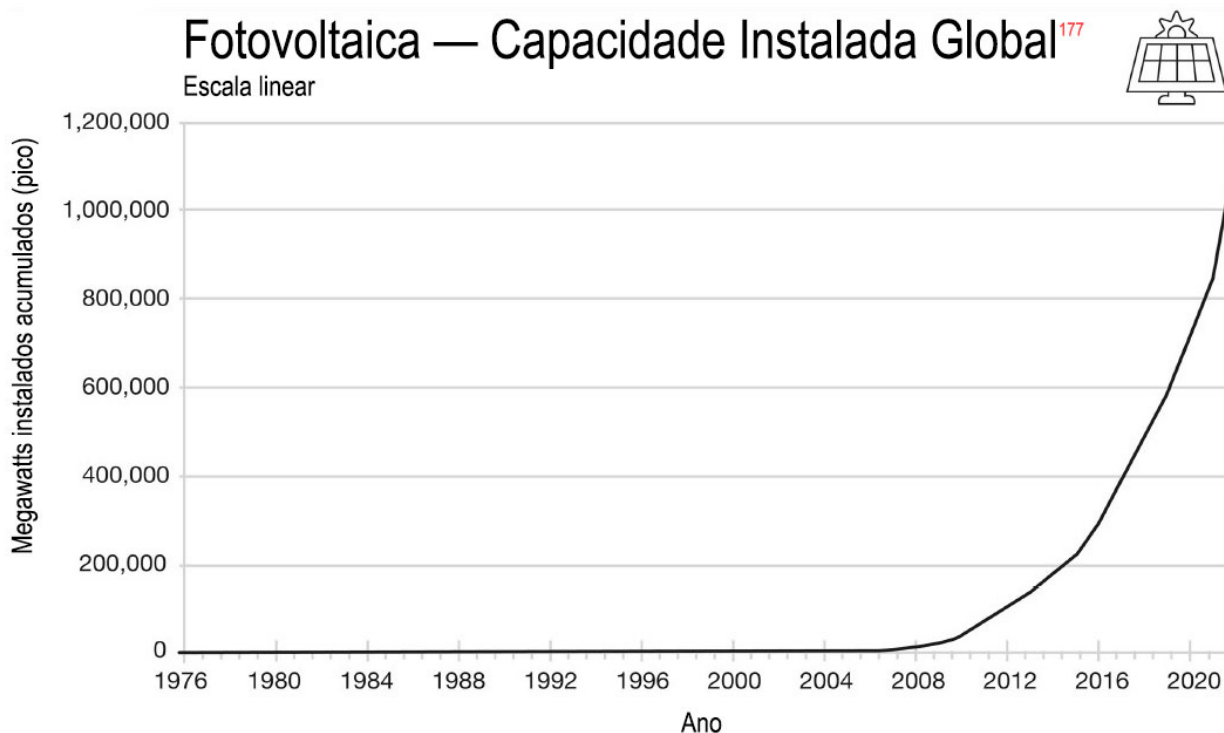
armazenamento de energia — e, nos últimos anos, redes neuronais profundas também têm sido empregues para esse fim.¹⁷¹

Como resultado destas reduções de custo contínuas, a quantidade total de energia obtida a partir de fontes renováveis — solar, eólica, geotérmica, mareomotriz e biocombustíveis — também tem crescido exponencialmente.¹⁷² A energia solar foi responsável por cerca de 3,6 por cento da eletricidade produzida em 2021, e essa proporção tem vindo a duplicar, em média, a cada vinte e oito meses desde 1983.¹⁷³ Iremos explorar este ponto com mais detalhe ainda neste capítulo.



Principais fontes: O nosso mundo em dados; Português Gregory F. Nemet, "Monitorização provisória da dinâmica de custos para tecnologias energéticas com apoio público", Política Energética 37, n.º 1. 3 (Março de 2009); IRENA

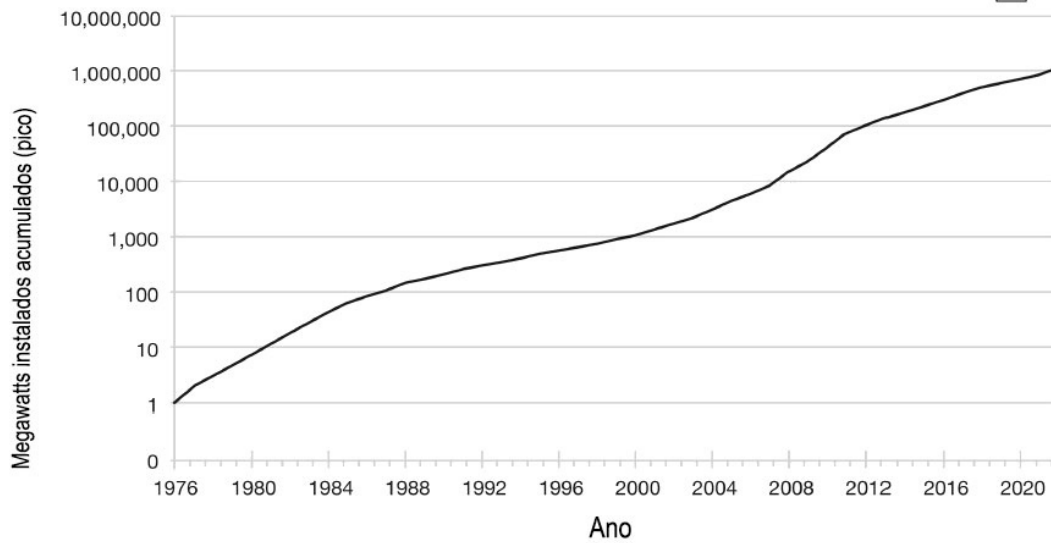
COMO MOSTRA ESTE GRÁFICO LOGARÍTMICO, OS CUSTOS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR WATT TÊM VINDO A DIMINUIR EXPONENCIALMENTE HÁ QUASE CINCO DÉCADAS, UMA TENDÊNCIA QUE É POR VEZES CONHECIDA COMO LEI DE SWANSON. NOTE-SE QUE, EMBORA O CUSTO DO MÓDULO SEJA A MAIOR COMPONENTE INDIVIDUAL DOS CUSTOS TOTAIS DAS INSTALAÇÕES DE ENERGIA SOLAR, OUTROS FATORES, COMO AS LICENÇAS E A MÃO-DE-OBRA DE INSTALAÇÃO, PODEM ELEVAR OS CUSTOS TOTAIS ATÉ CERCA DO TRIPLO DO CUSTO DO MÓDULO.¹⁷⁵ E ENQUANTO OS CUSTOS DOS MÓDULOS TÊM VINDO A DESCER MUITO RAPIDAMENTE, ESTES OUTROS FATORES TÊM VINDO A DIMINUIR MAIS LENTAMENTE. A IA E A ROBÓTICA PODEM REDUZIR OS CUSTOS DE MÃO-DE-OBRA E DE DESIGN, MAS TAMBÉM PRECISAREMOS DE POLÍTICAS QUE INCENTIVEM O PLANEAMENTO E A OBTENÇÃO DE LICENÇAS EFICIENTES PARA OS SERVIÇOS PÚBLICOS.



Principais fontes: O nosso mundo em dados; IRENA; Português Gregory F. Nemet, "Monitorização provisória da dinâmica de custos para tecnologias energéticas com apoio público", Política Energética 37, n.º 1. 3 (Março de 2009)

Fotovoltaica — Capacidade Instalada Global¹⁷⁸

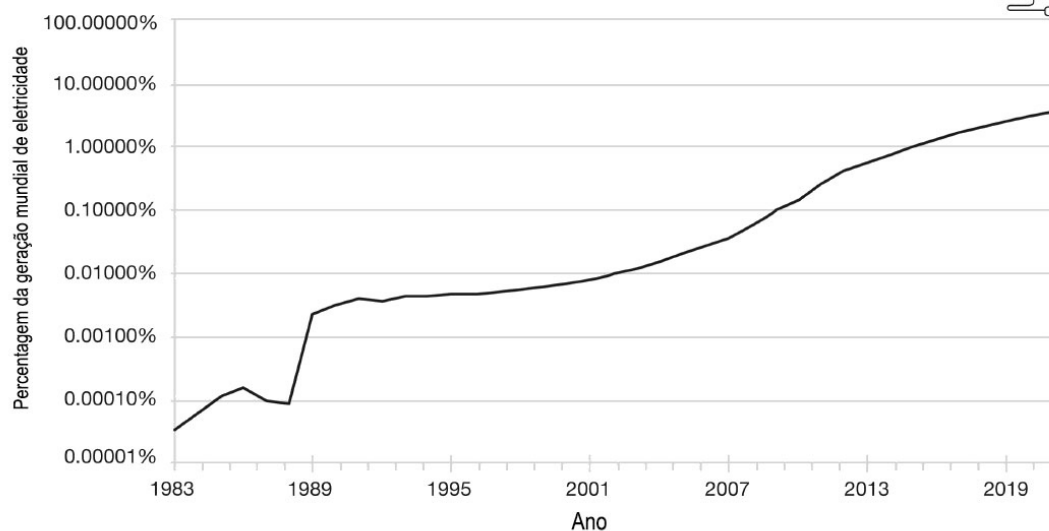
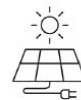
Escala Logarítmica



Principais fontes: O nosso mundo em dados; IRENA; Português Gregory F. Nemet, "Monitorização provisória da dinâmica de custos para tecnologias energéticas com apoio público", Política Energética 37, n.º 1. 3 (Março de 2009)

Percentagem de eletricidade mundial proveniente de energia fotovoltaica¹⁷⁹

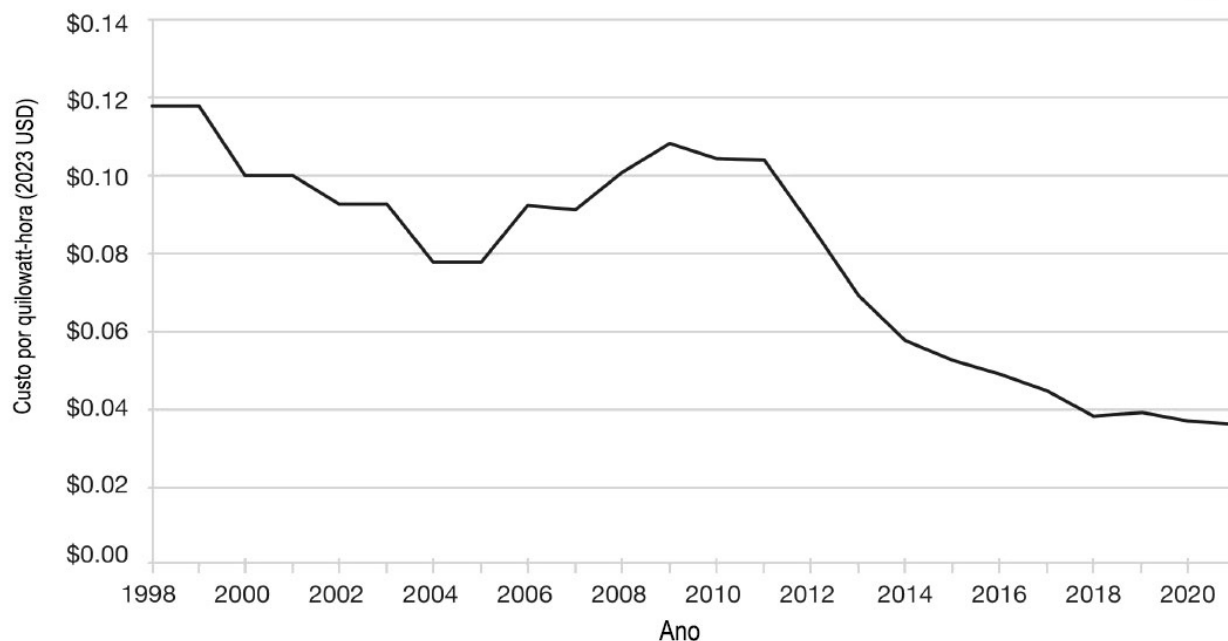
Escala Logarítmica



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; PA; AIE

Custos da energia eólica¹⁸⁰

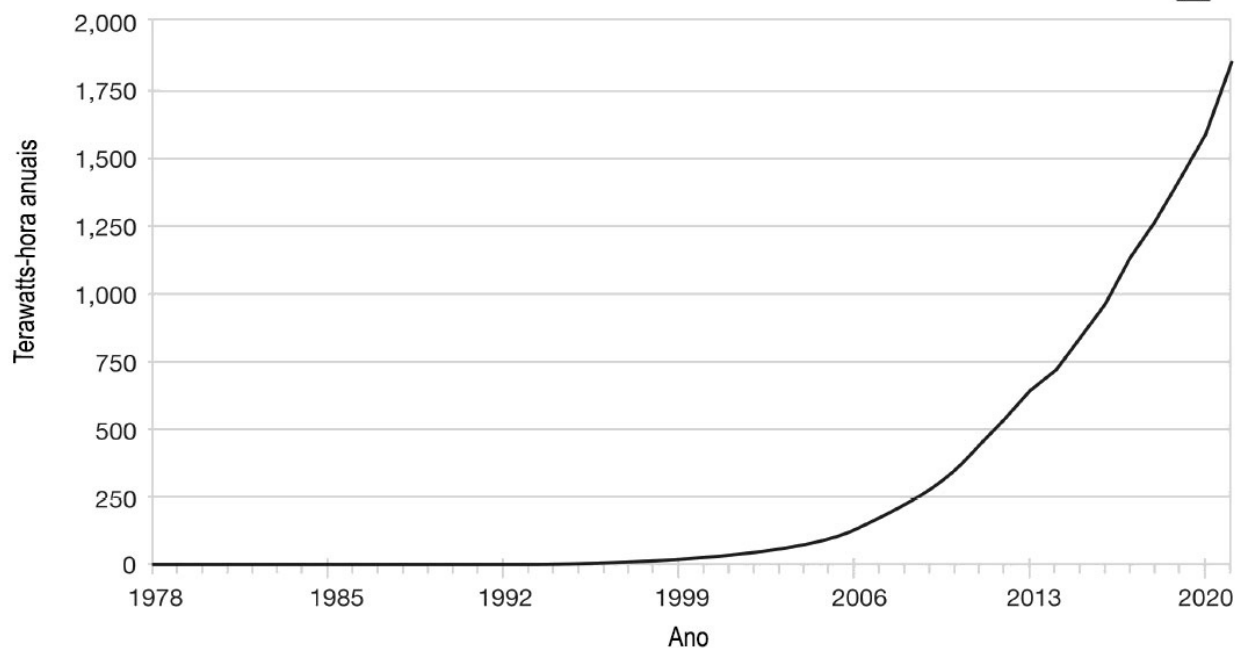
Custos nivelados para projetos de geração terrestre nos EUA



Fonte: Departamento de Energia dos EUA

Geração Mundial de Eletricidade Eólica¹⁸¹

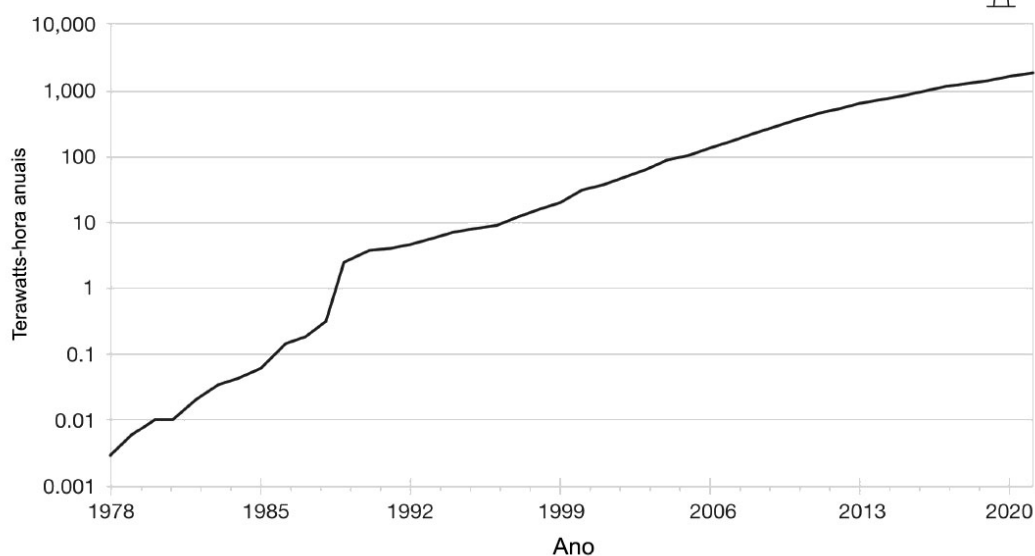
Escala linear



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; PA; Brasa

Geração Mundial de Eletricidade Eólica

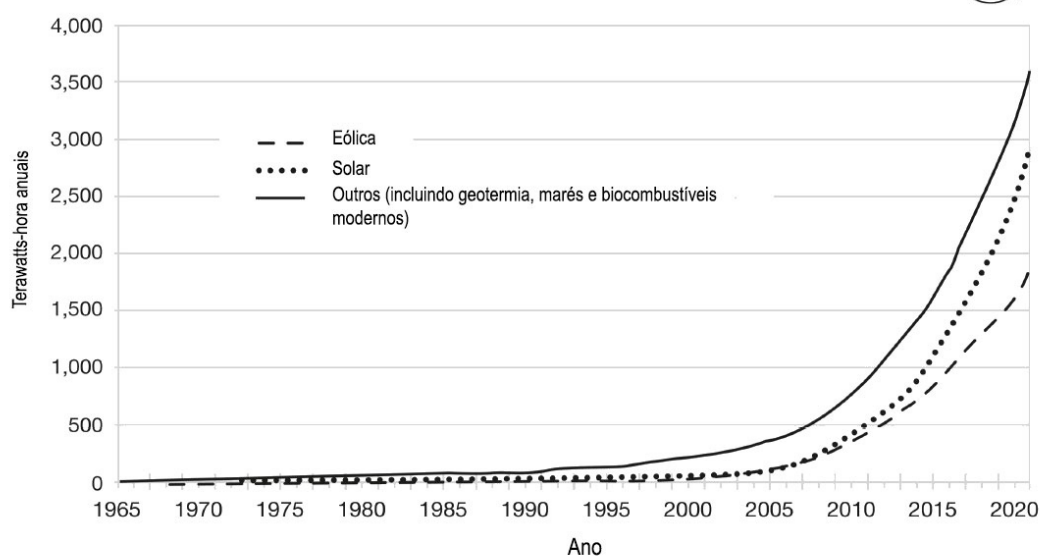
Escala logarítmica



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; PA; Brasa

Terawatt-hora anual de geração mundial de eletricidade renovável¹⁸²

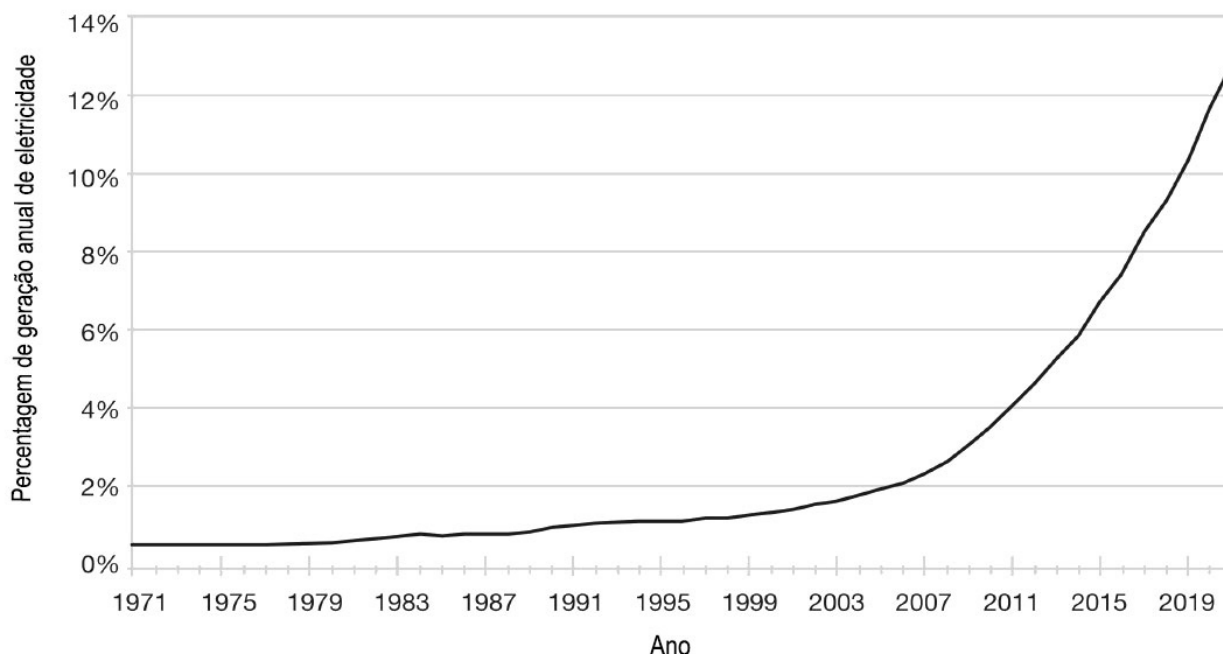
Não incluindo as hidroelétricas



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; BP

Crescimento da Energia Renovável¹⁸³

Energia solar, eólica, maré e biocombustíveis modernos em percentagem do total mundial



Fontes: O Nosso Mundo em Dados; PA; AIE

9. Propagação da Democracia

A energia renovável barata desbloqueará uma grande abundância material, mas a partilha equitativa dessa abundância requer democracia. Aqui encontramos novamente uma sinergia auspiciosa: a tecnologia da informação tem um historial consistente de tornar as sociedades mais democráticas. A expansão da democracia, desde as suas raízes na Inglaterra medieval, acompanha — e provavelmente resulta em grande parte — da ascensão das tecnologias de comunicação em massa. A Magna Carta, que consagrou os direitos das pessoas comuns a não serem aprisionadas injustamente, foi redigida em 1215 e assinada pelo rei João.¹⁸³ No entanto, durante a maior parte da Idade Média, os

direitos dos plebeus eram frequentemente ignorados e a participação política era mínima. Este panorama começou a mudar com a invenção da imprensa de caracteres móveis por Gutenberg, por volta de 1440, e com a sua rápida disseminação. As classes instruídas passaram a poder divulgar notícias e ideias com muito maior eficácia.¹⁸⁴

A imprensa é um excelente exemplo ilustrativo de como a Lei dos Retornos Acelerados se aplica às tecnologias da informação. Como mencionado anteriormente, tecnologias da informação são aquelas que envolvem a recolha, o armazenamento, a manipulação e a transmissão de informação. As ideias humanas são informação. Em termos teóricos, a informação é uma ordenação abstrata que contrasta com a entropia caótica. Para representar informação no mundo real, tornamos objetos físicos ordenados de uma determinada forma — por exemplo, escrevendo letras numa página. Mas a ideia central é que as ideias são formas abstratas de organizar informação, e podem ser representadas em diversos suportes — tábuas de pedra, papel pergaminho, cartões perfurados, fita magnética ou voltagens dentro de um microchip de silício. Poderíamos, em teoria, escrever cada linha do código-fonte do Windows 11 em tábuas de pedra — bastaria um cinzel e muita paciência! Esta é uma imagem cómica, mas ilustra como os suportes físicos são cruciais para a forma como, na prática, conseguimos recolher, armazenar, manipular e transmitir informação. Certas ideias só se tornam viáveis quando conseguimos fazer estas coisas de forma suficientemente eficiente.

Durante grande parte da Idade Média, os livros só podiam ser reproduzidos na Europa por escribas que os copiavam laboriosamente à mão — o oposto da eficiência. Como consequência, transmitir informação escrita — ou seja, ideias — era extremamente dispendioso. De forma geral, quanto mais ideias possui uma pessoa ou uma sociedade, mais fácil se torna criar novas ideias; e isto inclui inovação tecnológica. Portanto, tecnologias que facilitam a partilha de ideias também facilitam a criação de novas tecnologias — algumas das quais irão, por sua vez, tornar ainda mais fácil partilhar ideias. Assim, quando Gutenberg introduziu a imprensa, tornou-se rapidamente muito mais barato partilhar ideias. Pela primeira vez, pessoas da classe média puderam adquirir livros em grande quantidade, desbloqueando vastas reservas de potencial humano. A inovação floresceu e o Renascimento espalhou-se rapidamente pela Europa. Isto deu ainda origem a inovações adicionais no próprio processo de impressão, e já no início do século XVII os livros eram várias milhares de vezes mais baratos do que tinham sido antes de Gutenberg.

A disseminação do conhecimento trouxe riqueza e poder político, e órgãos legislativos como a Câmara dos Comuns inglesa tornaram-se muito mais vocais. Embora a maior parte do poder continuasse nas mãos do rei, o Parlamento passou a poder apresentar protestos fiscais ao monarca e destituir ministros de quem não gostasse.¹⁸⁵ A Guerra Civil Inglesa (1642–1651) eliminou por completo a monarquia, que mais tarde seria restaurada, mas numa forma subordinada ao Parlamento; posteriormente, o governo adotou uma Declaração de Direitos que estabelecia claramente o princípio de que o rei só poderia governar com o consentimento do povo.¹⁸⁶

Antes da Guerra da Independência dos Estados Unidos, a Inglaterra — embora estivesse longe de ser uma verdadeira democracia — era a nação mais democrática da história mundial até então e, significativamente, uma das mais letradas.¹⁸⁷ Entre o colapso da República Romana no primeiro século a.C. e a Revolução Americana, houve diversas outras sociedades com eleições ou instituições políticas vagamente republicanas, mas estas apresentavam sempre uma participação política muito limitada e acabavam por recair na tirania. Durante a Idade Média, surgiram várias repúblicas em Itália, centradas em cidades-estado ricas em comércio, como Génova e Veneza, mas estas eram na realidade fortemente aristocráticas. Por exemplo, os líderes de Veneza (designados doges) eram eleitos vitaliciamente através de um processo complexo que mantinha as famílias nobres no poder e não permitia qualquer participação do povo comum.¹⁸⁸ De 1569 a 1795, a Comunidade Polaco-Lituana teve um sistema notavelmente livre e democrático — mas apenas para a nobreza *szlachta* (habitualmente menos de um décimo da população); os não-nobres tinham pouquíssima influência na política.¹⁸⁹

Em contraste, na Grã-Bretanha existia, pelo menos em teoria, elegibilidade para votar para todos os chefes de família do sexo masculino que fossem adultos e livres. E embora, na prática, houvesse geralmente requisitos adicionais de propriedade, o direito de voto não dependia do estatuto de nascimento de uma pessoa. Apesar de ainda excluir muitas pessoas, esta foi uma inovação política absolutamente crucial, pois lançou as bases para a ideia de participação política universal. Uma vez aceite que o estatuto de nascimento não deveria determinar o direito ao voto, o poder dessa

ideia tornou-se imparável. Por isso, não foi por acaso que a primeira democracia moderna surgiu nas colónias americanas, mesmo que tenha sido necessário travar uma guerra contra a Inglaterra para a alcançar. No entanto, cumprir as promessas dessa democracia foi um processo árduo e moroso.

Há dois séculos, nos Estados Unidos, a maioria das pessoas ainda não usufruía de plenos direitos de participação política. No início do século XIX, os direitos de voto estavam maioritariamente limitados a homens brancos adultos que possuísem pelo menos alguma propriedade ou riqueza. Esses requisitos económicos permitiam que a maioria dos homens brancos votasse, mas excluía quase totalmente as mulheres, os afro-americanos (milhões dos quais viviam em escravidão hereditária) e os nativos americanos.¹⁹⁰ Os historiadores divergem quanto à percentagem exata da população que podia votar, mas é comum estimá-la entre 10% e 25%.¹⁹¹ No entanto, essa injustiça continha em si as sementes da sua própria dissolução — o voto oferecia aos Estados Unidos um mecanismo para a reforma, e as restrições ao sufrágio contrastavam com os ideais elevados consagrados nos seus documentos fundacionais.

Apesar das elevadas aspirações dos seus defensores, a democracia avançou apenas lentamente ao longo do século XIX. Por exemplo, as revoluções liberais de 1848 na Europa fracassaram em grande parte, e muitas das reformas promovidas pelo Czar Alexandre II na Rússia foram revertidas pelos seus sucessores.¹⁹² Em 1900, apenas 3% da população mundial vivia no que hoje consideraríamos democracias, já que mesmo os Estados Unidos ainda negavam às mulheres o direito de voto e impunham a

segregação racial contra os afro-americanos. Em 1922, no rescaldo da Primeira Guerra Mundial, essa percentagem subiu para 19%.¹⁹³ No entanto, a ascensão do fascismo fez recuar novamente a democracia, e centenas de milhões de pessoas passaram a viver sob regimes totalitários durante a Segunda Guerra Mundial. Curiosamente, a comunicação de massas via rádio inicialmente ajudou os fascistas a ascender ao poder, mas foi essa mesma tecnologia que acabou por permitir aos Aliados mobilizar as suas democracias para a vitória — destacando-se, nesse contexto, os discursos inspiradores de Winston Churchill durante o Blitz.

Os anos do pós-guerra assistiram a um aumento rápido da proporção de pessoas no mundo a viver em democracias, impulsionado sobretudo pela independência da Índia e das outras colónias britânicas no Sul da Ásia. Durante a maior parte da Guerra Fria, o alcance da democracia manteve-se relativamente estável, com pouco mais de um terço da população mundial a viver em sociedades democráticas.¹⁹⁴ No entanto, a proliferação da tecnologia de comunicação fora da Cortina de Ferro — desde discos dos Beatles a televisores a cores — alimentou o descontentamento contra os governos que a suprimiam. Com a dissolução da União Soviética, a democracia voltou a expandir-se rapidamente, alcançando quase 54% da população mundial em 1999.¹⁹⁵

Embora esta percentagem tenha oscilado nas últimas duas décadas — com avanços em alguns países e retrocessos noutros —, uma liberalização de outro tipo tem vindo a avançar rapidamente. No final da Guerra Fria, cerca de 35% da população mundial vivia sob autocracias fechadas — o tipo de regime mais repressivo.¹⁹⁶ Em

2022, essa percentagem tinha diminuído para cerca de 26%, o que significa que mais de 750 milhões de pessoas foram libertas da tirania.¹⁹⁷ Este progresso inclui os acontecimentos marcantes e complexos da Primavera Árabe, em grande medida possibilitados e impulsionados pelas redes sociais. Um dos grandes desafios nas próximas décadas será ajudar os países que se encontram na zona cinzenta entre a autocracia e a democracia a completar a transição para uma governação verdadeiramente democrática. Parte desse esforço dependerá do uso cuidadoso da Inteligência Artificial, promovendo abertura e transparência, ao mesmo tempo que se minimiza o seu potencial de ser utilizada para vigilância autoritária ou disseminação de desinformação.¹⁹⁸

A história oferece-nos motivos para um otimismo profundo. À medida que as tecnologias de partilha de informação evoluíram — do telégrafo às redes sociais —, a ideia de democracia e de direitos individuais passou de quase ignorada a uma aspiração global, que já é realidade para quase metade da população da Terra. Imaginemos como o progresso exponencial das próximas duas décadas nos permitirá realizar esses ideais de forma ainda mais plena.

Propagação da democracia desde 1800²⁰⁰



Principais fontes: O nosso mundo em dados; Unidade de Inteligência Economista

10. Agora Estamos a Entrar na Parte Íngreme do Exponencial

O ponto essencial a reter é que todo o progresso que descrevi até agora surgiu a partir das fases iniciais e lentas destas tendências exponenciais. À medida que a tecnologia da informação avançar muito mais nos próximos vinte anos do que avançou nos últimos duzentos, os benefícios para a prosperidade geral serão incomparavelmente maiores — de facto, já são muito maiores do que a maioria das pessoas imagina.

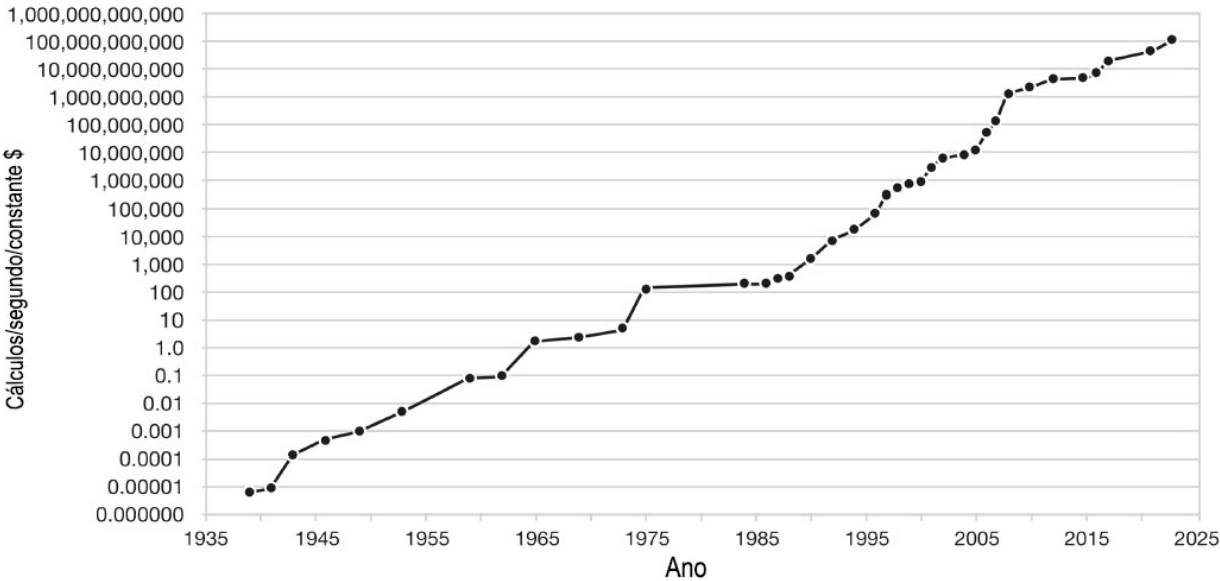
A tendência mais fundamental em jogo é a melhoria exponencial na relação preço-desempenho da computação — ou seja, quantas operações por segundo podem ser realizadas por um dólar ajustado

à inflação. Quando Konrad Zuse construiu o primeiro computador programável funcional, o Z2, em 1939, este conseguia executar cerca de 0,0000065 operações por segundo por dólar de 2023.²⁰⁰ Em 1965, o PDP-8 atingia cerca de 1,8 operações por segundo por dólar. Quando publiquei o meu livro *A Era das Máquinas Inteligentes*, em 1990, o MT 486DX alcançava aproximadamente 1.700. Já em *A Era das Máquinas Espirituais*, nove anos depois, os processadores Pentium III atingiam 800.000. E aquando do lançamento de *A Singularidade Está Próxima*, em 2005, alguns Pentium 4 já realizavam 12 milhões de operações por segundo por dólar. Agora, enquanto este livro vai para impressão no início de 2024, os chips TPU v5e da Google Cloud situam-se provavelmente em torno dos 130 mil milhões de operações por segundo por dólar! E como esta impressionante capacidade computacional (que pode atingir quintiliões de operações por segundo num grande pod^{*}) pode ser alugada por apenas alguns milhares de dólares por hora por qualquer pessoa com acesso à internet — como alternativa à construção e manutenção de um supercomputador —, o desempenho efetivo disponível para utilizadores comuns com pequenos projetos é várias ordens de grandeza superior a isso. Como a computação barata facilita diretamente a inovação, esta macrotendência tem continuado de forma constante — e não depende de nenhum paradigma tecnológico específico, como a miniaturização dos transístores ou o aumento das velocidades de relógio.

* “pod”, conjunto de computadores interligados que trabalham juntos para processar grandes volumes de dados.

Preço-Desempenho da Computação, 1939–2023²⁰²

Melhor relação custo-benefício alcançada em cálculos por segundo por dólar constante de 2023



MÁQUINAS ALCANÇANDO UM PREÇO-DESEMPENHO RECORDE

ANO	NOME	COMPUTAÇÕES POR SEGUNDO POR DÓLAR CONSTANTE DE 2023
1939	Z2	~ 0.0000065

1941	Z3	~ 0.0000091
1943	Colossus Mark 1	~ 0.00015
1946	ENIAC	~ 0.00043
1949	BINAC	~ 0.00099
1953	UNIVAC 1103	~ 0.0048
1959	DEC PDP-1	~ 0.081
1962	DEC PDP-4	~ 0.097
1965	DEC PDP-8	~ 1.8

1969	Data General Nova	~ 2.5
1973	Intellec 8	~ 4.9
1975	Altair 8800	~ 144
1984	Apple Macintosh	~ 221
1986	Compaq Deskpro 386 (16 MHz)	~ 224
1987	PC's Limited 386 (16 MHz)	~ 330

1988	Compaq Deskpro 386/25	~ 420
1990	MT 486DX	~ 1,700
1992	Gateway 486DX2/66	~ 8,400
1994	Pentium (75 MHz)	~ 19,000
1996	Pentium Pro (166 MHz)	~ 75,000
1997	Mobile Pentium MMX (133 MHz)	~ 340,000
1998	Pentium II (450 MHz)	~ 580,000

1999	Pentium III (450 MHz)	~ 800,000
2000	Pentium III (1.0 GHz)	~ 920,000
2001	Pentium 4 (1700 MHz)	~ 3,100,000
2002	Xeon (2.4 GHz)	~ 6,300,000
2004	Pentium 4 (3.0 GHz)	~ 9,100,000
2005	Pentium 4 662 (3.6 GHz)	~ 12,000,000
2006	Core 2 Duo E6300	~ 54,000,000

2007	Pentium Dual-Core E2180	~ 130,000,000
2008	GTX 285	~ 1,400,000,000
2010	GTX 580	~ 2,300,000,000
2012	GTX 680	~ 5,000,000,000
2015	Titan X (Maxwell 2.0)	~ 5,300,000,000
2016	Titan X (Pascal)	~ 7,300,000,000
2017	AMD Radeon RX 580	~ 22,000,000,000

2021	Google Cloud TPU v4-4096	~ 48,000,000,000
2023	Google Cloud TPU v5e	~ 130,000,000,000

No entanto, este progresso dramático não é tão amplamente reconhecido quanto se poderia esperar. Num diálogo em palco com Christine Lagarde, então diretora-geral do Fundo Monetário Internacional (FMI), durante a Reunião Anual do FMI a 5 de Outubro de 2016, Lagarde perguntou-me por que razão não vemos mais evidências de crescimento económico, tendo em conta toda a impressionante tecnologia digital atualmente disponível. A minha resposta foi (e continua a ser) que tendemos a anular esse crescimento ao colocá-lo simultaneamente no numerador e no denominador.

Quando um adolescente em África gasta 50 dólares num smartphone, isso conta como 50 dólares de atividade económica, apesar de essa compra equivaler, em termos tecnológicos, a mais de mil milhões de dólares em computação e comunicação nos padrões de 1965 — e a milhões de dólares em 1985. O Snapdragon 810, um chip comum em smartphones na faixa dos 50 dólares, realiza, em média, cerca de três mil milhões de operações de vírgula flutuante por segundo (OVFPS), segundo uma variedade de testes

de desempenho.²⁰² Isto corresponde a aproximadamente 60 milhões de operações por segundo por dólar. Os melhores computadores disponíveis em 1965 conseguiam cerca de 1,8 operações por segundo por dólar, e em 1985 chegavam aos 220.²⁰³ A essa eficiência, seriam necessários quase 1,7 mil milhões de dólares (ajustados a 2023) para igualar o desempenho de um Snapdragon em 1965, e cerca de 13,6 milhões de dólares em 1980.

É claro que esta comparação rudimentar não leva em conta muitos outros aspetos da tecnologia que evoluíram desde então. Literalmente falando, as capacidades completas de um smartphone de 50 dólares seriam impossíveis de alcançar por qualquer valor — seja em 1965 ou em 1985. Assim, as métricas tradicionais praticamente ignoram a acentuada taxa de deflação da tecnologia da informação, que, no caso da computação, do sequenciamento genético e de muitas outras áreas, ronda os 50% ao ano. Parte dessa melhoria contínua na relação preço-desempenho traduz-se em reduções de preço, e parte em aumentos de desempenho — o que significa que obtemos produtos cada vez melhores por preços cada vez mais baixos.

Como exemplo pessoal, quando frequentei o MIT em 1965, a escola era tão avançada que tinha, de facto, computadores. O mais notável era o IBM 7094, com 150.000 bytes de memória “core” e um quarto de MIPS (milhão de instruções por segundo) de velocidade de computação. Custava 3,1 milhões de dólares (em valores de 1963, o equivalente a 30 milhões de dólares em 2023) e era partilhado por milhares de estudantes e professores.²⁰⁴ Em comparação, o iPhone 14 Pro, lançado durante a escrita deste livro,

custava 999 dólares e podia atingir até 17 bilhões de operações por segundo para aplicações relacionadas com Inteligência Artificial.²⁰⁵ Esta não é uma comparação perfeita — parte do custo do iPhone inclui funcionalidades irrelevantes para o IBM 7094, como câmaras, e a velocidade do iPhone é significativamente mais baixa para muitos outros usos — mas o ponto principal é evidente. Aproximadamente, o iPhone é 68 milhões de vezes mais rápido do que o 7094 e custa menos de um trigésimo de milésimo do preço. Em termos de preço-desempenho (velocidade por dólar), isto representa uma impressionante melhoria de dois bilhões de vezes.

Esta taxa de melhoria continua sem abrandamento. Não depende fundamentalmente da lei de Moore, a famosa redução exponencial das dimensões dos componentes nos microchips. O MIT adquiriu o IBM 7094, baseado em transístores, em 1963 — antes de os computadores com microchips terem sido amplamente introduzidos — e dois anos antes de Gordon Moore ter formulado publicamente a sua lei homónima num artigo marcante de 1965.²⁰⁶ Por mais influente que essa lei tenha sido, ela é apenas um entre vários paradigmas computacionais exponenciais — até agora incluindo relés eletromecânicos, válvulas de vácuo, transístores e circuitos integrados, com outros ainda por vir no futuro.²⁰⁷

De muitas formas, tão importante quanto o poder de computação é a informação. Quando era adolescente, poupei durante anos os lucros da distribuição de jornais para comprar uma edição da *Encyclopaedia Britannica* por vários milhares de dólares, o que contava como milhares de dólares no PIB. Em contraste, hoje um adolescente com um smartphone tem acesso a uma enciclopédia

vastamente superior — a Wikipedia — que não conta como qualquer atividade económica, porque é gratuita. Embora a Wikipedia nem sempre mantenha o mesmo nível editorial da *Britannica*, apresenta várias vantagens notáveis: abrangência (a versão principal em inglês da Wikipedia é cerca de cem vezes maior do que a *Britannica*), atualidade (atualizações em minutos após notícias de última hora, em oposição a anos numa enciclopédia impressa), multimédia (integração de conteúdos audiovisuais em muitos artigos) e hipertextualidade (hiperligações que conetam ricamente os artigos entre si).²⁰⁸ Também liga frequentemente os leitores a fontes de nível académico equivalente à *Britannica*, caso seja necessária maior profundidade. E isto é apenas um dos milhares de produtos e serviços informativos gratuitos — todos eles a contar como zero para o Produto Interno Bruto.

Em resposta a este argumento, Lagarde contrapôs que, sim, a tecnologia digital possui qualidades e implicações notáveis, mas que não se pode comer tecnologia da informação, nem vesti-la, nem habitar nela. A minha resposta: tudo isso mudará ao longo da próxima década. É certo que a produção e o transporte destes tipos de recursos tornaram-se mais eficientes graças a melhorias constantes no hardware e no software, mas estamos prestes a entrar numa Era em que bens como alimentos e vestuário deixarão de ser apenas mais económicos por via da tecnologia da informação — passarão a ser, eles próprios, tecnologias da informação, à medida que os custos de recursos e produção diminuem devido ao papel dominante da automação e da inteligência artificial nos processos produtivos.²⁰⁹ Esses bens estarão, portanto, sujeitos às

mesmas taxas elevadas de deflação que observamos noutras áreas da tecnologia da informação.

Durante o final da década de 2020, começaremos a imprimir roupas e outros bens comuns com impressoras 3D, eventualmente a centavos por quilo. Uma das tendências-chave na impressão 3D é a miniaturização: a criação de máquinas capazes de fabricar objetos com detalhes cada vez mais minuciosos. A certa altura, os paradigmas tradicionais da impressão 3D, como a extrusão (semelhante a uma impressora de jato de tinta), serão substituídos por novas abordagens para a manufatura a escalas ainda mais reduzidas. Provavelmente em algum momento da década de 2030, cruzar-se-á o limiar da nanotecnologia, permitindo fabricar objetos com precisão atômica. A estimativa de Eric Drexler, no seu livro de 2013 *Radical Abundance*, é que, tendo em conta nanomateriais com maior eficiência em massa, a manufatura com precisão atômica poderá construir a maioria dos tipos de objetos pelo equivalente a cerca de vinte centavos por quilograma.²¹⁰ Apesar de estes números se manterem no campo da especulação, a redução de custos será, com toda a certeza, colossal. E, tal como vimos com a música, os livros e os filmes, existirão inúmeros designs gratuitos disponíveis a par de versões proprietárias. De facto, a coexistência de um mercado open source — que é, e continuará a ser, um grande nivelador — com o mercado proprietário tornar-se-á a natureza definidora da economia em número crescente de domínios.

Como explicarei mais adiante neste capítulo, em breve produziremos alimentos de alta qualidade e baixo custo através da agricultura vertical, com produção controlada por inteligência

artificial e colheitas isentas de produtos químicos. E a carne cultivada de forma limpa e ética a partir de culturas celulares substituirá as práticas devastadoras da pecuária industrial. Em 2020, os seres humanos abateram mais de 74 mil milhões de animais terrestres para consumo de carne, cujos produtos pesavam, no total, cerca de 371 milhões de toneladas.²¹¹ As Nações Unidas estimam que isso representa mais de 11 por cento de todas as emissões anuais de gases com efeito de estufa causadas pela civilização humana.²¹² A tecnologia atualmente conhecida como carne cultivada em laboratório tem potencial para mudar radicalmente este cenário. A carne proveniente de carcaças animais apresenta várias desvantagens importantes: provoca sofrimento em criaturas inocentes, é frequentemente prejudicial à saúde humana e causa impactos ambientais severos, tanto por poluição tóxica como por emissões de carbono. Cultivar carne a partir de células e tecidos pode resolver todos esses problemas. Nenhum animal vivo sofrerá, a carne poderá ser desenhada para ser mais saudável e saborosa, e o impacto ambiental poderá ser minimizado com tecnologias cada vez mais limpas. O ponto de viragem poderá ser o realismo. Em 2023, a tecnologia já conseguia replicar carnes com pouca estrutura, como a textura da carne picada, mas ainda não estava apta a produzir, do zero, bifos inteiros do tipo *filet mignon*. Quando a carne cultivada conseguir imitar, de forma convincente, todas as versões tradicionais de origem animal, prevejo que a maioria das pessoas deixará rapidamente de sentir resistência à sua adoção.

Como também descreverei com mais detalhe mais adiante, em breve seremos capazes de produzir, a baixo custo, módulos para a

construção de casas e outros edifícios, tornando a habitação confortável acessível a milhões de pessoas. Todas estas tecnologias já foram demonstradas com sucesso e tornar-se-ão cada vez mais avançadas e comuns durante esta década. A par desta revolução no mundo físico, surgirá uma nova geração transformadora de realidade virtual e aumentada, por vezes designada como metaverso.²¹³ Durante muitos anos, o metaverso foi largamente desconhecido fora dos círculos da ficção científica e do futurismo, mas o conceito ganhou um grande impulso na consciência pública com a mudança de nome do Facebook para Meta, em 2021, e o anúncio de que o centro da sua estratégia a longo prazo seria desempenhar um papel chave na construção do metaverso — ao ponto de, atualmente, muitas pessoas pensarem erradamente que foi a Meta quem inventou o conceito.

Tal como a internet é um ambiente integrado e persistente de páginas web, a RV e a RA do final da década de 2020 fundir-se-ão numa nova camada envolvente da nossa realidade. Neste universo digital, muitos produtos nem precisarão de ter uma forma física, já que versões simuladas desempenharão perfeitamente as suas funções com um realismo altamente convincente. Exemplos disso incluem: uma reunião virtual completa, com a capacidade de interagir com colegas de trabalho e colaborar facilmente como se estivessem presencialmente juntos; um concerto virtual, com a experiência auditiva totalmente imersiva de estar numa sala de concertos; e umas férias virtuais em família numa praia sensorialmente rica, com os sons, visões e aromas da areia e do mar.

Atualmente, a maior parte dos meios de comunicação limita-se a envolver dois sentidos: a visão e a audição. Os sistemas atuais de realidade virtual que incorporam cheiros ou sensações táteis ainda são desajeitados e pouco práticos. Mas, nas próximas décadas, a tecnologia de interface cérebro-computador tornar-se-á muito mais avançada. No seu auge, permitirá uma realidade virtual de imersão total, alimentando os dados sensoriais simulados diretamente no nosso cérebro. Essa tecnologia trará mudanças significativas — e difíceis de prever — na forma como passamos o tempo e nas experiências que priorizamos. Também nos forçará a repensar o porquê de fazermos o que fazemos. Por exemplo, quando for possível experienciar com segurança todo o desafio e beleza natural de escalar o Monte Everest de forma virtual, as pessoas terão de se confrontar com a questão de saber se vale a pena fazê-lo na realidade — ou se, afinal, o perigo fazia parte do fascínio desde o início.

O último desafio que Lagarde me colocou foi que a terra não vai tornar-se uma tecnologia da informação, e que já estamos muito sobrelotados. Respondi que estamos sobrelotados porque escolhemos aglomerar-nos em grupos densos. As cidades surgiram para tornar possível o nosso convívio e trabalho em conjunto. Mas basta fazer uma viagem de comboio em qualquer parte do mundo para se perceber que quase toda a terra habitável continua desocupada — apenas 1 por cento está urbanizada para a habitação humana.²¹⁴ Apenas cerca de metade da terra habitável é usada diretamente pelos seres humanos, quase toda ela dedicada à agricultura — e, dentro da terra agrícola, 77 por cento é usada para criação de gado, pastagem e produção de rações, com apenas 23

por cento dedicada a culturas para consumo humano.²¹⁵ A carne cultivada e a agricultura vertical permitirão satisfazer estas necessidades com apenas uma pequena fração da terra atualmente utilizada. Isto tornará possível uma maior abundância de alimentos saudáveis e acomodará uma população crescente, ao mesmo tempo que libertará vastas áreas de território. Os veículos autónomos facilitarão um uso menos concentrado da terra, ao tornarem práticos os percursos mais longos, e poderemos viver cada vez mais onde quisermos, mantendo ainda assim a capacidade de trabalhar e conviver em espaços virtuais e aumentados.

Esta transição já está em curso, tendo sido acelerada pelas mudanças sociais impostas pela COVID-19. No auge da pandemia, até 42 por cento dos norte-americanos estavam a trabalhar a partir de casa.²¹⁶ Esta experiência terá, muito provavelmente, um impacto duradouro na forma como empregados e empregadores encaram o trabalho. Em muitos casos, o modelo antigo de trabalho das nove às cinco, sentado numa secretária num escritório da empresa, já estava obsoleto há anos, mas a inércia e a familiaridade tornavam difícil à sociedade mudar — até que a pandemia forçou essa mudança. À medida que a Lei dos Retornos Acelerados (LdRA) conduz as tecnologias da informação para os trechos mais íngremes destas curvas exponenciais, e que a inteligência artificial amadurece nas próximas décadas, tais impactos apenas se irão acelerar.

11. A Energia Renovável está Quase Concluída — Substituição de Combustíveis Fósseis

Uma das transições mais importantes resultantes do progresso exponencial da década de 2020 dá-se no domínio da energia, pois a energia alimenta tudo o resto. Os painéis solares fotovoltaicos já são, em muitos casos, mais baratos do que os combustíveis fósseis, com os custos a diminuir rapidamente. No entanto, são necessárias inovações em ciência dos materiais para alcançar melhorias adicionais em termos de custo-eficiência. Avanços assistidos por inteligência artificial na nanotecnologia irão aumentar a eficiência das células fotovoltaicas, permitindo-lhes captar energia de uma porção mais ampla do espectro eletromagnético. Desenvolvimentos entusiasmantes estão em curso nesta área. A introdução de estruturas minúsculas, como nanotubos e nanofios, no interior das células solares, pode melhorar de forma constante a sua capacidade de absorver fótons, transportar elétrons e gerar corrente elétrica.²¹⁷ Do mesmo modo, a incorporação de nanocristais (incluindo pontos quânticos) nas células pode aumentar a quantidade de eletricidade gerada por cada fóton de luz solar absorvido.²¹⁸

Outro nanomaterial, conhecido como silício negro, apresenta uma superfície composta por um vasto número de agulhas à escala atômica, mais pequenas do que o comprimento de onda da luz.²¹⁹ Isto praticamente elimina a reflexão da luz na célula, garantindo que mais fótons incidentes sejam convertidos em eletricidade. Investigadores da Universidade de Princeton desenvolveram um método alternativo de maximizar a produção elétrica, utilizando uma malha de átomos de ouro à escala nanométrica, com apenas

30 milmillonésimos de metro de espessura, para capturar fótons e aumentar a eficiência.²²⁰ Entretanto, um projeto do MIT criou células fotovoltaicas a partir de folhas de grafeno, uma forma especial de carbono com apenas um átomo de espessura (menos de um nanómetro).²²¹ Estas tecnologias permitirão que as células fotovoltaicas do futuro sejam mais finas, leves e instaláveis em mais superfícies. Por exemplo, empresas como a *SolarWindow Technologies* têm sido pioneiras no desenvolvimento de filmes fotovoltaicos ultrafinos que podem revestir janelas, produzindo eletricidade útil sem obstruir a vista.²²²

Nos próximos anos, a tecnologia baseada em nanotecnologia também irá reduzir os custos de fabrico ao permitir a impressão 3D de células solares, o que tornará possível uma produção descentralizada — ou seja, as células fotovoltaicas poderão ser criadas onde e quando forem necessárias. E, ao contrário dos grandes painéis rígidos e desajeitados usados atualmente, as células construídas com nanotecnologia poderão assumir várias formas convenientes: rolos, filmes, revestimentos, entre outros. Isto reduzirá os custos de instalação e proporcionará a mais comunidades em todo o mundo o acesso a energia solar barata e abundante.

Em 2000, as energias renováveis (principalmente solar, eólica, geotérmica, das marés e biomassa — excluindo a hidroelétrica) representavam cerca de 1,4 por cento da produção global de eletricidade.²²³ Em 2021, esse valor subiu para 12,85 por cento, com um tempo médio de duplicação de aproximadamente 6,5 anos durante esse período.²²⁴ A duplicação é mais rápida em termos

absolutos, uma vez que o volume total de geração de eletricidade também está a crescer — de cerca de 218 terawatts-hora em 2000 para 3.657 terawatts-hora em 2021, com um tempo de duplicação de cerca de 5,2 anos.²²⁵ Este progresso continuará de forma exponencial, impulsionado por novas reduções de custos graças à aplicação da inteligência artificial na descoberta de materiais e no design de dispositivos. A este ritmo, as energias renováveis poderiam, teoricamente, satisfazer todas as necessidades elétricas globais até 2041. No entanto, ao projetar o futuro, não é particularmente útil considerar as renováveis como um todo, uma vez que nem todas estão a tornar-se mais baratas ao mesmo ritmo.

Os custos de geração de eletricidade solar estão a cair bastante mais depressa do que os de qualquer outra fonte renovável principal, e a energia solar tem ainda muito espaço para crescer. A concorrente mais próxima em termos de queda de preços é a energia eólica, mas a solar tem vindo a cair a um ritmo aproximadamente duas vezes mais rápido do que a eólica nos últimos cinco anos.²²⁶ Além disso, a energia solar tem um limite mínimo de custo mais promissor, porque os avanços na ciência dos materiais traduzem-se diretamente em painéis mais baratos e eficientes. A tecnologia atual capta apenas uma fração do máximo teórico — normalmente cerca de 20 por cento da energia incidente, de um limite teórico em torno dos 86 por cento.²²⁷ Embora esse teto nunca venha a ser totalmente alcançado na prática, há ainda um vasto potencial de melhoria. Em contraste, os sistemas típicos de energia eólica atingem cerca de 50 por cento de eficiência, muito mais próximo do seu limite teórico máximo de 59 por cento.²²⁸ Por

isso, independentemente das inovações, estes sistemas não poderão melhorar muito mais.

Em 2021, a energia solar representava cerca de 3,6 por cento da eletricidade mundial.²²⁹ Para satisfazer 100 por cento das necessidades energéticas globais ao nível atual de consumo, seria necessário captar apenas uma parte em cada 10.000 da luz solar gratuita que incide sobre a Terra. O nosso planeta é constantemente banhado por aproximadamente 173.000 terawatts de energia solar.²³⁰ A maior parte desta energia não pode, para já, ser captada de forma prática, mas mesmo com a tecnologia atual, a energia solar é mais do que suficiente para satisfazer as necessidades da humanidade. Uma estimativa feita em 2006 por cientistas do governo dos EUA calculava que a energia solar total disponível com o melhor da tecnologia da época podia atingir até 7.500 terawatts.²³¹ Isto equivale a 65.700.000 terawatts-hora por ano. Para comparação, em 2021, o consumo total de energia primária no mundo — incluindo eletricidade, aquecimento e combustíveis — foi equivalente a 165.320 terawatts-hora.²³²

A energia solar também apresenta um tempo de duplicação muito mais rápido, como proporção do total mundial, do que outras fontes renováveis: em média, pouco menos de cada vinte e oito meses entre 1983 e 2021 — mesmo com o aumento de cerca de 220 por cento da geração total de eletricidade nesse mesmo período, em termos absolutos.²³³ A partir dos 3,6 por cento registados em 2021, seriam necessárias apenas cerca de 4,8 duplicações para atingir os 100 por cento, o que nos colocaria no ano de 2032 como ponto teórico para satisfazer todas as nossas

necessidades energéticas apenas com energia solar. Embora isso não signifique que a energia solar venha literalmente a atingir a adoção total (devido a uma mistura de obstáculos económicos e políticos), é evidente que está numa trajetória com impacto verdadeiramente transformador.

É conveniente que algumas das maiores áreas não utilizadas do mundo — como os desertos — sejam também os locais mais favoráveis para a produção de eletricidade solar. Por exemplo, têm sido feitas propostas recorrentes para cobrir uma pequena, mas significativa, fração do Deserto do Saara com painéis fotovoltaicos. Estes poderiam gerar eletricidade suficiente para abastecer toda a Europa (através de cabos sob o Mediterrâneo) e África.²³⁴

Um dos principais desafios à expansão da eletricidade solar nestes moldes é a necessidade de tecnologia de armazenamento energético mais eficaz. A vantagem dos combustíveis fósseis é que podem ser armazenados e queimados sempre que for necessário gerar eletricidade. Mas o sol só brilha durante o dia, e a intensidade solar varia com as estações do ano. Daí a necessidade de meios eficientes para armazenar a energia solar no momento em que é gerada, para que possa ser utilizada mais tarde (seja horas ou meses depois, consoante o caso), quando houver necessidade real de consumo energético.

Felizmente, também estamos a começar a registar ganhos exponenciais na eficiência do custo e na quantidade de armazenamento de energia. Note-se que estas não são tendências exponenciais fundamentais e persistentes como a Lei dos Retorno

Acelerados, dado que a melhoria e expansão do armazenamento energético não é dominada pela criação de ciclos de retroalimentação. No entanto, a eficiência do custo do armazenamento e o seu uso total estão a aumentar de forma acentuada como consequência da crescente utilização de energias renováveis — especialmente no caso da energia fotovoltaica, que beneficia indiretamente da LdRA (Lei dos Retornos Acelerados) através do papel das tecnologias de informação na viabilização de novos avanços na ciência dos materiais. À medida que os investimentos nas renováveis aumentam e os seus custos diminuem, isso atrai recursos e esforços de inovação para o armazenamento energético, pois este é essencial para que as energias renováveis consigam competir com os combustíveis fósseis pelo domínio na geração de eletricidade. Os ganhos exponenciais continuarão a ser impulsionados por avanços convergentes na ciência dos materiais, na manufatura robotizada, na logística eficiente e na transmissão de energia. A implicação é que a energia solar poderá dominar já durante a década de 2030.

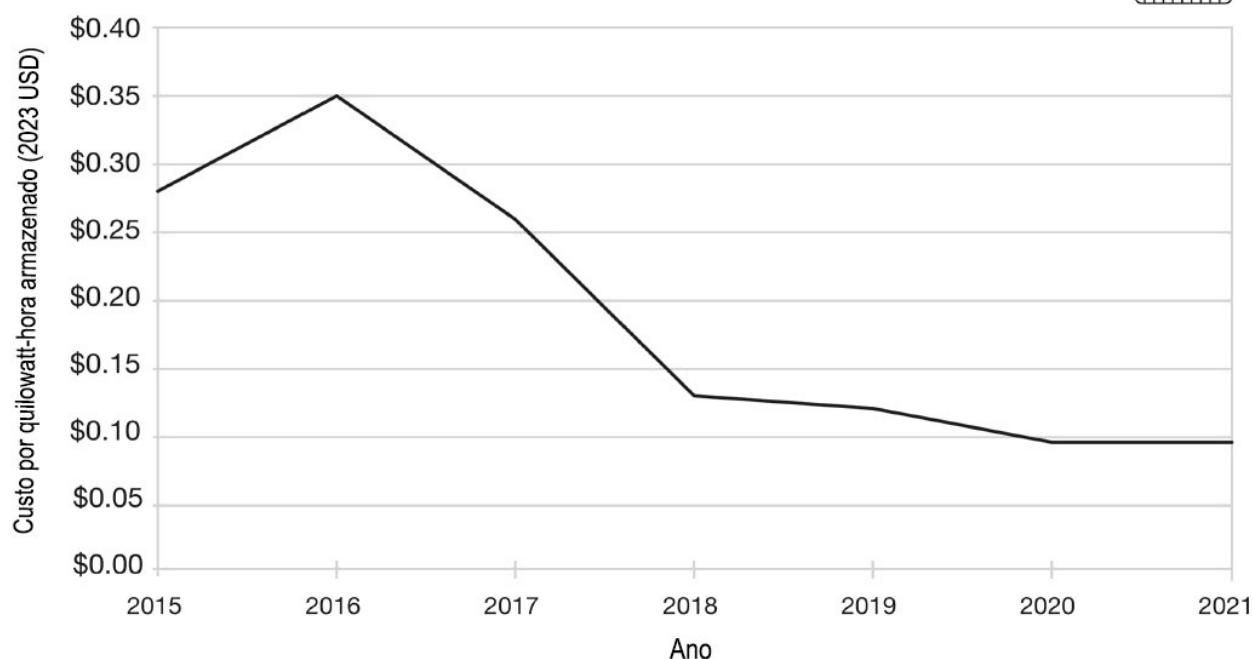
Estão atualmente a ser desenvolvidas diversas abordagens promissoras, embora ainda não esteja claro quais se revelarão mais eficazes à escala gigantesca de que iremos necessitar. Como a eletricidade em si não pode ser armazenada de forma eficaz, tem de ser convertida em outras formas de energia até ser necessária. As opções incluem transformá-la em energia térmica (através de sais fundidos), em energia potencial gravitacional (bombeando água para reservatórios elevados), em energia rotacional (em volantes de inércia de alta velocidade) ou em energia química

(através da produção de hidrogénio com eletricidade, que depois pode ser queimado de forma limpa quando necessário).²³⁵

E embora a maioria das baterias não seja adequada para armazenamento em escala de rede, baterias avançadas com iões de lítio e outras químicas estão agora a tornar-se rapidamente mais rentáveis. Por exemplo, entre 2012 e 2020, os custos de armazenamento com baterias de iões de lítio caíram cerca de 80 por cento por megawatt-hora, e prevê-se que continuem a descer.²³⁶ À medida que estes custos continuam a cair com novas inovações, as energias renováveis poderão substituir os combustíveis fósseis como espinha dorsal da rede elétrica.²³⁷

Custo do armazenamento de energia²³⁹

Melhor custo nivelado de armazenamento de energia à escala de utilidade pública, novos projetos nos EUA



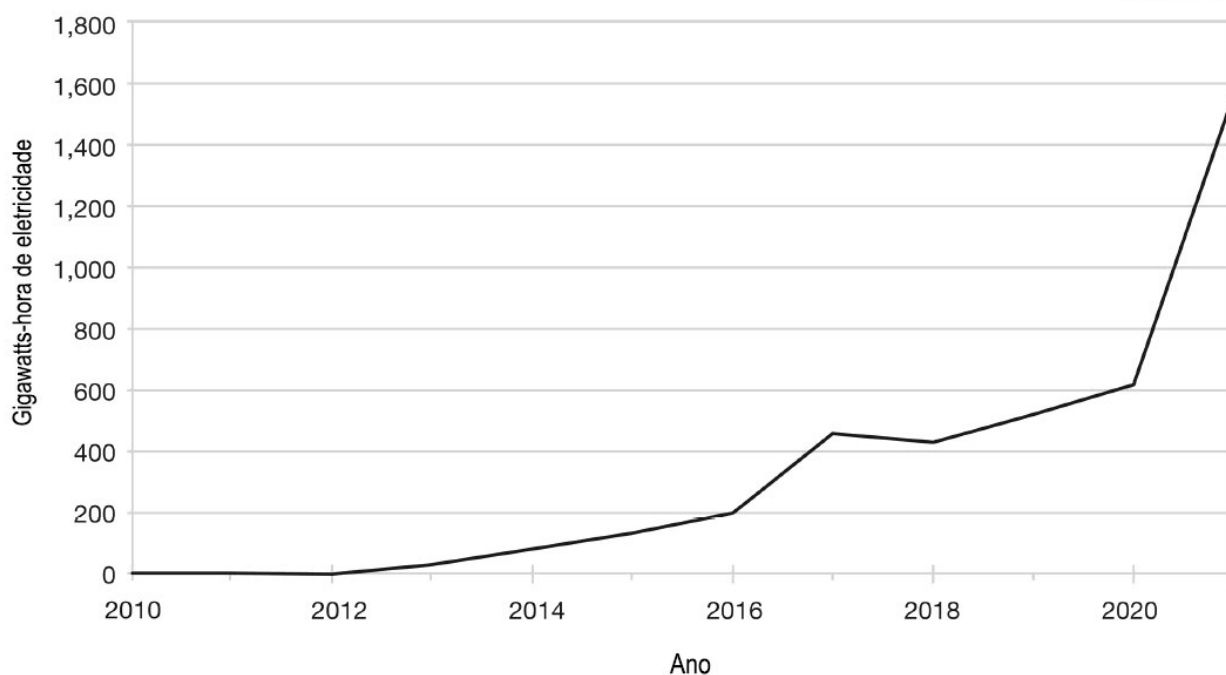
Fonte: Lazard

COMO AS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SÃO UTILIZADAS EM MUITAS FASES DIFERENTES DO PROCESSO DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ELETRICIDADE, E EM VÁRIOS CONTEXTOS ECONÓMICOS DISTINTOS, É MUITO DIFÍCIL

COMPARAR OS CUSTOS DE ARMAZENAMENTO DE UM PROJETO PARA OUTRO. TALVEZ A ANÁLISE MAIS RIGOROSA ATÉ À DATA VENHA DA FIRMA DE CONSULTORIA FINANCEIRA LAZARD, QUE UTILIZA A MÉTRICA CONHECIDA COMO “CUSTO NIVELADO DE ARMAZENAMENTO” (LCOS — LEVELIZED COST OF STORAGE). ESTA MÉTRICA FOI CONCEBIDA PARA ABRANGER TODOS OS CUSTOS (INCLUINDO OS CUSTOS DE CAPITAL), DIVIDIDOS PELA ENERGIA TOTAL ARMAZENADA (EM MEGAWATTS-HORA OU EQUIVALENTE) QUE SE ESPERA SER DESCARREGADA AO LONGO DA VIDA ÚTIL DO PROJETO. PARA REFLETIR DA MELHOR FORMA OS AVANÇOS MAIS RECENTES DA TECNOLOGIA, O GRÁFICO EM QUESTÃO MOSTRA O MELHOR LCOS DISPONÍVEL ENTRE OS NOVOS PROJETOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA À ESCALA DE REDE NOS ESTADOS UNIDOS ABERTOS EM CADA ANO. CONVÉM TER EM MENTE QUE OS VALORES MÉDIOS DE LCOS SÃO MAIS ELEVADOS NUM DADO ANO, MAS SEGUEM TENDÊNCIAS SEMELHANTES — OU SEJA, O MELHOR LCOS NUM DETERMINADO ANO PODERÁ CORRESPONDER AO LCOS MÉDIO ALGUNS ANOS MAIS TARDE.

Armazenamento total de energia dos EUA²⁴⁰

Eletricidade anual dos EUA proveniente de armazenamento de energia à escala de utilidade pública (excluindo hidroelétrica), GWh



Fonte: Administração de Informação de Energia dos EUA

12. Estamos a Aproximar o Acesso à Água Potável para Todos

Um dos grandes desafios do século XXI será garantir que a população crescente da Terra disponha de um fornecimento fiável de água limpa e potável. Em 1990, cerca de 24 por cento da população mundial não tinha acesso regular a fontes relativamente seguras de água para consumo.²⁴⁰ Graças aos esforços de desenvolvimento e ao avanço da tecnologia, esse número desceu para cerca de 1 em cada 10 pessoas.²⁴¹ No entanto, continua a ser um problema de grande dimensão. Segundo o Institute for Health Metrics and Evaluation, cerca de 1,5 milhões de pessoas em todo o mundo, incluindo 500.000 crianças pequenas, morreram em 2019 devido a doenças diarreicas — na sua maioria, causadas pela ingestão de água contaminada por bactérias fecais.²⁴² Estas doenças incluem cólera, disenteria e febre tifoide, sendo particularmente mortais para as crianças.

O problema reside no facto de grande parte do mundo ainda não dispor da infraestrutura necessária para recolher água potável, mantê-la limpa e distribuí-la até às casas das pessoas para uso diário — seja para beber, cozinhar, lavar ou tomar banho. Construir vastas redes de poços, bombas, aquedutos e canalizações é dispendioso, e muitos países em desenvolvimento não têm capacidade financeira para o fazer. Além disso, guerras civis e outros problemas políticos tornam frequentemente impraticáveis os grandes projetos de infraestrutura. Como tal, os sistemas centralizados de purificação e distribuição de água, como os existentes nos países desenvolvidos, não são uma solução viável

para a maioria daqueles que integram esse último décimo da população.

A alternativa está nas tecnologias que permitem às pessoas purificar a água nas suas comunidades locais, ou até individualmente. De um modo geral, as tecnologias descentralizadas irão definir a década de 2020 e as que se seguem em várias áreas, incluindo a produção de energia (painéis solares), a produção de alimentos (agricultura vertical) e a produção de bens do quotidiano (impressão 3D). No caso da purificação da água, esta abordagem pode assumir várias formas — desde máquinas de grandes dimensões, como o Janicki Omni Processor, capazes de fornecer água potável a uma aldeia inteira, até filtros portáteis, como o LifeStraw, que qualquer pessoa pode usar individualmente.²⁴³

Algumas células de purificação utilizam calor — proveniente da energia solar ou da queima de combustíveis — para ferver a água antes do consumo. Ferver a água mata as bactérias causadoras de doenças, mas não remove outros poluentes tóxicos, e é fácil que a água volte a ser contaminada se não for consumida imediatamente após a fervura. A adição de produtos químicos antibacterianos pode prevenir essa recontaminação, mas também não elimina outras toxinas. Nos últimos anos, algumas unidades portáteis de purificação de água passaram a utilizar eletricidade para transformar o oxigénio do ar em ozono — um gás que pode ser introduzido na água para eliminar agentes patogénicos de forma muito eficiente.²⁴⁴ Outras utilizam luz ultravioleta intensa para

eliminar bactérias e vírus. Contudo, também estas não protegem contra a poluição química.

Uma alternativa é a filtração. Durante muitos anos, a tecnologia de filtragem conseguiu remover a maioria, mas não todos, os organismos e toxinas presentes na água. Muitos dos vírus mais letais são tão pequenos que conseguem passar através dos poros dos filtros comuns.²⁴⁵ Do mesmo modo, as moléculas de certos poluentes não podem ser bloqueadas por métodos de filtragem tradicionais.²⁴⁶ No entanto, inovações recentes na ciência dos materiais estão a permitir a criação de filtros capazes de bloquear toxinas cada vez mais pequenas. Nos próximos anos, materiais com engenharia à escala nanométrica irão permitir que os filtros sejam mais rápidos e muito económicos.

Uma das tecnologias emergentes mais promissoras é a máquina de purificação de água Slingshot, inventada por Dean Kamen (nascido em 1951).²⁴⁷ Trata-se de um dispositivo relativamente compacto — com o tamanho aproximado de um pequeno frigorífico — capaz de produzir água totalmente pura, com qualidade suficiente para uso injetável, a partir de qualquer fonte, incluindo esgotos ou águas estagnadas contaminadas. A Slingshot requer menos de um quilowatt de eletricidade para funcionar. Utiliza destilação por compressão de vapor (transforma a água em vapor, deixando os contaminantes para trás) e não necessita de filtros. O aparelho foi concebido para funcionar com um tipo de motor muito versátil chamado motor de Stirling, que consegue gerar eletricidade a partir de qualquer fonte de calor — inclusive queimando estrume de vaca.²⁴⁸

13. A Agricultura Vertical Fornecerá Alimentos Baratos e de Elevada Qualidade e Liberará a Terra que Utilizamos para a Agricultura Horizontal

A maioria dos arqueólogos estima que o nascimento da agricultura humana terá ocorrido há cerca de 12.000 anos, embora existam indícios de que as primeiras práticas agrícolas possam remontar a 23.000 anos atrás.²⁴⁹ É possível que descobertas arqueológicas futuras venham a rever ainda mais este entendimento. Independentemente do momento exato em que a agricultura começou, a quantidade de alimento que se conseguia cultivar numa determinada área de terra era, inicialmente, bastante reduzida. Os primeiros agricultores lançavam sementes no solo natural e deixavam que a chuva as regasse. O resultado deste processo ineficiente era que a esmagadora maioria da população precisava de trabalhar na agricultura apenas para sobreviver. Por volta do ano 6.000 a.C., a irrigação passou a permitir que os cultivos recebessem mais água do que aquela que obteriam apenas da chuva.²⁵⁰ A seleção de plantas aumentou as partes comestíveis e o valor nutritivo dos alimentos. Os fertilizantes enriqueceram o solo com substâncias que promovem o crescimento. Métodos agrícolas mais avançados permitiram aos agricultores dispor as culturas da forma mais eficiente possível. O resultado foi o aumento da disponibilidade de alimentos, permitindo, ao longo dos séculos, que cada vez mais pessoas se dedicassem a outras atividades, como o comércio, a ciência e a filosofia. Parte dessa especialização levou a inovações adicionais na agricultura, criando um ciclo de retroalimentação que impulsionou ainda mais o progresso. Essa dinâmica tornou possível o surgimento da nossa civilização.

Uma forma útil de quantificar esse progresso é através da densidade de cultivo: ou seja, quanto alimento pode ser produzido numa determinada área de terra. Por exemplo, a produção de milho nos Estados Unidos utiliza atualmente a terra de forma mais de sete vezes mais eficiente do que há um século e meio. Em 1866, os agricultores americanos produziam, em média, cerca de 24,3 alqueires de milho por acre; em 2021, este valor atingiu os 176,7 alqueires por acre.²⁵¹ A nível global, a melhoria da eficiência do uso da terra tem seguido uma tendência aproximadamente exponencial, e atualmente precisamos, em média, de menos de 30% da área de terra que era necessária em 1961 para produzir a mesma quantidade de alimentos.²⁵² Esta tendência foi essencial para sustentar o crescimento populacional global ao longo desse período e evitou que a humanidade enfrentasse as fomes em massa por sobrepopulação que muitos temiam quando eu era jovem.

Além disso, dado que os cultivos são agora realizados com densidades extremamente elevadas e que as máquinas executam grande parte do trabalho anteriormente feito à mão, um trabalhador agrícola pode hoje produzir comida suficiente para alimentar cerca de setenta pessoas. Como resultado, o trabalho agrícola, que representava 80% de toda a força laboral nos Estados Unidos em 1810, caiu para 40% em 1900 e para menos de 1,4% atualmente.²⁵³

Contudo, as densidades de cultivo estão agora a aproximar-se do limite teórico da quantidade de alimento que pode ser produzida numa determinada área ao ar livre. Uma solução emergente consiste em cultivar várias camadas empilhadas de plantas, uma

abordagem conhecida como agricultura vertical.²⁵⁴ As quintas verticais tiram partido de várias tecnologias.²⁵⁵ Normalmente, cultivam-se plantas de forma hidropónica, ou seja, em vez de crescerem no solo, são cultivadas em tabuleiros com água rica em nutrientes, dentro de ambientes controlados. Estes tabuleiros são organizados em estruturas empilhadas com vários andares de altura, o que permite que o excesso de água de um nível escorra para o seguinte, em vez de se perder como escoamento. Algumas quintas verticais já utilizam uma nova técnica chamada aeroponia, na qual a água é substituída por uma névoa fina.²⁵⁶ Em vez da luz solar, são instalados LEDs especiais que garantem que cada planta receba a quantidade ideal de luz. A empresa de agricultura vertical Gotham Greens, que possui dez grandes instalações distribuídas entre a Califórnia e Rhode Island, é uma das líderes do setor. Em inícios de 2023, já tinha angariado 440 milhões de dólares em financiamento de capital de risco.²⁵⁷ A sua tecnologia permite utilizar “95% menos água e 97% menos terra do que uma quinta tradicional em solo” para obter o mesmo rendimento de colheita.²⁵⁸ Eficiências desta ordem não só libertarão recursos hídricos e terrenos para outros fins (recorde-se que a agricultura ocupa atualmente cerca de metade das terras habitáveis do planeta), como também permitirão uma abundância muito maior de alimentos a preços acessíveis.²⁵⁹

A agricultura vertical apresenta ainda outras vantagens importantes. Ao eliminar o escoamento agrícola, elimina uma das principais causas de poluição dos cursos de água. Evita a necessidade de lavrar solos soltos, que acabam por ser arrastados pelo vento, diminuindo assim a qualidade do ar. Torna

desnecessário o uso de pesticidas tóxicos, uma vez que as pragas não conseguem entrar numa quinta vertical devidamente concebida. Esta abordagem permite ainda cultivar durante todo o ano, incluindo espécies que não cresceriam no clima local ao ar livre. Isso também evita perdas de colheitas devido a geadas e intempéries. Talvez mais importante ainda, permite que cidades e aldeias cultivem os seus próprios alimentos localmente, em vez de os transportarem por comboio ou camião desde centenas ou até milhares de quilómetros de distância. À medida que a agricultura vertical se tornar mais acessível e generalizada, trará consigo grandes reduções na poluição e nas emissões.

Nos próximos anos, inovações convergentes nas áreas da eletricidade fotovoltaica, ciência dos materiais, robótica e inteligência artificial tornarão a agricultura vertical muito mais barata do que a agricultura convencional. Muitas destas instalações serão alimentadas por células solares eficientes, produzirão os seus próprios fertilizantes no local, recolherão a água diretamente do ar e utilizarão máquinas automatizadas para a colheita. Com muito poucos trabalhadores necessários e uma pegada ecológica mínima, as quintas verticais do futuro poderão eventualmente produzir alimentos a custos tão baixos que os consumidores poderão obter produtos alimentares quase gratuitamente.

Este processo reflete o que aconteceu no domínio das tecnologias da informação como resultado da Lei dos Retornos Acelerados. À medida que o poder de processamento computacional se tornou exponencialmente mais barato, plataformas como a Google e o Facebook conseguiram oferecer os seus serviços gratuitamente aos

utilizadores, suportando os seus próprios custos através de modelos de negócio alternativos, como a publicidade. Ao utilizar a automação e a inteligência artificial para controlar todos os aspetos de uma quinta vertical, a agricultura vertical passa a representar, essencialmente, a transformação da produção alimentar numa tecnologia da informação.



Alface crescendo em camadas empilhadas numa quinta vertical.

Crédito da fotografia: Valcenteu, 2010.

14. A Impressão 3D Revolucionará — A Criação e Distribuição de Coisas Físicas

Durante a maior parte do século XX, a manufatura de objetos tridimensionais sólidos assumia geralmente duas formas. Alguns processos envolviam moldar materiais dentro de um molde, como por exemplo injetar plástico fundido numa matriz, ou moldar metal aquecido numa prensa. Outros processos baseavam-se na remoção seletiva de material a partir de um bloco ou folha, de forma semelhante a um escultor que talha uma estátua a partir de um bloco de mármore. Ambos os métodos apresentam desvantagens significativas. Criar moldes é muito dispendioso, e estes são difíceis de modificar uma vez concluídos. Por comparação, a chamada manufatura subtrativa desperdiça uma grande quantidade de material e é incapaz de produzir certas formas.

Contudo, na década de 1980, começou a surgir uma nova família de tecnologias.²⁶⁰ Ao contrário dos métodos anteriores, estas criavam peças através do empilhamento ou deposição de camadas relativamente planas, que iam sendo sobrepostas até formar uma estrutura tridimensional. Estas técnicas passaram a ser conhecidas como manufatura aditiva, impressão tridimensional ou impressão 3D.

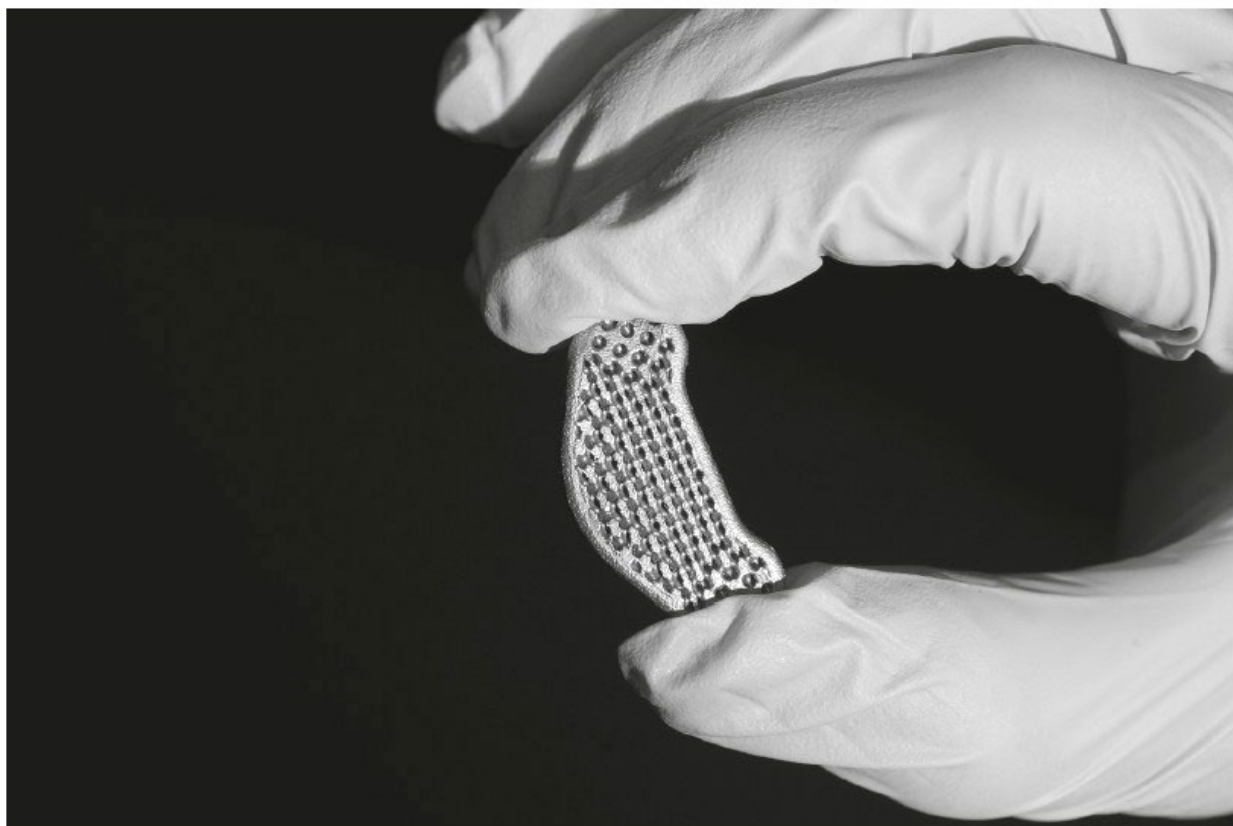
Os tipos mais comuns de impressoras 3D funcionam de forma algo semelhante a uma impressora jato de tinta.²⁶¹ Uma impressora jato de tinta típica move-se para trás e para a frente sobre uma folha de papel, pulverizando tinta a partir de um cartucho através

de um bico, nos locais determinados por software. Em vez de tinta, as impressoras 3D utilizam um material como o plástico, que é aquecido até ficar macio. Os seus bicos depositam o material seguindo um padrão determinado por software para cada camada, repetindo o processo múltiplas vezes até que o objeto adquira uma forma verdadeiramente tridimensional. As camadas fundem-se à medida que endurecem, e o objeto final fica pronto a ser utilizado. Nas últimas duas décadas, a impressão 3D tem continuado a evoluir, com resoluções mais elevadas, redução de custos e aumento de velocidade.²⁶² Atualmente, os sistemas de impressão 3D conseguem criar objetos a partir de uma grande variedade de materiais, incluindo papel, plástico, cerâmica e metal. À medida que esta tecnologia avança, será capaz de lidar com materiais ainda mais exóticos. Por exemplo, implantes médicos poderão ser produzidos com moléculas de fármacos incorporadas para serem libertadas gradualmente no corpo. Nanomateriais como o grafeno poderão ser utilizados para criar vestuário leve à prova de balas e eletrónica ultrarrápida. A impressão 3D também poderá beneficiar dos avanços na inteligência artificial, com software capaz de otimizar a resistência, forma aerodinâmica ou outras propriedades de um objeto, e até de conceber estruturas com formas impossíveis de fabricar através dos métodos tradicionais.

Novos softwares intuitivos estão a tornar mais fácil para qualquer pessoa criar peças impressas em 3D, mesmo sem formação avançada. À medida que a impressão 3D se tornou mais disseminada, começou a revolucionar a indústria da manufatura. Uma das grandes vantagens é a possibilidade de prototipagem rápida e económica. Engenheiros podem desenhar uma nova peça

no computador e, em questão de minutos ou horas, segurá-la nas mãos em forma de modelo impresso — um processo que, com tecnologias anteriores, poderia levar semanas. Isto permite ciclos rápidos de teste e modificação por uma fração do custo dos métodos tradicionais. Como consequência, pessoas com boas ideias, mas poucos recursos financeiros conseguem levar as suas inovações ao mercado e beneficiar a sociedade.

Outra vantagem essencial da impressão 3D é o nível de personalização que permite — algo impraticável na manufatura baseada em moldes. Mesmo uma ligeira alteração num design geralmente requer a criação de um molde totalmente novo, o que pode custar dezenas de milhares de dólares ou mais. Em contraste, alterações substanciais num design para impressão 3D não acarretam custo adicional. Assim, os inventores conseguem obter exatamente as peças de que necessitam para inovar, e os consumidores podem aceder a produtos personalizados a preços acessíveis. Um exemplo entre muitos é a produção de calçado feito à medida das dimensões exatas dos pés do cliente, para um ajuste e conforto muito superiores. Uma das empresas líderes neste domínio é a FitMyFoot, que permite aos clientes tirar fotografias dos pés com uma aplicação — imagens que são automaticamente convertidas em medidas para o processo de impressão.²⁶³ Da mesma forma, móveis podem ser moldados para se adaptarem a qualquer tipo de corpo, e ferramentas podem ser fabricadas para se ajustarem precisamente à sua mão.²⁶⁴ Mais importante ainda: implantes médicos essenciais tornar-se-ão mais baratos e eficazes.²⁶⁵



Um disco espinal de titânio impresso em 3D que pode ser implantado em pacientes com danos ou doenças na coluna vertebral. Crédito da fotografia: fotografia da FDA por Michael J. Ermarth, 2015.

Além disso, a impressão 3D permite uma manufatura descentralizada, conferindo poder aos consumidores e às comunidades locais. Isto contrasta com o paradigma que se consolidou ao longo do século XX, no qual a produção está largamente concentrada em fábricas corporativas gigantes situadas nas grandes cidades. Sob este modelo centralizado, pequenas localidades e países em desenvolvimento são obrigados a adquirir os seus produtos de locais distantes, enfrentando custos elevados e demoras no transporte. A manufatura descentralizada trará também benefícios ambientais significativos. O envio de produtos desde as fábricas até aos consumidores, frequentemente a centenas ou milhares de quilómetros de distância, gera emissões

colossais. Segundo o International Transport Forum, o transporte de mercadorias representa cerca de 30% de todas as emissões de carbono provenientes da queima de combustíveis.²⁶⁶ A impressão 3D descentralizada pode tornar grande parte desse processo desnecessário.

A cada ano, a resolução da impressão 3D melhora e a tecnologia torna-se mais acessível.²⁶⁷ À medida que a resolução aumenta — ou seja, à medida que diminui o tamanho mínimo das características que podem ser reproduzidas — e os custos descem, cresce também a gama de produtos que podem ser impressos de forma economicamente viável. Por exemplo, muitos tecidos comuns possuem fibras com diâmetros entre 10 e 22 micrómetros (milionésimos de metro).²⁶⁸ Algumas impressoras 3D já conseguem atingir resoluções de 1 micrómetro ou menos.²⁶⁹ Quando a tecnologia for capaz de alcançar essas dimensões com materiais semelhantes aos têxteis e a preços comparáveis aos tecidos tradicionais, tornar-se-á economicamente viável imprimir qualquer peça de roupa que desejarmos.²⁷⁰ Como a velocidade de impressão também está a aumentar, a manufatura em larga escala tornar-se-á cada vez mais prática.²⁷¹

Para além da manufatura de bens do quotidiano, como calçado e ferramentas, novas investigações estão a aplicar a impressão 3D ao domínio da biologia. Cientistas estão, neste momento, a testar técnicas que tornarão possível a impressão de tecidos humanos e, em última instância, de órgãos completos.²⁷² O princípio geral consiste na criação de uma “estrutura de suporte” tridimensional — ou scaffold — feita com um material biologicamente inerte, como

polímero sintético ou cerâmica, moldada na forma da estrutura corporal desejada. Sobre esta estrutura é depositado um fluido rico em células estaminais reprogramadas, que se multiplicam e preenchem o molde, criando assim um órgão de substituição compatível com o ADN do próprio paciente. A empresa United Therapeutics (da qual sou membro do conselho de administração) está a aplicar esta abordagem — entre outras — com o objetivo de, um dia, desenvolver pulmões, rins e corações inteiros.²⁷³ Este método será, em última análise, muito superior ao transplante de órgãos entre pessoas, o qual apresenta sérias limitações, tanto pela escassez de doadores como pela possibilidade de rejeição imunológica por parte do organismo do paciente.²⁷⁴

Um possível inconveniente associado à impressão 3D é a sua utilização para fabricar designs pirateados. Por que razão alguém pagaria 200 dólares por um par de sapatos de marca se pode simplesmente descarregar o ficheiro e imprimir-los em casa por uma fração do custo? Já enfrentamos desafios semelhantes no que toca à propriedade intelectual de músicas, livros, filmes e outras formas criativas. Tudo isto exigirá novas abordagens para proteger os direitos de propriedade intelectual.²⁷⁵

Outra implicação inquietante é que a manufatura descentralizada permitirá que civis criem armas a que, de outro modo, não teriam acesso com facilidade. Já circulam ficheiros na internet que possibilitam a impressão das peças necessárias para montar armas de fogo pessoais.²⁷⁶ Tal realidade representa um desafio sério para o controlo de armas, permitindo a criação de armamento sem número de série, o que dificulta a investigação e o rastreio por parte

das autoridades. Armas impressas em 3D, feitas com plásticos avançados, poderão inclusivamente contornar detetores de metais. Esta evolução exigirá uma reavaliação ponderada das políticas e regulamentações em vigor.

15. Impressão 3D de Edifícios

A impressão tridimensional costuma estar associada à produção de pequenos objetos, como ferramentas ou implantes médicos, mas também pode ser utilizada para criar estruturas de grande dimensão, como edifícios. Esta tecnologia está a evoluir rapidamente, passando da fase de protótipos para aplicações práticas, e à medida que as estruturas impressas em 3D se tornem mais baratas de produzir, tornar-se-ão uma alternativa comercialmente viável aos métodos de construção convencionais. Em última instância, a impressão 3D de módulos habitacionais e dos diversos objetos que compõem um edifício irá reduzir de forma drástica os custos de construção de habitações e escritórios.

Existem duas abordagens principais à impressão 3D de edifícios. A primeira consiste na criação de peças ou módulos que são posteriormente montados — de forma semelhante ao processo em que se adquirem móveis na IKEA e se montam as peças em casa.²⁷⁷ Em certos casos, isto implica a impressão de elementos como paredes e segmentos de telhado, que são depois conetados no local da construção — semelhante ao encaixe de peças de Lego. Por volta do final da década de 2020, será possível que esta montagem de módulos seja feita maioritariamente por robots.

A segunda abordagem consiste na impressão das estruturas de divisões completas ou de módulos habitacionais.²⁷⁸ Estes módulos, geralmente com base quadrada ou retangular, podem ser organizados em várias configurações. No estaleiro, são erguidos por gruas e rapidamente montados. Este processo reduz significativamente a perturbação e o incómodo que a construção costuma causar às zonas envolventes. Em 2014, a empresa chinesa WinSun demonstrou a construção de dez casas modulares simples em apenas vinte e quatro horas, por um custo inferior a 5.000 dólares cada.²⁷⁹ A China já se tornou num polo de construção com impressão 3D e, nas próximas décadas, terá grande necessidade de versões mais amadurecidas desta tecnologia.

Uma abordagem alternativa consiste na impressão de um edifício inteiro, concebido à medida, como um único módulo.²⁸⁰ Os engenheiros montam uma grande estrutura em redor da área onde o edifício será erguido, e o bico de impressão desloca-se roboticamente dentro dessa moldura, depositando camadas de material (por exemplo, betão) na forma das paredes. É necessário muito pouco trabalho humano para a construção estrutural principal, mas, após a sua conclusão, os trabalhadores podem entrar para finalizar o interior do edifício e acrescentar elementos como vidros das janelas e telhas. Por exemplo, em 2016, a empresa HuaShang Tengda anunciou a conclusão de uma moradia de dois andares que foi impressa como uma peça única em quarenta e cinco dias.²⁸¹ No momento em que escrevo estas linhas, esta tecnologia está a espalhar-se para os Estados Unidos, onde, em 2021, a empresa Alquist 3D completou a primeira casa impressa em 3D ocupada pelo proprietário, e em 2023 foi construída a primeira

habitação de vários andares em Houston.²⁸² Até ao final da década de 2020, a combinação da impressão 3D de grandes e pequenos objetos com robótica inteligente aumentará a capacidade de personalizar edifícios e, simultaneamente, reduzirá drasticamente os custos.

A impressão 3D de módulos habitacionais apresenta diversas vantagens fundamentais, que se tornarão ainda mais evidentes à medida que a tecnologia evoluir. Em primeiro lugar, reduz os custos de mão de obra, o que permitirá tornar a habitação básica mais acessível. Além disso, encurta os prazos de construção, o que reduz o impacto ambiental causado por obras prolongadas. Isto inclui a diminuição de fatores como resíduos e lixo, poluição luminosa e sonora, poeiras tóxicas, perturbações no tráfego e riscos para os trabalhadores. Para além disso, a impressão 3D facilita a construção com materiais que estão prontamente disponíveis no local, em vez de utilizar recursos que podem estar a centenas de quilómetros de distância, como a madeira ou o aço.

No futuro, a impressão 3D poderá ser utilizada para tornar a construção de arranha-céus mais fácil e económica. Um dos principais desafios da construção de edifícios altos é transportar pessoas e materiais de construção até aos andares superiores. Um sistema de impressão 3D, em conjunto com robots autónomos capazes de utilizar materiais de construção bombeados a partir do solo em estado líquido, tornará este processo muito mais simples e menos dispendioso.

16. Pessoas Diligentes Alcançarão a Velocidade de Escape da Longevidade por Volta de 2030

A abundância material e a democracia pacífica tornam a vida melhor, mas o desafio com maiores implicações é o esforço para preservar a própria vida. Como descrevo no capítulo 6, o método de desenvolvimento de novos tratamentos de saúde está a mudar rapidamente, passando de um processo linear, baseado em tentativas e erros, para uma tecnologia de informação exponencial, na qual reprogramamos sistematicamente o software subótimo da vida.

A vida biológica é subótima porque a evolução é composta por processos aleatórios, otimizados pela seleção natural. Assim, à medida que a evolução foi "explorando" o leque de possíveis traços genéticos, fê-lo de forma fortemente dependente do acaso e da influência de fatores ambientais específicos. Além disso, o facto de este processo ser gradual implica que a evolução só consegue alcançar uma determinada estrutura se todos os passos intermédios rumo a essa característica também contribuírem para o sucesso do organismo no seu ambiente. Por conseguinte, há certamente traços potenciais que poderiam ser muito úteis, mas que são inacessíveis à evolução natural, porque os passos incrementais necessários para os alcançar não seriam vantajosos do ponto de vista evolutivo. Em contraste, ao aplicarmos inteligência (humana ou artificial) à biologia, poderemos explorar sistematicamente todo o espectro das possibilidades genéticas em busca dos traços mais benéficos — incluindo aqueles que a evolução natural nunca conseguiria atingir.

Estamos agora a entrar na fase exponencial da biotecnologia, após cerca de duas décadas de progresso exponencial no sequenciamento do genoma (com uma duplicação do desempenho/preço aproximadamente a cada ano) desde a conclusão do Projeto Genoma Humano, em 2003 — e, em termos de pares de bases, essa duplicação tem ocorrido, em média, a cada catorze meses, abrangendo múltiplas tecnologias e remontando até ao primeiro sequenciamento de nucleótidos de ADN, em 1971.²⁸³ Estamos finalmente a atingir a parte mais acentuada de uma curva exponencial com cinquenta anos de desenvolvimento.

Estamos a começar a utilizar a Inteligência Artificial tanto para a descoberta como para o desenvolvimento (ou conceção) de fármacos e outras intervenções, e até ao final da década de 2020 os simuladores biológicos estarão suficientemente avançados para gerar dados cruciais sobre segurança e eficácia em poucas horas, em vez dos anos que os ensaios clínicos costumam exigir. A transição dos ensaios clínicos humanos para ensaios simulados *in silico* será orientada por duas forças em direções opostas. Por um lado, existirá uma preocupação legítima com a segurança: não queremos que as simulações ignorem factos médicos relevantes e declarem, por erro, um medicamento perigoso como sendo seguro. Por outro lado, os ensaios simulados poderão envolver um número vastíssimo de “pacientes virtuais” e estudar uma ampla gama de comorbilidades* e fatores demográficos — oferecendo aos médicos

* “Comorbilidades” refere-se à presença simultânea de duas ou mais doenças ou condições médicas num mesmo indivíduo. No contexto da frase — “estudar uma ampla gama de comorbilidades e fatores demográficos” — significa que os ensaios simulados poderão considerar diferentes combinações de doenças ou condições que uma pessoa possa ter (como, por exemplo, diabetes + hipertensão + obesidade) e como essas combinações específicas interagem com determinado tratamento ou medicamento. Ou seja, a simulação permitirá ver, com muito mais detalhe, como uma nova intervenção

dados altamente detalhados sobre como um novo tratamento poderá afetar diferentes perfis de pacientes. Além disso, disponibilizar medicamentos que salvam vidas de forma mais rápida poderá significar salvar muitas mais vidas. A transição para os ensaios simulados enfrentará também incertezas políticas e resistências burocráticas, mas, no fim, será a eficácia desta tecnologia que prevalecerá.

Dois exemplos notáveis ilustram os benefícios que os ensaios in silico irão proporcionar:

- A imunoterapia, que tem permitido a muitos doentes com cancro em estadio 4 (e outros casos considerados terminais) entrar em remissão, representa um avanço extremamente promissor no tratamento do cancro.²⁸⁴ Tecnologias como a terapia com células CAR-T reprogramam as próprias células imunitárias do paciente para que reconheçam e destruam as células cancerígenas.²⁸⁵ Até agora, a descoberta de abordagens deste tipo tem sido limitada pela nossa compreensão biomolecular ainda incompleta sobre como o cancro consegue escapar ao sistema imunitário, mas as simulações com Inteligência Artificial ajudarão a desbloquear esse impasse.

poderá afetar pacientes reais que não têm uma só condição de saúde, mas várias ao mesmo tempo, o que é muito comum na vida real — especialmente em populações envelhecidas.

- Com as células estaminais pluripotentes induzidas (iPS)^{**} “induced pluripotent stem cells”, estamos a adquirir a capacidade de rejuvenescer o coração após um enfarte e superar a chamada “fração de ejeção reduzida”, que afeta muitos sobreviventes de ataques cardíacos (e da qual o meu pai faleceu). Já estamos a cultivar órgãos utilizando células iPS — células adultas que são convertidas em células estaminais através da introdução de genes específicos. Até 2023, as células iPS já tinham sido utilizadas na regeneração de traqueias, ossos craniofaciais, células da retina, nervos periféricos e tecido cutâneo, bem como tecidos de órgãos vitais como o

^{**} As células iPS (induced pluripotent stem cells, ou células estaminais pluripotentes induzidas) são células adultas reprogramadas geneticamente para regressar a um estado semelhante ao das células estaminais embrionárias. Ou seja, em termos simples, uma célula da pele, por exemplo, pode ser reprogramada para “esquecer” a sua função original e retornar a um estado indiferenciado, ou seja, um estado em que tem o potencial de se transformar em quase qualquer outro tipo de célula do corpo humano (como neurónios, células do coração, fígado, etc.).

Como isso é feito?

Através da introdução de genes específicos (como os chamados “fatores de Yamanaka”) que reativam programas genéticos embrionários. Esse processo foi descoberto pelo cientista japonês Shinya Yamanaka, que por isso recebeu o Prémio Nobel da Medicina em 2012.

Por que são importantes?

1. **Ética:** evitam o uso de embriões humanos, pois derivam de células adultas.
2. **Medicina personalizada:** como são feitas a partir das células do próprio paciente, reduzem o risco de rejeição imunológica.
3. **Regeneração de órgãos e tecidos:** permitem criar tecidos compatíveis para transplantes e para estudar doenças em laboratório.
4. **Pesquisa biomédica e testes de fármacos:** ajudam a estudar doenças complexas como Alzheimer ou Parkinson, em modelos celulares vivos derivados do próprio paciente.

coração, o fígado e os rins.²⁸⁶ Como as células estaminais se assemelham, em certos aspetos, às células cancerígenas, uma linha de investigação crucial no futuro será encontrar formas de minimizar o risco de divisão celular descontrolada. Estas células iPS podem atuar de forma semelhante às células estaminais embrionárias e têm a capacidade de se diferenciar em praticamente todos os tipos de células humanas. A técnica ainda se encontra em fase experimental, mas já foi aplicada com sucesso em seres humanos. Para doentes cardíacos, o tratamento envolve criar células iPS a partir do próprio paciente, cultivá-las em folhas macroscópicas de tecido muscular cardíaco e enxertá-las no coração danificado. Acredita-se que a terapia funcione através da libertação, pelas células iPS, de fatores de crescimento que estimulam o tecido cardíaco existente a regenerar-se. Em essência, poderão estar a enganar o coração, levando-o a acreditar que se encontra num ambiente fetal. Este procedimento está a ser utilizado para uma vasta gama de tecidos biológicos. Assim que consigamos analisar os mecanismos de ação das células iPS com o auxílio de IA avançada, a medicina regenerativa poderá desbloquear, de forma eficaz, os próprios planos estruturais do corpo humano para a sua autocura.

Como resultado destas tecnologias, os antigos modelos lineares de progresso na medicina e na longevidade deixarão de ser adequados. Tanto a nossa intuição natural como uma visão retrospectiva da história sugerem que os próximos vinte anos de

avanços serão aproximadamente como os últimos vinte. Contudo, essa percepção ignora a natureza exponencial do processo. O conhecimento de que a extensão radical da vida está próxima está a espalhar-se, mas a maioria das pessoas — tanto médicos como pacientes — continua alheia a esta grande transformação na nossa capacidade de reprogramar a biologia desatualizada.

Como mencionado anteriormente neste capítulo, a década de 2030 trará uma nova revolução na área da saúde, a que o meu livro sobre saúde (coautoria com Terry Grossman, MD) chama a terceira ponte para a extensão radical da vida: os nanorrobôs médicos. Esta intervenção irá ampliar de forma radical o sistema imunitário. O nosso sistema imunitário natural, que inclui células T capazes de destruir de forma inteligente microrganismos hostis, é extremamente eficaz contra muitos tipos de patógenos — a tal ponto que não viveríamos muito tempo sem ele. No entanto, esse sistema evoluiu numa Era em que os alimentos e os recursos eram escassos e a maioria dos humanos tinha uma esperança de vida curta. Se os primeiros humanos se reproduziam na juventude e depois morriam por volta dos vinte e poucos anos, a evolução não teve motivos para favorecer mutações que pudessem fortalecer o sistema imunitário contra ameaças que só se manifestam mais tarde na vida, como o cancro e doenças neurodegenerativas (frequentemente causadas por proteínas mal dobradas, chamadas priões). Do mesmo modo, como muitos vírus provêm de animais domésticos, os nossos antepassados evolucionários, que viveram antes da domesticação de animais, não desenvolveram defesas fortes contra esses vírus.²⁸⁷

Os nanorrobôs não só serão programados para destruir todos os tipos de patógenos, como também serão capazes de tratar doenças metabólicas. Com exceção do coração e do cérebro, os nossos principais órgãos internos têm funções relacionadas com a introdução ou remoção de substâncias na corrente sanguínea, e muitas doenças resultam do seu mau funcionamento. Por exemplo, a diabetes tipo 1 é causada pela falência das células das ilhotas pancreáticas em produzir insulina.²⁸⁸ Os nanorrobôs médicos irão monitorizar o fornecimento sanguíneo e aumentar ou reduzir várias substâncias, incluindo hormonas, nutrientes, oxigénio, dióxido de carbono e toxinas, aumentando ou mesmo substituindo a função dos órgãos. Com estas tecnologias, até ao final da década de 2030, seremos em grande parte capazes de ultrapassar as doenças e o processo de envelhecimento.

A década de 2020 assistirá a descobertas farmacêuticas e nutricionais cada vez mais dramáticas, impulsionadas sobretudo por inteligência artificial avançada — não serão suficientes, por si só, para curar o envelhecimento, mas permitirão prolongar muitas vidas o suficiente para alcançar a terceira ponte. Assim, por volta de 2030, as pessoas mais diligentes e informadas alcançarão a “velocidade de escape da longevidade” — um ponto de viragem no qual conseguimos adicionar mais de um ano à nossa esperança de vida remanescente por cada ano civil que passa. As areias do tempo começarão a correr para dentro, em vez de para fora.

A quarta ponte para a extensão radical da vida será a capacidade de, essencialmente, fazer uma cópia de segurança de quem somos, tal como fazemos rotineiramente com toda a nossa informação

digital. À medida que formos aumentando o nosso neocórtex biológico com modelos realistas (embora muito mais rápidos) do neocórtex na nuvem, o nosso pensamento tornar-se-á um híbrido entre o pensamento biológico a que estamos habituados e a sua extensão digital. A porção digital expandir-se-á exponencialmente e acabará por predominar. Tornar-se-á suficientemente poderosa para compreender, modelar e simular completamente a parte biológica, permitindo-nos fazer cópias de segurança de todo o nosso pensamento. Este cenário tornar-se-á realista à medida que nos aproximarmos da Singularidade, prevista para meados da década de 2040.

O objetivo final é colocar o nosso destino nas nossas próprias mãos, e não nas mãos metafóricas do destino — viver tanto quanto desejarmos. Mas por que é que alguém haveria de escolher morrer? A investigação mostra que aqueles que põem termo à própria vida estão, geralmente, em sofrimento insuportável, seja ele físico ou emocional.²⁸⁹ Embora os avanços na medicina e na neurociência não consigam prevenir todos esses casos, é provável que os tornem muito mais raros.

Uma vez que tenhamos feito cópias de segurança de nós próprios, como poderíamos morrer, afinal? A nuvem já possui múltiplas cópias de toda a informação que contém — uma característica que será enormemente reforçada na década de 2040. Destruir todas as cópias de uma pessoa poderá tornar-se algo praticamente impossível. Se projetarmos os sistemas de backup mental de forma a que uma pessoa possa facilmente apagar os seus ficheiros (com o intuito de maximizar a autonomia pessoal), isso

cria, inevitavelmente, riscos de segurança: uma pessoa poderá ser enganada ou coagida a fazê-lo, além de aumentar a vulnerabilidade a ciberataques. Por outro lado, limitar a capacidade de uma pessoa controlar os dados mais íntimos sobre si mesma compromete uma liberdade fundamental. Sou, contudo, otimista: acredito que se poderão desenvolver mecanismos de proteção adequados, à semelhança daqueles que têm protegido com sucesso as armas nucleares ao longo das décadas.

Se restaurássemos o ficheiro da mente após a morte biológica, estaríamos realmente a restaurar o “eu”? Como referi no capítulo 3, essa não é uma questão científica, mas filosófica, e teremos de nos confrontar com ela durante a vida da maioria das pessoas que já cá estão.

Por fim, surge uma preocupação ética relacionada com a equidade e a desigualdade. Um desafio comum às previsões sobre a extensão radical da vida é o argumento de que apenas os mais ricos poderão pagar por essas tecnologias. A minha resposta é apontar para a história do telemóvel. De facto, era necessário ser rico para ter um telemóvel há apenas trinta anos — e mesmo assim, esse dispositivo não funcionava muito bem. Hoje existem milhares de milhões de telemóveis, que fazem muito mais do que apenas chamadas. São extensores da memória humana que nos permitem aceder a praticamente todo o conhecimento humano. Estas tecnologias começam por ser caras e com funcionalidades limitadas. Mas quando são aperfeiçoadas, tornam-se acessíveis a quase todos. E a razão disso está na melhoria exponencial da relação custo-desempenho, característica das tecnologias da informação.

17. A Maré a Aumentar

Como defendi neste capítulo, ao contrário de muitas suposições populares, a vida está a tornar-se melhor de formas profundas e fundamentais para a grande maioria das pessoas no planeta. Mais importante ainda, isto não é apenas uma coincidência. As vastas melhorias que observámos ao longo dos últimos dois séculos — em áreas como a literacia e o ensino, o saneamento, a esperança média de vida, a energia limpa, a pobreza, a violência e a democracia — são todas impulsionadas pela mesma dinâmica subjacente: a tecnologia da informação facilita o seu próprio avanço. Esta percepção, que está no cerne da Lei dos Retornos Acelerados, explica os círculos virtuosos que têm transformado a vida humana de forma tão dramática. A tecnologia da informação lida com ideias, e melhorar exponencialmente a nossa capacidade de partilhar ideias e criar novas dá a cada um de nós — no sentido mais amplo possível — um poder crescente para realizar o nosso potencial humano e, coletivamente, resolver muitos dos males que afligem a sociedade.

A tecnologia da informação, em constante aceleração, é como uma maré crescente que eleva todos os barcos da condição humana. E estamos agora prestes a entrar num período em que essa maré irá subir como nunca antes. A chave para isso é a Inteligência Artificial, que nos está a permitir transformar muitos tipos de tecnologia — que até aqui progrediam de forma linear — em tecnologia da informação exponencial: da agricultura à medicina, da indústria à gestão do território. Esta força é o que tornará a própria vida exponencialmente melhor nos tempos que se avizinham.

A jornada da humanidade rumo a uma vida mais fácil, segura e abundante para todos tem vindo a progredir há anos, décadas, séculos e milénios. É-nos verdadeiramente difícil imaginar como era a vida há apenas cem anos, quanto mais antes disso. O nosso progresso acelerado, com avanços substanciais nas últimas décadas e uma evolução ainda mais profunda nas próximas, projetar-nos-á para a frente nesta direção positiva, muito para além daquilo que atualmente conseguimos imaginar.

CAPÍTULO 5

O Futuro dos Empregos: Bom ou Mau?

1. A Revolução Atual

As tecnologias convergentes das próximas duas décadas criarão uma enorme prosperidade e uma abundância material à escala mundial. Mas essas mesmas forças também irão perturbar profundamente a economia global, obrigando a sociedade a adaptar-se a um ritmo sem precedentes.

Em 2005, o ano em que *A Singularidade Está Próxima* foi publicada, a DARPA atribuiu um prémio de 2 milhões de dólares a uma equipa da Universidade de Stanford, vencedora do seu desafio de veículos autónomos.¹ Na altura, os automóveis de condução autónoma ainda pertenciam ao reino da ficção científica no imaginário público, e até muitos especialistas acreditavam que estavam a pelo menos um século de distância. Contudo, quando a Google lançou um ambicioso projeto movido a IA em 2009, o progresso começou a acelerar rapidamente. O projeto transformou-se numa empresa independente chamada Waymo, que em 2020 já oferecia táxis totalmente autónomos ao público na zona de Phoenix, nos Estados Unidos, expandindo-se depois para São Francisco.² No momento em que lê estas linhas, o seu serviço de transporte de

passageiros já terá sido alargado a Los Angeles e possivelmente a outras cidades.³

Os veículos de condução autónoma da Waymo já percorreram mais de 20 milhões de milhas em modo totalmente autónomo à data desta escrita (um número que continua a aumentar rapidamente — um dos desafios de escrever este livro!).⁴ Esta experiência no mundo real serviu de base para que a Waymo criasse e aperfeiçoasse um simulador realista — um ambiente virtual capaz de recriar as inúmeras variáveis e imprevistos da condução.

Estes dois modos [condução no mundo real e em ambiente virtual] têm as suas próprias forças e fraquezas, mas em conjunto servem para se reforçarem mutuamente. A condução no mundo real é plenamente realista e envolve situações inesperadas que os engenheiros poderiam nunca antecipar por si mesmos, nem colocar num ambiente simulado. No entanto, quando a Inteligência Artificial enfrenta dificuldades com uma situação no mundo real, os engenheiros não podem simplesmente parar o trânsito e dizer a todos os condutores à volta: “Tentem outra vez, mas desta vez a cinco milhas por hora mais rápido.”

Por contraste, a condução em mundo virtual permite testes em grande escala, com ajuste científico exato dos parâmetros necessários para dominar determinada situação. Além disso, é possível simular cenários de risco que não seriam suficientemente seguros para treinar a IA em condução no mundo real. Ao expor a IA a milhões de circunstâncias diferentes desta forma, os

engenheiros conseguem identificar os problemas mais relevantes a abordar no mundo real.

Para termos uma ideia da quantidade de dados que a simulação possibilita em comparação com a realidade, em 2018 a Waymo começou a simular tantos quilómetros de condução por dia como aqueles que tinha acumulado, até então, nas estradas reais desde o início do projeto em 2009. Em 2021, o ano mais recente para o qual há dados disponíveis à data em que este texto foi escrito, essa impressionante proporção ainda se mantinha — cerca de 20 milhões de quilómetros simulados por dia, contra mais de 20 milhões de quilómetros reais desde a sua fundação.⁵

Como foi abordado no capítulo 2, este tipo de simulação pode gerar exemplos suficientes para treinar redes neuronais profundas (por exemplo, com cem camadas). Foi assim que a subsidiária da Alphabet, DeepMind, gerou dados suficientes para ultrapassar os melhores humanos no jogo de tabuleiro Go.⁶ Simular o mundo da condução é muito mais complexo do que simular o mundo do Go, mas a Waymo utiliza a mesma estratégia fundamental — e já refinou os seus algoritmos com mais de 20 mil milhões de quilómetros de condução simulada⁷, gerando dados suficientes para aplicar o deep learning (aprendizagem profunda) e melhorar os seus algoritmos.

Se o seu trabalho consiste em conduzir um automóvel, autocarro ou camião, esta notícia poderá deixá-lo apreensivo. Nos Estados Unidos, mais de 2,7% das pessoas empregadas trabalham como algum tipo de condutor — seja a conduzir camiões, autocarros,

táxis, carrinhas de entregas ou outro tipo de veículo.⁸ De acordo com os dados mais recentes disponíveis, esta percentagem corresponde a mais de 4,6 milhões de postos de trabalho.⁹ Embora haja espaço para debate quanto à velocidade com que os automóveis autónomos levarão estas pessoas a perder os seus empregos, é praticamente certo que muitos deles os perderão antes de atingirem a idade da reforma. Para além disso, a automação que afetará estas funções terá impactos desiguais por todo o país. Enquanto em estados grandes como a Califórnia e a Flórida os condutores representam menos de 3% da força de trabalho empregada, no Wyoming e no Idaho esse número ultrapassa os 4%.¹⁰ Em partes do Texas, Nova Jérсия e Nova Iorque, essa percentagem sobe para 5%, 7% ou mesmo 8%.¹¹ A maioria destes condutores são homens, de meia-idade, e sem formação universitária.¹²

Mas os automóveis autónomos não irão apenas afetar os empregos das pessoas que fisicamente conduzem. À medida que os camionistas forem perdendo os seus empregos para a automação, haverá menos necessidade de pessoas para tratar dos salários dos camionistas e menos empregados no comércio a retalho de lojas de conveniência à beira da estrada e hotéis. Haverá também menos necessidade de pessoal para limpar casas de banho em áreas de serviço, e uma menor procura de trabalhadoras do sexo nos locais frequentados por camionistas hoje em dia. Embora se saiba, de forma geral, que estes efeitos ocorrerão, é muito difícil estimar com precisão a sua dimensão ou a velocidade com que essas mudanças acontecerão. Ainda assim, é útil ter presente que as indústrias de transporte e setores relacionados empregam diretamente cerca de

10,2% dos trabalhadores nos EUA, segundo a estimativa mais recente (2021) do Bureau of Transportation Statistics.¹³ Mesmo perturbações relativamente pequenas num sector tão grande terão consequências significativas.

No entanto, a condução é apenas uma entre muitas profissões que estão ameaçadas num futuro relativamente próximo pela Inteligência Artificial que tira partido da vantagem de ser treinada com conjuntos de dados massivos. Um estudo marcante de 2013, conduzido por académicos da Universidade de Oxford, Carl Benedikt Frey e Michael Osborne, classificou cerca de setecentas ocupações de acordo com a sua probabilidade de serem perturbadas até ao início da década de 2030.¹⁴ Entre as categorias profissionais com 99 por cento de probabilidade de serem automatizadas encontravam-se operadores de telemarketing, avaliadores de seguros e preparadores de impostos.¹⁵ Mais de metade de todas as ocupações apresentavam uma probabilidade superior a 50 por cento de serem automatizáveis.¹⁶

No topo dessa lista estavam empregos em fábricas, atendimento ao cliente, setor bancário e, naturalmente, a condução de automóveis, camiões e autocarros.¹⁷ No fundo da lista encontravam-se profissões que exigem interação pessoal próxima e flexível, como terapeutas ocupacionais, assistentes sociais e trabalhadoras do sexo.¹⁸

Ao longo da década desde a publicação desse relatório, foram-se acumulando evidências que confirmam as suas conclusões centrais surpreendentes. Um estudo de 2018, da Organização para

a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), analisou a probabilidade de cada tarefa, dentro de uma dada profissão, poder ser automatizada, tendo obtido resultados semelhantes aos de Frey e Osborne.¹⁹ A conclusão foi que 14 por cento dos empregos, em trinta e dois países, tinham mais de 70 por cento de probabilidade de serem eliminados devido à automação ao longo da década seguinte, e outros 32 por cento apresentavam uma probabilidade superior a 50 por cento.²⁰ Os resultados do estudo sugeriram que cerca de 210 milhões de postos de trabalho estavam em risco nestes países.²¹ De facto, um relatório da OCDE de 2021 confirmou, com base nos dados mais recentes, que o crescimento do emprego tem sido muito mais lento nas profissões com maior risco de automação.²² E toda esta investigação foi realizada antes dos avanços da Inteligência Artificial generativa, como o ChatGPT e o Bard. As estimativas mais recentes, como as de um relatório da McKinsey de 2023, indicam que 63 por cento de todo o tempo de trabalho nas economias desenvolvidas atuais é gasto em tarefas que já poderiam ser automatizadas com a tecnologia disponível atualmente.²³ Se a adoção for rápida, metade deste trabalho poderá ser automatizado até 2030, enquanto os cenários intermédios da McKinsey apontam para 2045 — assumindo que não haja novos avanços significativos na IA. Mas sabemos que a Inteligência Artificial continuará a evoluir — exponencialmente — até atingirmos uma IA de nível sobre-humano e uma manufatura totalmente automatizada e precisa a nível atómico (controlada por IA) algures durante a década de 2030.

No entanto, esta está longe de ser a primeira vez que as pessoas conseguem ver, com clareza, que os seus empregos estão prestes

a sucumbir em massa à automação. A história começou há dois séculos, quando os tecelões de Nottingham se viram ameaçados pela introdução do tear mecânico e de outras máquinas têxteis.²⁴ Estes trabalhadores viviam com alguma dignidade graças à sua produção habilidosa de meias e rendas, em pequenos negócios familiares estáveis que se transmitiam de geração em geração. Mas as inovações tecnológicas do início do século XIX transferiram o poder económico da indústria para as mãos dos proprietários das máquinas, deixando os tecelões em risco de perderem os seus meios de subsistência.

Não se sabe ao certo se Ned Ludd existiu realmente, mas a lenda conta que ele terá danificado acidentalmente maquinaria de uma fábrica têxtil, e que qualquer equipamento destruído a partir de então — fosse por engano ou em protesto contra a automação — era atribuído a Ludd.²⁵ Quando, em 1811, os tecelões desesperados formaram um exército guerrilheiro urbano, declararam o General Ludd como seu líder.²⁶ Estes Ludditas, como ficaram conhecidos, revoltaram-se contra os donos das fábricas — inicialmente, a sua violência dirigia-se sobretudo contra as máquinas, mas rapidamente houve derramamento de sangue. O movimento terminou com a prisão e enforcamento dos principais líderes ludditas pelo governo britânico.²⁷ Ned Ludd nunca chegou a ser encontrado.

Os tecelões tinham visto todo o seu modo de vida ser destruído. Do seu ponto de vista, era irrelevante que tivessem surgido empregos melhor remunerados para conceber, fabricar e comercializar as novas máquinas. Não existiam programas estatais

para os requalificar, e tinham passado a vida a aperfeiçoar uma habilidade que se tornara obsoleta. Muitos foram forçados a aceitar trabalhos pior remunerados, pelo menos durante algum tempo. Contudo, um resultado positivo desta primeira vaga de automação foi que as pessoas comuns passaram a poder comprar um guarda-roupa bem confeccionado, em vez de apenas uma camisa. E, com o tempo, surgiram novas indústrias como consequência da automação. A prosperidade gerada por esse processo foi o principal fator que ditou o fim do movimento Luddista original. Embora os Ludditas tenham ficado para a história, tornaram-se um símbolo poderoso dos que protestam por se sentirem deixados para trás pelo progresso tecnológico.

2. Destruição e Criação

Se eu fosse um futurista clarividente no ano de 1900, teria dito à força laboral: “Cerca de 40 por cento de vós trabalha na agricultura (um número que era superior a 80 por cento em 1810), e um quinto trabalha em fábricas. No entanto, prevejo que, até ao ano de 2023, a percentagem de pessoas a trabalhar na indústria transformadora cairá para menos de metade (para 7,8 por cento), e as que trabalham na agricultura diminuirão mais de 95 por cento (para menos de 1,4 por cento)”.²⁸

Poderia ter continuado, dizendo: “Não vos deveis preocupar, no entanto, porque o emprego, na verdade, irá aumentar em vez de diminuir. Serão criados mais empregos do que aqueles que forem eliminados.” Se, então, me perguntassem: “Que novos empregos?”, uma resposta honesta teria sido: “Não sei — ainda não foram

inventados. E surgirão em indústrias que ainda não existem.” O facto de esta resposta não ser particularmente satisfatória ilustra bem por que é que a automação está associada a ansiedade política.

Se eu fosse mesmo clarividente, teria dito às pessoas, em 1990, que em breve surgiriam empregos para criar e operar sites e aplicações móveis, para fazer análise de dados e comércio online. Mas ninguém teria compreendido do que eu estava a falar.

De facto, apesar da redução dramática em muitas categorias de emprego, o número total de postos de trabalho aumentou de forma significativa — tanto em termos absolutos como proporcionais. Em 1900, a força de trabalho total nos Estados Unidos era de cerca de 29 milhões, o que correspondia a 38 por cento da população.²⁹ No início de 2023, era de cerca de 166 milhões, correspondendo a mais de 49 por cento da população.³⁰

Não só o número total de empregos está a crescer, como também os trabalhadores que ocupam esses empregos trabalham menos horas e ganham mais dinheiro. Nos Estados Unidos, o número anual de horas trabalhadas por trabalhador caiu de pouco mais de 2.900 em 1870 para cerca de 1.765 em 2019 (antes das perturbações causadas pela COVID-19).³¹ E, apesar da redução nas horas de trabalho, os rendimentos anuais médios dos trabalhadores multiplicaram-se por mais de quatro, em dólares constantes, desde 1929.³² Nesse ano, o rendimento pessoal anual per capita nos Estados Unidos era de cerca de 700 dólares. Como apenas 48 milhões dos 122,8 milhões de habitantes do país estavam empregados, isso traduz-se em cerca de 1.790 dólares por

trabalhador (aproximadamente 31.400 dólares em valores de 2023).³³ Em 2022, o rendimento pessoal per capita nos EUA foi estimado em 64.100 dólares, numa população de 332 milhões, dos quais cerca de 164 milhões faziam parte da força de trabalho.³⁴ Assim, os americanos empregados tiveram um rendimento médio anual de cerca de 129.800 dólares (aproximadamente 133.000 dólares em valores de 2023) — mais de quatro vezes o valor de nove décadas antes.

Note-se, no entanto, que embora esta média reflita ganhos significativos na riqueza geral do país, os rendimentos medianos (o valor que divide a população entre os que ganham mais e os que ganham menos) são bastante mais baixos. Não há dados fiáveis para 1929, mas em 2021 o rendimento mediano foi de 37.522 dólares, em comparação com a média de 64.100 dólares.³⁵ Parte desta diferença deve-se a rendimentos extremamente elevados por parte de uma minoria da população, bem como ao grande número de pessoas reformadas, estudantes, pais ou mães que ficam em casa, ou outras pessoas não empregadas.

Se analisarmos de forma mais específica os rendimentos por hora, observa-se uma tendência semelhante. Em 1929, o trabalhador americano médio trabalhava 2.316 horas por ano.³⁶ Com um rendimento médio de cerca de 31.400 dólares (ajustado para 2023), isso equivale a cerca de 13,55 dólares por hora. Em 2021, os americanos auferiram aproximadamente 10,8 biliões de dólares (valores ajustados para 2023) em salários e ordenados, com um total de 254 mil milhões de horas trabalhadas — cerca de 42,50 dólares por hora, ou mais do triplo do valor de 1929.³⁷

Na realidade, o aumento tem sido ainda maior. Certos tipos de trabalho não são captados pelas estatísticas oficiais sobre salários. Por exemplo, programadores informáticos freelance com rendimentos elevados não estão registados em folhas de pagamento. O mesmo acontece com empreendedores ou artistas criativos, que podem obter rendimentos muito elevados por cada hora trabalhada. Em 2021, o rendimento pessoal total nos Estados Unidos foi de cerca de 21,8 biliões de dólares (valores ajustados para 2023), o que implica um rendimento por hora aproximadamente o dobro do valor correspondente apenas a salários e ordenados.³⁸ Contudo, grande parte do rendimento pessoal (por exemplo, provenientes de arrendamento de imóveis) não se traduz directamente em horas de trabalho, pelo que o valor mais preciso encontra-se algures entre os dois extremos. Como discutido no capítulo anterior, estes ganhos nem sequer têm em conta o facto de muitos bens se terem tornado significativamente melhores pelo mesmo preço (ajustado à inflação) ao longo desse período, ou o facto de os consumidores terem agora acesso a inúmeras inovações.

Subjacente a grande parte deste progresso, a mudança tecnológica tem vindo a introduzir dimensões informacionais em trabalhos antigos e a criar milhões de novos empregos que não existiam há 25 anos — quanto mais há um século — e que exigem competências novas e de nível mais elevado.³⁹ Isto tem, até agora, compensado a destruição maciça de empregos agrícolas e industriais que em tempos ocuparam a maioria da força laboral.

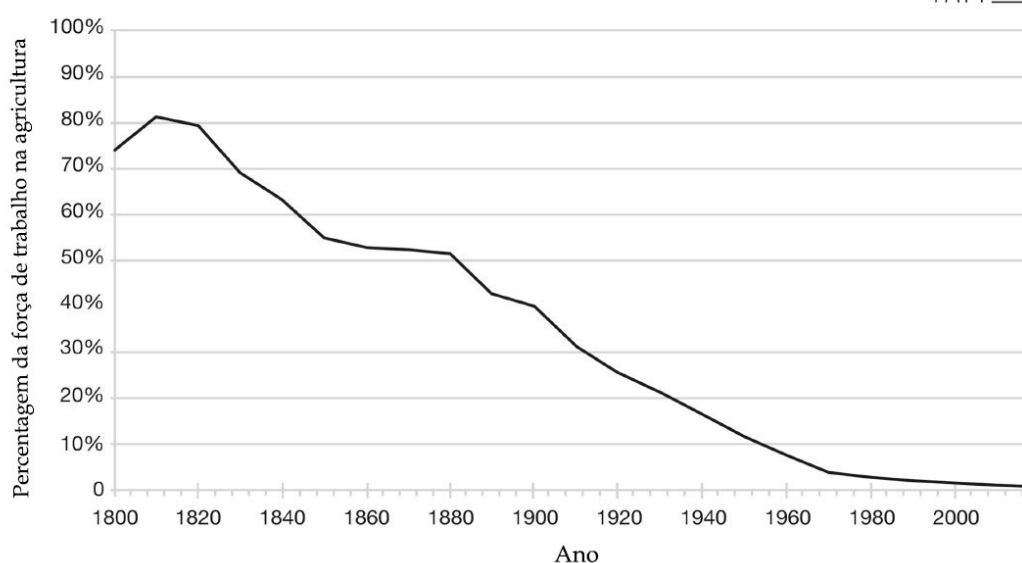
No início do século XIX, os Estados Unidos eram uma sociedade predominantemente agrícola. À medida que mais colonos se instalavam na jovem nação e avançavam para oeste dos Apalaches, a percentagem de americanos empregados na agricultura aumentava, atingindo mais de 80%.⁴⁰ No entanto, na década de 1820, essa proporção começou a decair rapidamente, à medida que os avanços tecnológicos na agricultura permitiram que menos agricultores alimentassem mais pessoas. Inicialmente, isso resultou de uma combinação entre métodos científicos melhorados de seleção de plantas e sistemas de rotação de culturas mais eficazes⁴¹. Com o avanço da Revolução Industrial, os equipamentos mecânicos de lavoura tornaram-se dispositivos importantes para poupança de trabalho.⁴² O ano de 1890 marcou a primeira vez em que a maioria dos americanos já não trabalhava em quintas, e a tendência acelerou-se bruscamente em 1910, com os tratores movidos a vapor ou a motores de combustão interna a substituírem os animais de trabalho, lentos e ineficazes.⁴³

Durante o século XX, o surgimento de pesticidas melhorados, fertilizantes químicos e modificação genética levou a uma explosão nos rendimentos agrícolas. Por exemplo, em 1850, o rendimento do trigo no Reino Unido era de 0,44 toneladas por acre.⁴⁴ Em 2022, esse valor tinha subido para 3,84 toneladas por acre.⁴⁵ Durante aproximadamente o mesmo período, a população do Reino Unido passou de cerca de 27 milhões para 67 milhões, pelo que a produção alimentar não só conseguiu acompanhar o crescimento populacional como também tornou os alimentos muito mais abundantes por pessoa.⁴⁶ Com o acesso a uma melhor nutrição, as pessoas tornaram-se mais altas, mais saudáveis e apresentaram

um melhor desenvolvimento cerebral durante a infância. Com mais indivíduos a alcançar o seu pleno potencial, foi desbloqueado mais talento para impulsionar inovações adicionais.⁴⁷

Olhando para o futuro, o surgimento da agricultura vertical automatizada poderá fomentar um novo salto vasto na produtividade e eficiência do setor agrícola. Empresas como a Hands Free Hectare, no Reino Unido, estão já a trabalhar para eliminar o trabalho humano de todas as etapas da produção agrícola.⁴⁸ À medida que a inteligência artificial e a robótica avançam, e a energia renovável se torna mais barata, ocorrerão reduções dramáticas no preço de muitos produtos agrícolas. Com os preços dos alimentos cada vez menos dependentes do trabalho humano e de recursos naturais escassos, a pobreza deixará de ser um obstáculo ao acesso a um fornecimento abundante de alimentos frescos, saudáveis e nutritivos.

Trabalho agrícola nos EUA desde 1800⁴⁹



Fontes: Gabinete Nacional de Investigação Económica; Departamento de Recenseamento dos Estados Unidos; Departamento de Estatísticas do Trabalho dos EUA; Organização Internacional do Trabalho

Embora muitos dos trabalhadores agrícolas que perderam os seus empregos tenham encontrado novo trabalho nas fábricas, uma história semelhante viria a repetir-se no setor fabril cerca de um século e meio mais tarde. Na primeira década do século XIX, cerca de 1 em cada 35 trabalhadores americanos estava empregado na indústria transformadora.⁴⁹ Contudo, a Revolução Industrial transformou rapidamente as grandes cidades, com o surgimento de fábricas movidas a vapor que exigiam milhões de trabalhadores pouco qualificados. Em 1870, quase 1 em cada 5 trabalhadores estava na indústria transformadora, principalmente no Norte, então em rápida industrialização.⁵⁰ A segunda vaga da Revolução Industrial trouxe uma nova massa de trabalhadores — em grande parte imigrantes — para a indústria, por volta do início do século XX. O desenvolvimento da linha de montagem aumentou enormemente a eficiência e, à medida que os preços dos produtos caíam, tornavam-se acessíveis a um número crescente de pessoas.⁵¹

Com o aumento da procura, as fábricas tiveram de contratar verdadeiros exércitos de trabalhadores, e o emprego no setor fabril durante tempos de paz atingiu o seu pico por volta de 1920, com cerca de 26,9% da força de trabalho civil.⁵² Os métodos para medir o tamanho da força de trabalho mudaram ao longo do tempo, pelo que não é possível comparar perfeitamente este valor com os das décadas seguintes, mas um facto geral é claro: à parte das perturbações causadas pela Grande Depressão (quando o emprego na indústria caiu temporariamente) e pela Segunda Guerra Mundial (quando aumentou temporariamente), cerca de 1 em cada 4 trabalhadores nos EUA manteve-se na indústria transformadora até

aos anos 1970.⁵³ Durante cerca de cinco décadas, não houve uma tendência clara de subida ou descida.

Depois, dois fatores relacionados com a tecnologia começaram a corroer o emprego nas fábricas americanas. Primeiro, inovações na logística e nos transportes — especialmente o transporte contentorizado — tornaram mais barato para as empresas externalizar a produção para países com mão de obra mais barata e importar os produtos acabados para os Estados Unidos.⁵⁴ A contentorização não é uma tecnologia vistosa como a robótica fabril ou a inteligência artificial, mas teve um dos impactos mais profundos na sociedade moderna de entre todas as inovações. Ao reduzir drasticamente o custo do transporte marítimo global, a contentorização tornou possível uma economia verdadeiramente global. Isso permitiu que uma enorme variedade de produtos se tornasse mais acessível ao cidadão comum, mas foi também um fator-chave na desindustrialização de vastas regiões dos Estados Unidos.

Em segundo lugar, a automatização reduziu a quantidade de trabalho humano exigido pelo setor de produção industrial doméstico. Enquanto as primeiras linhas de montagem envolviam um trabalho manual considerável em cada etapa, a introdução da robótica veio diminuir essa necessidade. Essa tendência foi reforçada na década de 1990, à medida que a informatização e a inteligência artificial começaram a tornar a automatização cada vez mais capaz e eficiente. Assim, o trabalhador médio da indústria transformadora, assistido por máquinas mais inteligentes, passou a conseguir produzir cada vez mais bens por hora. De facto, nas duas

décadas entre 1992 e 2012, enquanto a informatização transformava a produção fabril, a produção horária média por trabalhador industrial duplicou (ajustada à inflação).⁵⁵

Como resultado, no século XXI, a produção industrial e o emprego industrial passaram a estar dissociados. Em fevereiro de 2001, pouco antes da recessão *pós-dotcom*^{*} que se seguiu ao colapso das *empresas .com*^{**}, 17 milhões de americanos tinham empregos no setor industrial.⁵⁶ Esse número caiu acentuadamente durante a recessão e nunca mais recuperou — os empregos mantiveram-se estáveis nos 14 milhões durante todo o *boom* económico da primeira metade dos anos 2000, apesar de um aumento substancial na produção.⁵⁷ Em dezembro de 2007, no início da Grande Recessão, cerca de 13,7 milhões de americanos trabalhavam na indústria transformadora, número que caiu para 11,4 milhões em fevereiro de 2010.⁵⁸ A produção industrial recuperou rapidamente e, em 2018, estava de novo perto dos máximos históricos — mas muitos dos empregos perdidos nunca

* Período de desaceleração económica que ocorreu após o estouro da bolha das empresas de tecnologia no início dos anos 2000. Durante a década de 1990, houve um grande crescimento no setor de tecnologia, impulsionado pelo entusiasmo em torno da internet e das startups digitais. No entanto, muitas dessas empresas estavam supervalorizadas e não tinham modelos de negócios sustentáveis. Quando o mercado percebeu isso, houve um colapso das ações de tecnologia, levando a uma recessão que afetou diversos setores da economia.

Esse período de recessão começou em março de 2001 e durou até novembro de 2001, impactando o emprego e a produção industrial nos Estados Unidos. Foi um momento de ajuste para o mercado, que passou a ser mais cauteloso com investimentos em tecnologia.

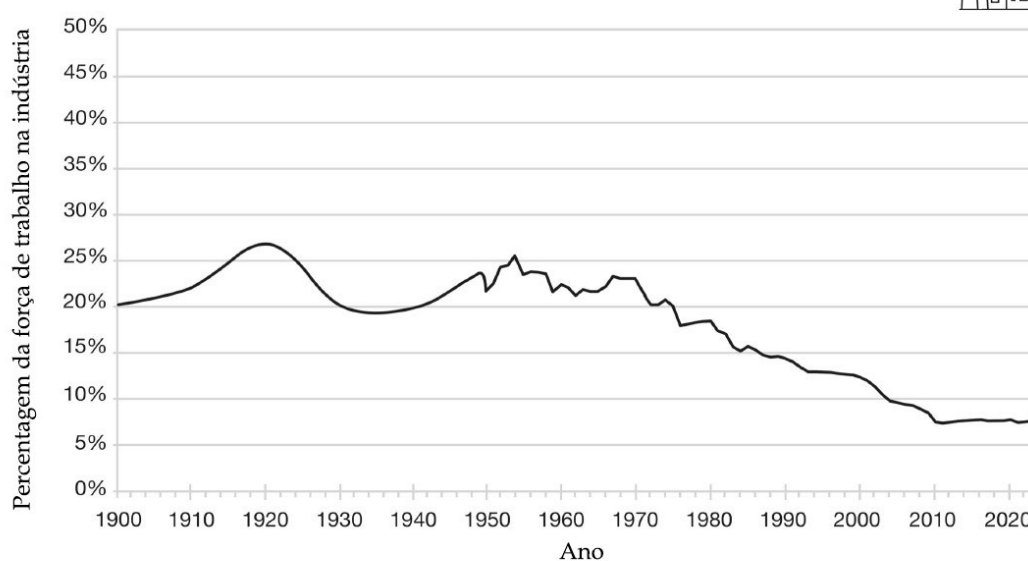
** O termo "empresas .com" refere-se às empresas que surgiram e cresceram rapidamente durante o boom da internet no final dos anos 1990 e início dos anos 2000. Muitas dessas empresas eram startups focadas em tecnologia e serviços online, operando principalmente na web.

O nome vem da extensão ".com", que era usada nos domínios de sites comerciais na internet. Durante esse período, houve uma grande euforia em torno dessas empresas, levando a investimentos massivos — mas, infelizmente, muitas delas não tinham modelos de negócios sustentáveis. Quando a bolha estourou, muitas fecharam ou perderam grande parte de seu valor no mercado, causando a recessão *pós-dotcom*.

regressaram.⁵⁹ Mesmo em novembro de 2022, apenas 12,9 milhões de trabalhadores eram necessários para produzir esse volume de produção.⁶⁰

Olhando para o século passado, estas tendências são impressionantes. Depois de se manterem estáveis entre os 20% e os 25% entre 1920 e 1970, os empregos na indústria transformadora têm vindo a diminuir constantemente como fração da força de trabalho nas cinco décadas seguintes — para 17,5% em 1980, 14,1% em 1990, 12,1% em 2000, e atingindo um mínimo de 7,5% em 2010.⁶¹ Na década seguinte, este valor manteve-se essencialmente estável, apesar da expansão económica sustentada e do crescimento saudável da produção industrial. Assim, no início de 2023, o setor industrial empregava cerca de 1 em cada 13 trabalhadores americanos.⁶²

Trabalho na indústria nos EUA desde 1900⁶⁴



Fonte: Departamento de Estatísticas do Trabalho dos EUA; Português Stanley Lebergott, "Força de trabalho e emprego, 1800 - 1960", in *Produção, Emprego e Produtividade nos Estados Unidos após 1800*, ed. Dorothy S. Brady (Washington, DC: Gabinete Nacional de Investigação Económica, 1966)

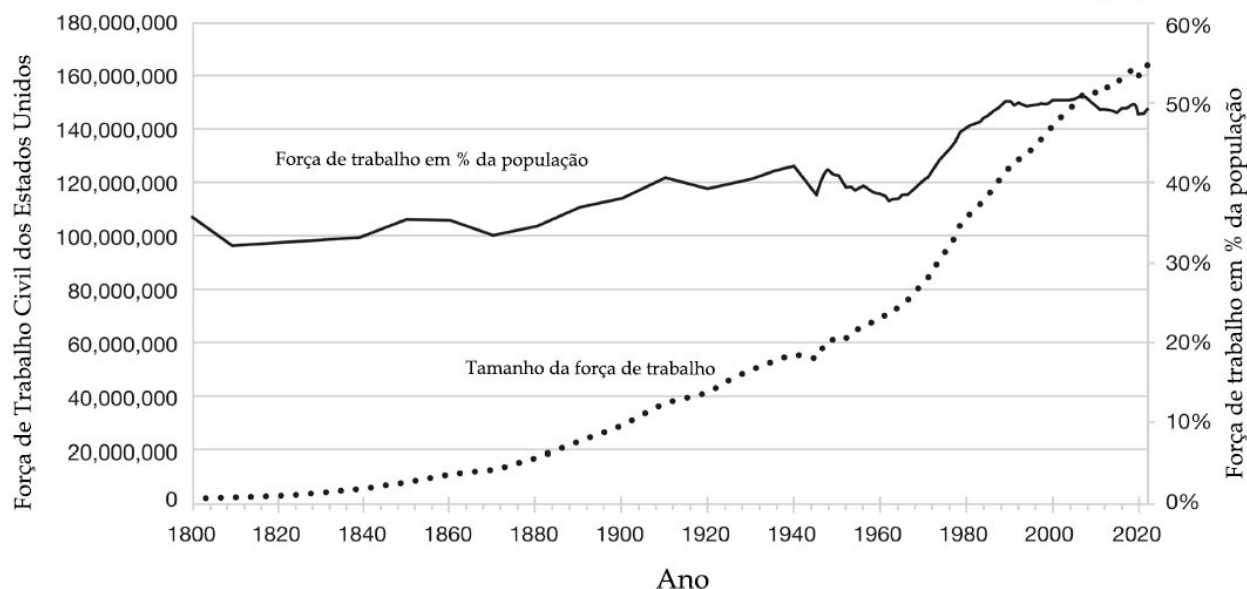
Apesar da redução dramática nos empregos tanto na agricultura como na indústria, a força de trabalho dos Estados Unidos tem vindo a crescer de forma constante desde que esta estatística começou a ser medida, mesmo perante sucessivas vagas de automatização.⁶⁴ Desde o início da Revolução Industrial até meados do século XX, a economia não só criou empregos suficientes para empregar uma população em rápido crescimento, como também acomodou a entrada de dezenas de milhões de mulheres no mercado de trabalho.⁶⁵

Desde o início do século XXI, a força de trabalho diminuiu ligeiramente como proporção da população total, mas uma das principais razões para isso é que uma percentagem mais elevada de americanos se encontra agora em idade de reforma.⁶⁶ Em 1950, 8,0% da população dos EUA tinha 65 anos ou mais⁶⁷; em 2018, esse valor tinha duplicado para 16,0%, deixando relativamente menos pessoas em idade ativa na economia.⁶⁸ O Bureau do Censo dos EUA projeta — independentemente de quaisquer avanços médicos que possam ser alcançados nas próximas décadas — que os maiores de 65 anos representarão 22% da população em 2050.⁶⁹ Se eu estiver correto ao afirmar que tecnologias significativas de extensão da vida tornar-se-ão realidade até lá, a proporção de idosos será ainda mais elevada.

Em termos absolutos, no entanto, a força de trabalho continua a crescer. Em 2000, estimava-se que a força de trabalho civil era de 143,6 milhões num total populacional de 282 milhões, ou seja, 50,9%.⁷⁰ Em 2022, a força de trabalho tinha crescido para 164

milhões de trabalhadores num universo de cerca de 332 milhões de pessoas, o que corresponde a 49,4%.⁷¹

Força de trabalho dos EUA⁷³

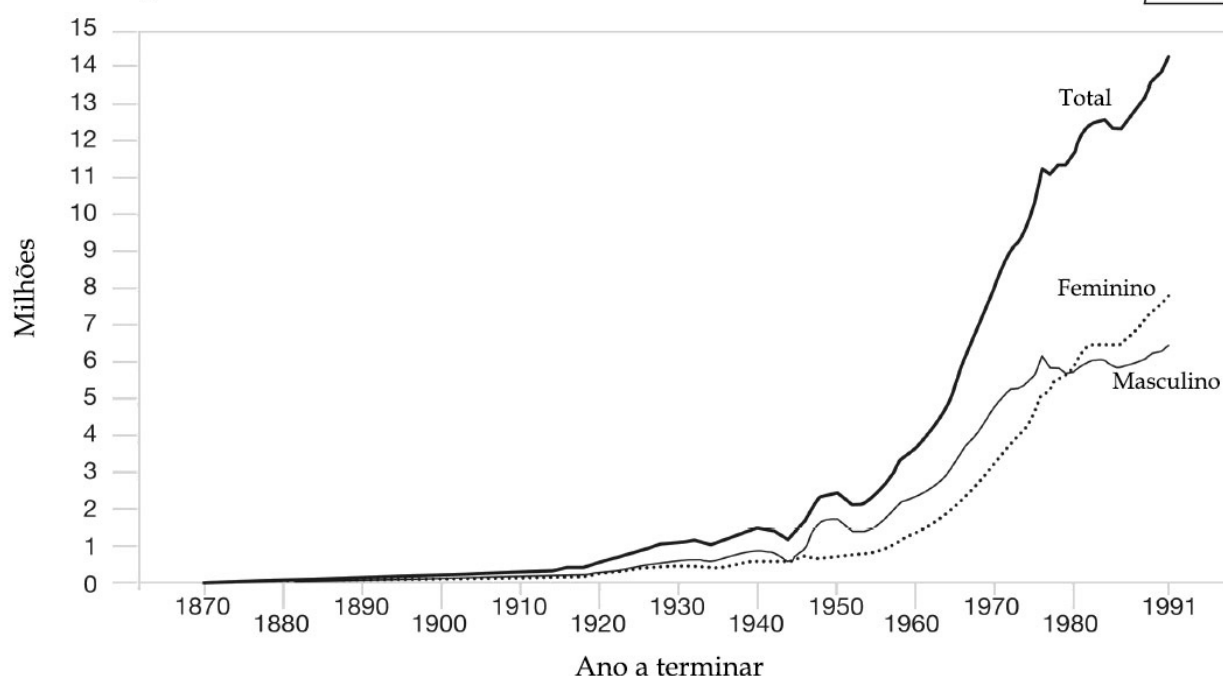


Fontes: Bureau of Labor Statistics dos EUA; Gabinete Nacional de Investigação Económica; Gabinete do Censo dos EUA

À medida que a economia se tem orientado para empregos cada vez mais intensivos em tecnologia, temos vindo a aumentar drasticamente o investimento na educação, de modo a fornecer as novas competências exigidas e a criar novas oportunidades de emprego. Passámos de 63.000 estudantes universitários (níveis de licenciatura e pós-graduação) em 1870 para cerca de 20 milhões em 2022.⁷³ Desse total, adicionámos cerca de 4,7 milhões de estudantes universitários nos Estados Unidos apenas entre os anos de 2000 e 2022.⁷⁴ Atualmente, gastamos mais de dezoito vezes o valor por criança, em dólares constantes, no ensino básico e

secundário (K-12* “equivalente ao ensino básico e secundário em Portugal”) do que há um século. Durante o ano letivo de 1919–1920, as escolas públicas dos níveis K-12 gastavam o equivalente a 1.035 dólares por aluno (em valores de 2023).⁷⁵ No ano letivo de 2018–2019, esse valor tinha aumentado para cerca de 19.220 dólares por aluno (em valores de 2023).⁷⁶

Inscrição nas Instituições de Ensino Superior, por Sexo: 1869–70 a 1990–91⁷⁸



Fontes: Departamento de Comércio dos EUA, Bureau of the Census, Estatísticas Históricas dos Estados Unidos, Colonial Times até 1970; Departamento de Educação dos EUA, Centro Nacional de Estatísticas da Educação, Resumo de Estatísticas da Educação, várias questões.

* "K-12" é uma expressão usada nos Estados Unidos (e também no Canadá) para designar todo o percurso da educação básica obrigatória, desde o Jardim de Infância (Kindergarten) até ao 12.º ano de escolaridade.

- K = Kindergarten (normalmente para crianças de 5 anos)
- 1-12 = 1.º ao 12.º ano de escolaridade (dos 6 aos 18 anos, aproximadamente)

Ou seja, K-12 equivale ao percurso completo do ensino básico e secundário, antes do ensino superior.

Ao longo dos últimos dois séculos, as transformações tecnológicas substituíram a maioria dos empregos na economia por diversas vezes; no entanto — com o apoio de uma educação em constante evolução — assistimos a um progresso económico contínuo e impressionante. Isto apesar da percepção persistente (e justificada) de que grandes categorias de empregos estão prestes a desaparecer.⁷⁸

3. Desta Vez é Diferente?

Apesar da longa tendência de crescimento líquido do emprego, alguns economistas de renome preveem que, desta vez, poderá ser diferente. Um dos principais defensores da ideia de que a próxima vaga de automação baseada em IA será, no total, destruidora de empregos é o professor da Universidade de Stanford, Erik Brynjolfsson. Ele argumenta que, ao contrário das transições tecnológicas anteriores, a nova forma de automação levará à eliminação de mais empregos do que aqueles que criará.⁷⁹ Economistas que partilham esta visão encaram a situação atual como o culminar de várias vagas sucessivas de mudança.

A primeira vaga é frequentemente designada por “desqualificação” (ou “deskilling”).⁸⁰ Por exemplo, o condutor de uma carruagem puxada por cavalos, que exigia competências consideráveis para lidar e cuidar de animais imprevisíveis, foi substituído por um condutor de automóvel, cuja função exigia menos dessas capacidades. Um dos principais efeitos da desqualificação é facilitar a entrada de pessoas em novos empregos, com necessidade de menos formação. Antigamente, um

artesão passava anos a dominar as diversas competências necessárias para fabricar sapatos, mas com a introdução das linhas de montagem, um trabalhador podia ser contratado após um curto período de aprendizagem para operar uma máquina. Isto fez com que os custos da mão de obra baixassem e os sapatos se tornassem mais acessíveis, mas também significou que empregos bem remunerados foram substituídos por funções menos qualificadas e com salários mais baixos.

A segunda vaga é a da “requalificação” ou “qualificação superior” (“upskilling”). A requalificação tende a seguir-se à desqualificação e implica a introdução de tecnologias que exigem competências mais avançadas do que as anteriores. Por exemplo, ao fornecer aos condutores tecnologias de navegação, estes passam a ter de aprender a utilizar dispositivos eletrónicos que antes não faziam parte do conjunto de competências exigidas. Noutros casos, trata-se de introduzir máquinas com um papel cada vez maior na produção, mas que requerem competências especializadas para serem operadas. Por exemplo, enquanto as primeiras máquinas de fabrico de calçado eram prensas manuais que não exigiam formação formal, hoje em dia empresas como a FitMyFoot utilizam impressão 3D para criar calçado personalizado para cada cliente.⁸¹ Assim, em vez de um grande número de empregos pouco qualificados, a produção da FitMyFoot depende de um número menor de profissionais com competências em informática e operação de impressoras 3D. Tendências como esta tendem a substituir empregos pouco remunerados por menos postos de trabalho, mas com salários mais elevados.

A vaga que se aproxima, no entanto, pode ser chamada de “não-qualificação” (“nonskilling”). A inteligência artificial utilizada em veículos autônomos, por exemplo, substituirá completamente os condutores humanos. À medida que cada vez mais tarefas passam a estar ao alcance da IA e da robótica, assistiremos a uma série de transições de não-qualificação. O que distingue a inovação impulsionada pela IA das tecnologias anteriores é que ela abre mais possibilidades de eliminar totalmente a participação humana. Em vez de simplesmente reduzir ou aumentar o nível de qualificação necessário para executar uma determinada tarefa, a inteligência artificial pode frequentemente assumir essa tarefa por completo. Isto não é desejável apenas por razões econômicas, mas também porque, em muitas áreas, a IA pode efetivamente desempenhar essas funções melhor do que os humanos que substitui. Automóveis de condução autônoma serão muito mais seguros do que os conduzidos por seres humanos, e a IA nunca ficará embriagada, sonolenta ou distraída.

Contudo, é importante distinguir entre tarefas e profissões. Em alguns casos (embora não em todos), tarefas totalmente automatizadas permitem que certos empregos se reinventem em torno de novos conjuntos de funções — num processo que equivale, na prática, a uma requalificação. Por exemplo, caixas automáticas (ATMs) substituem atualmente os funcionários bancários em muitas operações de levantamento e depósito de dinheiro, mas esses profissionais passaram a desempenhar um papel mais relevante no marketing e na construção de relações pessoais com os clientes.⁸² De forma semelhante, embora os softwares de investigação jurídica e análise documental tenham substituído certas funções dos

assistentes jurídicos, essa profissão evoluiu e passou a envolver um conjunto de tarefas bastante diferente do que era há algumas décadas.⁸³ Este tipo de efeito pode vir a ocorrer também no mundo da arte. A partir de 2022, sistemas disponíveis ao público como o DALL·E 2, Midjourney e Stable Diffusion começaram a utilizar IA para criar arte gráfica de alta qualidade a partir de comandos de texto fornecidos por humanos.⁸⁴ À medida que esta tecnologia evolui, os designers gráficos humanos poderão passar menos tempo a desenhar manualmente e mais tempo a idealizar conceitos com os clientes e a selecionar ou modificar amostras geradas pela IA.

A longo prazo, os incentivos económicos à automatização irão impulsionar a IA a assumir um conjunto cada vez maior de tarefas. Mantendo tudo o resto constante, é menos dispendioso adquirir máquinas ou software de IA do que pagar custos laborais contínuos.⁸⁵ Quando os empresários estão a planear as suas operações, muitas vezes dispõem de alguma flexibilidade quanto ao equilíbrio entre capital e trabalho. Em locais onde os salários são relativamente baixos, faz mais sentido utilizar processos intensivos em mão de obra. Onde os salários são elevados, existe um maior incentivo para inovar e desenvolver máquinas que reduzam a necessidade de trabalho humano. Esta poderá ser uma das razões pelas quais a Grã-Bretanha foi o berço da Revolução Industrial — tinha salários mais altos do que quase qualquer outro lugar do mundo e abundância de carvão barato. Isso impulsionou o desenvolvimento de tecnologias que substituíam trabalho humano dispendioso por energia a vapor acessível. Nas economias desenvolvidas atuais, observa-se uma dinâmica semelhante. Enquanto as máquinas podem representar aquisições pontuais que

se tornam ativos, os salários dos trabalhadores são custos recorrentes, além de outras necessidades que os empregadores têm de satisfazer. Assim, onde for possível aumentar a automatização, as empresas têm um forte incentivo para o fazer. À medida que a IA atinge níveis de competência humana — e, pouco depois, sobre-humana — haverá cada vez menos tarefas que os humanos não aprimorados serão necessários para desempenhar. Até que nos fundamos mais plenamente com a nossa IA, isso prenuncia grandes perturbações para os trabalhadores.

No entanto, um dos obstáculos a esta tese tem sido um enigma relacionado com a produtividade: se as mudanças tecnológicas estiverem realmente a provocar perdas líquidas de emprego, a economia clássica prevê que se trabalhariam menos horas para um mesmo nível de produção económica. Por definição, isso implicaria um aumento notório da produtividade. Contudo, o crescimento da produtividade — conforme tradicionalmente medido — tem, na verdade, abrandado desde a revolução da internet nos anos 90. A produtividade é frequentemente medida como produção real por hora, ou seja, o total de bens e serviços produzidos (ajustado à inflação) dividido pelo total de horas trabalhadas para os produzir. Do primeiro trimestre de 1950 ao primeiro trimestre de 1990, a produção real por hora nos Estados Unidos aumentou em média 0,55% por trimestre.⁸⁶ À medida que os computadores pessoais e a internet se tornaram comuns nos anos 90, os ganhos de produtividade aceleraram. Entre o primeiro trimestre de 1990 e o primeiro trimestre de 2003, os aumentos trimestrais médios foram de 0,68%.⁸⁷ Parecia que a World Wide Web tinha desencadeado uma nova Era de crescimento rápido e, ainda em 2003, havia uma

expectativa generalizada de que esse ritmo se manteria.⁸⁸ No entanto, a partir de 2004, o crescimento da produtividade começou a abrandar significativamente. Do primeiro trimestre de 2003 ao primeiro trimestre de 2022, a média trimestral foi de apenas 0,36%.⁸⁹ Este tem sido um dos grandes mistérios económicos da última década. Com a tecnologia da informação a transformar os negócios de tantas formas, seria de esperar um crescimento da produtividade muito mais acentuado. Multiplicam-se as teorias sobre as razões para tal não ter ocorrido.

Se a automatização está realmente a ter um impacto tão significativo, então parece haver vários biliões de dólares da economia que estão “em falta”. Na minha perspetiva — que tem vindo a ganhar aceitação entre os economistas — grande parte da explicação reside no facto de não contabilizarmos, no PIB, o valor exponencialmente crescente dos produtos informacionais, muitos dos quais são gratuitos e representam categorias de valor que até há pouco tempo simplesmente não existiam. Quando o MIT comprou o computador IBM 7094 que eu utilizei durante a licenciatura, por cerca de 3,1 milhões de dólares em 1963, esse valor foi contado como exatamente isso — 3,1 milhões de dólares (equivalente a 30 milhões em dólares de 2023) em atividade económica.⁹⁰ Um smartphone atual é centenas de milhares de vezes mais potente, em termos de computação e comunicação, e possui uma miríade de funcionalidades que nem sequer existiam a qualquer preço em 1965, mas só conta como algumas centenas de dólares de atividade económica, porque é esse o preço que se pagou por ele.

Esta explicação geral para o enigma da produtividade em falta tem sido também notavelmente defendida por Erik Brynjolfsson e pelo capitalista de risco Marc Andreessen.⁹¹ De forma resumida, o produto interno bruto mede a atividade económica através dos preços de todos os bens e serviços finais num país. Assim, se pagar 20.000 dólares por um automóvel novo, esse valor é acrescentado ao PIB desse ano — mesmo que estivesse disposto a pagar 25.000 ou 30.000 dólares pelo mesmo automóvel. Este método funcionou bem ao longo do século XX porque, em média, a disposição da população para pagar por um bem estava razoavelmente próxima do seu preço real. Uma razão importante para isso é que, quando os bens e serviços são produzidos com materiais físicos e trabalho humano, custa efetivamente muito dinheiro às empresas produzir cada nova unidade. Construir um automóvel, por exemplo, exige uma combinação de peças metálicas dispendiosas e muitas horas de trabalho especializado. Este é o conceito de custo marginal.⁹² A teoria económica clássica afirma que os preços tenderão a aproximar-se do custo marginal médio dos bens — porque as empresas não podem vender com prejuízo, mas a concorrência obriga-as a vender o mais barato possível. Além disso, como os produtos mais úteis e potentes sempre custaram mais a produzir, existia historicamente uma forte relação entre a qualidade de um produto e o seu preço, o que se refletia no PIB.

Contudo, muitas tecnologias de informação tornaram-se imensamente mais úteis, enquanto os preços se mantiveram mais ou menos constantes. Um chip de computador de cerca de 900 dólares (ajustado para a inflação de 2023) em 1999 podia realizar mais de 800.000 computações por segundo por dólar.⁹³ No início de

2023, um chip de 900 dólares conseguia efetuar quase 58 mil milhões de computações por segundo por dólar.⁹⁴

O problema, portanto, é que o PIB conta naturalmente o chip de 900 dólares de hoje como equivalente a um produzido há mais de duas décadas, apesar de o atual ser mais de 72.000 vezes mais potente pelo mesmo preço. Assim, os aumentos nominais de riqueza e rendimento ao longo das últimas décadas não refletem adequadamente as enormes melhorias no estilo de vida proporcionadas pelas novas tecnologias. Isso distorce a interpretação dos dados económicos e cria percepções enganadoras, como o aparente abrandamento ou estagnação no crescimento salarial. Mesmo que os seus salários nominais tenham permanecido estáveis nas últimas duas décadas, hoje pode adquirir milhares de vezes mais poder de computação com esse mesmo valor.⁹⁵ Algumas agências governamentais fizeram esforços para considerar a melhoria do desempenho em certas estatísticas económicas⁹⁶, mas essas tentativas continuam a subestimar fortemente os verdadeiros ganhos na relação qualidade/preço.

Esta dinâmica é ainda mais acentuada nos bens digitais, que podem ser produzidos quase sem custo. Uma vez que a Amazon formata um e-book para venda, a distribuição de novas cópias não exige mais papel, tinta ou mão-de-obra — por isso, o produto vende-se a um múltiplo praticamente infinito do seu custo marginal. Como resultado, a relação estreita entre o custo marginal, o preço e a disposição dos consumidores para pagar foi enfraquecida. No caso de serviços cujo custo marginal é tão baixo que podem ser oferecidos gratuitamente aos consumidores, essa relação colapsa

por completo. Depois de o Google ter concebido os seus algoritmos de pesquisa e construído os seus centros de dados, fornecer mais uma pesquisa a um utilizador tem um custo praticamente nulo. Também não custa mais ao Facebook ligar-nos a mil amigos do que ligar-nos a apenas cem. Por isso, oferecem o acesso gratuito ao público e cobrem os custos marginais através de publicidade.

Embora tais serviços sejam gratuitos para os consumidores, podemos estimar a sua disposição para pagar por eles (também conhecida como excedente do consumidor) observando as suas escolhas.⁹⁷ Por exemplo, se pudesse ganhar 20 dólares a cortar a relva do vizinho, mas escolhe passar esse tempo no TikTok, podemos dizer que o TikTok lhe proporciona, no mínimo, 20 dólares de valor. Como estimou Tim Worstall na *Forbes* em 2015, as receitas da Facebook nos EUA rondavam os 8 mil milhões de dólares, o que corresponderia, assim, à sua contribuição oficial para o PIB.⁹⁸ Mas se atribuímos valor ao tempo que as pessoas passam na Facebook com base no salário mínimo, o verdadeiro benefício para os consumidores rondaria os 230 mil milhões de dólares.⁹⁹ Em 2020 (o último ano para o qual havia dados disponíveis aquando da publicação deste livro), os adultos norte-americanos utilizadores de redes sociais passaram, em média, trinta e cinco minutos por dia na Facebook.¹⁰⁰ Com cerca de 72% dos aproximadamente 258 milhões de adultos nos EUA a utilizar redes sociais, isso sugere, segundo a metodologia de Worstall, um valor económico de 287 mil milhões de dólares gerado pela Facebook nesse ano.¹⁰¹ E uma sondagem global de 2019 concluiu que os utilizadores norte-americanos da internet passavam, em média, duas horas e três minutos por dia em todas as redes sociais — o que gerou cerca de

36,1 mil milhões de dólares em receitas publicitárias para o PIB, mas implica um benefício total para os utilizadores superior a 1 bilião de dólares por ano!¹⁰²

Avaliar o uso das redes sociais com base no salário mínimo está longe de ser uma medida perfeita, já que, por exemplo, é mais prático navegar na Facebook enquanto se espera numa fila para o café do que usar esses minutos para realizar trabalho freelance remoto. Mas, como aproximação geral, esta metodologia revela que as pessoas atribuem um valor enorme ao uso das redes sociais, embora apenas uma pequena fração desse valor seja visível para os economistas como receita. A Wikipédia é um exemplo ainda mais extremo: a sua contribuição oficial para o PIB é praticamente nula. A mesma análise aplica-se a inúmeros serviços baseados na web e em aplicações móveis.

Isto sugere que, à medida que a tecnologia digital ocupa uma fatia cada vez maior da economia, o excedente do consumidor está a crescer muito mais rapidamente do que o PIB indica. Assim, a produtividade em termos de excedente do consumidor tem vindo a aumentar de forma mais acelerada do que a métrica tradicional de produção por hora. Dado que o excedente do consumidor é uma métrica mais “genuína” da verdadeira prosperidade do que os preços, pode-se afirmar que o tipo de produtividade que realmente importa tem estado a crescer a um bom ritmo desde sempre.

Estes efeitos vão muito além das áreas que são obviamente “tecnológicas”. A mudança tecnológica permitiu inúmeros outros benefícios que não aparecem nas contas do PIB — desde menos

poluição e condições de vida mais seguras até oportunidades ampliadas de aprendizagem e entretenimento. Dito isto, essas mudanças não afetaram todas as áreas da economia de forma uniforme. Por exemplo, apesar da dramática deflação nos preços da computação, os cuidados de saúde têm-se tornado mais caros a um ritmo superior ao da inflação geral — pelo que alguém que necessite de muitos tratamentos médicos pode não achar grande consolo no facto de os ciclos de GPU estarem a ficar cada vez mais baratos.¹⁰³

A boa notícia, porém, é que a inteligência artificial e a convergência tecnológica transformarão cada vez mais tipos de bens e serviços em tecnologias da informação ao longo das décadas de 2020 e 2030 — permitindo-lhes beneficiar dos tipos de tendências exponenciais que já trouxeram uma deflação radical ao domínio digital. Tutores avançados baseados em IA tornarão possível uma aprendizagem personalizada sobre qualquer assunto, acessível em larga escala a qualquer pessoa com ligação à internet. A medicina potenciada por IA e a descoberta de novos fármacos ainda se encontram numa fase embrionária à data deste escrito, mas desempenharão um papel fundamental na redução dos custos dos cuidados de saúde.

O mesmo acontecerá com inúmeros outros produtos que tradicionalmente não foram considerados tecnologias da informação — como alimentos, habitação e construção civil, bem como outros produtos físicos como vestuário. Por exemplo, os avanços impulsionados por IA na ciência dos materiais tornarão a eletricidade fotovoltaica solar extremamente barata, enquanto a extração de recursos realizada por robôs e os veículos elétricos

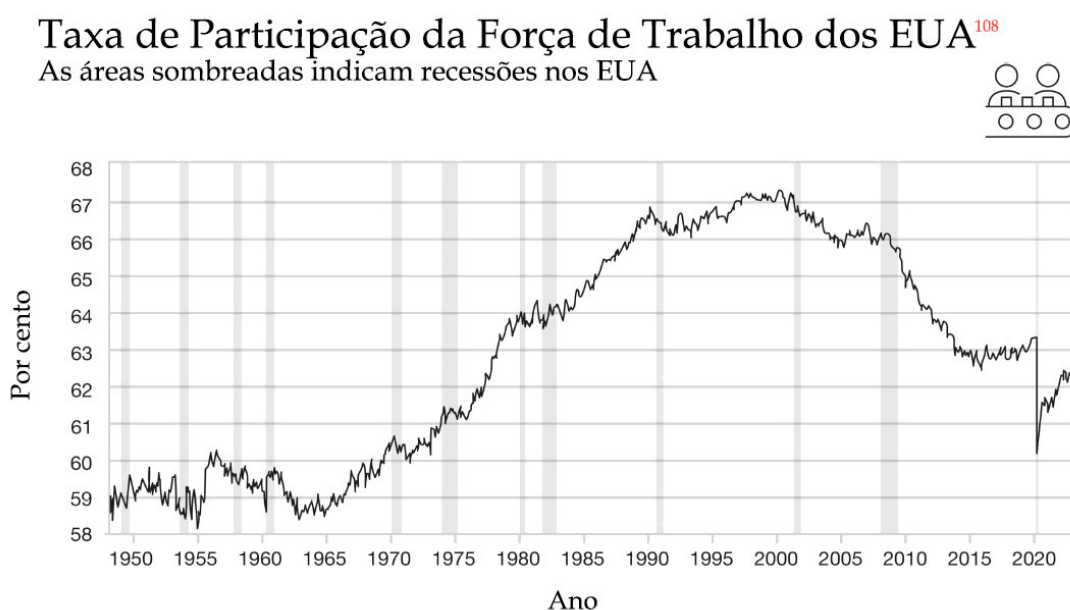
autónomos reduzirão substancialmente os custos das matérias-primas. Com energia e materiais baratos, e com a automatização a substituir progressivamente o trabalho humano, os preços cairão de forma significativa. Com o tempo, esses efeitos abrangerão uma tal extensão da economia que será possível eliminar grande parte da escassez que hoje limita as pessoas. Como resultado, na década de 2030, será relativamente barato viver com um padrão que atualmente é considerado luxuoso.

Se esta análise estiver correta, então a deflação impulsionada pela tecnologia em todas estas áreas apenas ampliará o fosso entre a produtividade nominal e o benefício real médio que cada hora de trabalho humano traz à sociedade. À medida que tais efeitos se expandirem para além da esfera digital e atingirem outras indústrias, abrangendo uma porção cada vez maior da economia, poderemos esperar uma diminuição da inflação nacional — e, eventualmente, uma deflação generalizada. Por outras palavras, com o tempo, podemos esperar respostas mais claras para o enigma da produtividade.

Há ainda outro enigma: Por que é que os dados económicos mostram que a proporção de americanos na força de trabalho está a diminuir? Os economistas que apoiam a tese da destruição líquida de empregos apontam para a taxa de participação na força de trabalho civil dos EUA, que representa o número de pessoas empregadas mais o número de desempregados que estão à procura de emprego, como percentagem da população com dezasseis anos ou mais. Após ter subido cerca de 59 por cento em 1950 para pouco menos de 67 por cento em 2002, essa taxa caiu para menos de 63

por cento em 2015 e manteve-se praticamente estável até à pandemia de COVID-19, apesar de uma economia aparentemente em expansão.¹⁰⁴

A percentagem real da população total incluída na força de trabalho é ainda menor. Em junho de 2008, havia mais de 154 milhões de pessoas na força de trabalho civil dos EUA, numa população de 304 milhões — ou seja, 50,7 por cento.¹⁰⁵ Em dezembro de 2022, havia 164 milhões na força de trabalho, numa população de 333 milhões — o que corresponde a pouco menos de 49,5 por cento.¹⁰⁶ Pode não parecer uma grande queda, mas coloca ainda assim os Estados Unidos na sua menor percentagem em mais de duas décadas. As estatísticas governamentais sobre esta questão não capturam perfeitamente a realidade económica, pois não incluem várias categorias — como trabalhadores agrícolas, militares e funcionários federais — mas continuam a ser úteis para indicar a direção e a magnitude aproximada destas tendências.



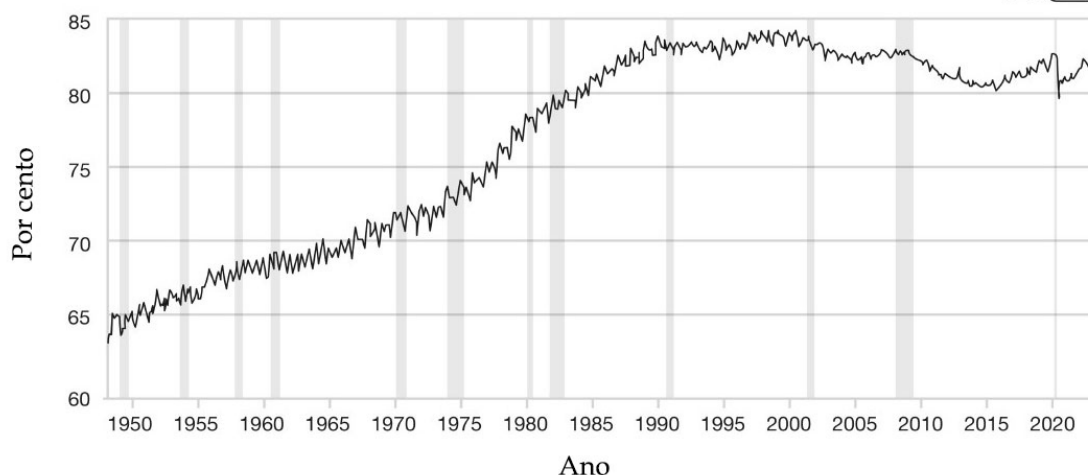
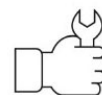
Fonte: Departamento de Estatísticas do Trabalho dos EUA

Ainda que parte deste declínio se deva provavelmente à automatização, há dois grandes fatores de confusão a considerar. Em primeiro lugar, à medida que os americanos se tornam mais escolarizados, menos adolescentes entram no mercado de trabalho, e muitas pessoas permanecem na universidade e nos estudos de pós-graduação até bem dentro dos vinte e poucos anos.¹⁰⁷ Além disso, com o envelhecimento progressivo da grande geração dos baby boomers, cada vez mais pessoas entram na reforma, reduzindo a proporção de americanos em idade ativa.¹⁰⁸

Se, em vez disso, olharmos para a taxa de participação na força de trabalho entre adultos em idade ativa principal — dos vinte e cinco aos cinquenta e quatro anos — o declínio quase desaparece. No início de 2023, a taxa de participação neste grupo era de 83,4 por cento, comparada com 84,5 por cento no pico registado no ano 2000.¹⁰⁹ Esta diferença traduz-se, ainda assim, em cerca de 1,7 milhões de pessoas na população atual, mas é muito menos expressiva do que o gráfico anterior dá a entender.¹¹⁰

Taxa de participação da força de trabalho dos EUA, idades dos 25 aos 54 anos ¹¹³

As áreas sombreadas indicam recessões nos EUA



Fonte: Departamento de Estatísticas do Trabalho dos EUA

Além disso, desde 2001 houve um aumento significativo na participação de pessoas com mais de cinquenta e cinco anos. Entre os indivíduos com idades entre os cinquenta e cinco e os sessenta e quatro anos, a taxa subiu de 60,4 por cento em 2001 para 68,2 por cento em 2021, e no mesmo período cresceu entre os maiores de setenta e cinco anos, passando de 5,2 por cento para 8,6 por cento.¹¹² Há aqui forças contraditórias em jogo. Por um lado, muitos trabalhadores mais velhos que perdem os seus empregos devido à automatização optam simplesmente por reformar-se mais cedo, aceitando um padrão de vida inferior. Por outro lado, as pessoas estão a viver mais tempo (antes da pandemia da COVID-19, a esperança média de vida combinada entre homens e mulheres nos EUA tinha aumentado cerca de dois anos desde 2000)¹¹³ e permanecem saudáveis o suficiente para continuar a trabalhar em idades mais avançadas. Para muitos, isso é uma fonte gratificante de propósito e satisfação. No entanto, estes dados não refletem o

facto de que alguns adultos mais velhos são forçados a permanecer na força de trabalho em empregos marginais, depois de perderem posições mais bem remuneradas, sem conseguirem garantir uma reforma segura.¹¹⁴

Ainda assim, todas estas análises estão limitadas por um facto crucial: a própria noção de participação na força de trabalho é um conceito cada vez mais imperfeito. Dois grandes movimentos estão a reformular a natureza do trabalho, mas não estão bem refletidos nas estatísticas económicas.

O primeiro é a economia paralela, que sempre existiu, mas que foi amplamente facilitada pela internet. As suas atividades incluem praticamente toda a indústria do sexo, bem como muitos outros tipos de serviços, como trabalhos domésticos pagos “por fora”, modalidades alternativas de cura, entre muitos outros. Outro fator que favorece a economia paralela é o surgimento de tecnologias encriptadas, como as criptomoedas, que permitem ocultar transações de autoridades fiscais, regulatórias e policiais.

A maior e mais famosa criptomoeda é o Bitcoin.¹¹⁵ Em 6 de agosto de 2017, o volume diário de transações de Bitcoin nas principais bolsas era inferior a 19,3 milhões de dólares.¹¹⁶ Esse valor disparou para mais de 4,95 mil milhões em 7 de dezembro do mesmo ano, mas caiu rapidamente depois disso e, em meados de 2023, rondava uma média de 180 milhões por dia.¹¹⁷ Trata-se, ainda assim, de um crescimento muito rápido, embora diminuto quando comparado com as moedas tradicionais. Segundo o Banco de Pagamentos Internacionais, o volume médio diário de transações

cambiais globais era de 7,5 bilhões de dólares em abril de 2022, e é provável que esse número seja ainda mais elevado no momento em que este livro vai para impressão.¹¹⁸

Além disso, ao contrário da maioria das moedas tradicionais, o valor das criptomoedas tem sido extremamente volátil. A 4 de janeiro de 2012, por exemplo, os Bitcoins eram negociados a 13,43 dólares.¹¹⁹ Em 2 de abril, estavam acima dos 130 dólares.¹²⁰ No entanto, o interesse por criptomoedas ainda estava largamente limitado a uma subcultura ligada à tecnologia. Depois, após quase cinco anos de relativa tranquilidade e estabilidade, o Bitcoin começou a disparar ainda mais em 2017. De repente, pessoas comuns começaram a ouvir falar dos Bitcoins como um investimento garantido, comprando-os na esperança de que o seu valor continuasse a subir. Isso tornou-se uma profecia autorrealizável: os preços atingiram os 1.354 dólares a 29 de abril e os 18.877 a 17 de dezembro.¹²¹ Mas depois os preços começaram a cair, e as pessoas venderam os seus Bitcoins em pânico, tentando sair do mercado antes que os seus ativos perdessem ainda mais valor. A 12 de dezembro de 2018, o Bitcoin estava novamente nos 3.360 dólares — apenas para subir até 64.899 a 13 de abril de 2021, antes de sofrer nova grande queda para 15.460 dólares a 20 de novembro de 2022.¹²²

Essa volatilidade constitui um grande problema para quem pretende usar o Bitcoin como moeda, ou seja, como meio de troca regular de bens e serviços. Se acreditasse que os seus dólares valeriam dez vezes mais dentro de meio ano, tentaria evitá-los gastar. Por outro lado, se os seus dólares pudessem perder metade

do valor em poucos meses, teria relutância em manter muitos dos seus ativos em dólares, e os comerciantes não estariam dispostos a aceitá-los. Se as criptomoedas quiserem alcançar uma adoção mais ampla pelo público, terão de encontrar uma forma de estabilizar os seus valores.

No entanto, as criptomoedas estão longe de ser um requisito para que o trabalho informal floresça. As redes sociais e plataformas como o Craigslist oferecem amplas oportunidades para as pessoas estabelecerem ligações económicas que, em grande parte, escapam ao controlo governamental.

Este fenómeno também impulsiona outra grande tendência: novas formas de ganhar dinheiro que nem sempre são consideradas métodos tradicionais de emprego. Estas incluem a criação, compra, venda e troca de bens e serviços físicos e digitais através de sites e aplicações, bem como a criação de apps, vídeos e outros conteúdos digitais em redes sociais. Algumas pessoas desenvolveram carreiras de sucesso a criar conteúdos para o YouTube, por exemplo, ou são pagas para influenciar outras pessoas no Instagram ou no TikTok.¹²³

Antes do lançamento do iPhone em 2007, praticamente não existia uma economia de aplicações. Em 2008, havia menos de 100.000 aplicações iOS disponíveis; este número disparou para cerca de 4,5 milhões em 2017.¹²⁴ No Android, o crescimento foi igualmente dramático. Em dezembro de 2009, havia cerca de 16.000 aplicações móveis disponíveis na Google Play Store.¹²⁵ Em

março de 2023, o número era de 2,6 milhões.¹²⁶ Isto representa um aumento superior a 160 vezes em treze anos.

Este crescimento traduziu-se diretamente em criação de emprego. Entre 2007 e 2012, estima-se que a economia das apps tenha criado meio milhão de empregos nos Estados Unidos.¹²⁷ Em 2018, segundo a Deloitte, esse número já ultrapassava os 5 milhões.¹²⁸ Outra estimativa de 2020, que inclui empregos indiretos gerados por esta economia, aponta para 5,9 milhões de postos de trabalho nos EUA e 1,7 biliões de dólares em atividade económica.¹²⁹ Estes números variam consoante a definição mais ampla ou mais restrita que se adote para o mercado das aplicações, mas o principal ponto a reter é que, em pouco mais de uma década, as aplicações móveis passaram de insignificantes a um fator central na economia em geral.

Assim, embora a mudança tecnológica esteja a tornar muitos empregos obsoletos, essas mesmas forças estão a abrir inúmeras novas oportunidades fora do modelo tradicional de “emprego.” Apesar das suas limitações, a chamada *gig economy* (ou economia informal digital) permite frequentemente mais flexibilidade, autonomia e tempo livre às pessoas do que as opções anteriores. Maximizar a qualidade dessas oportunidades é uma das estratégias possíveis para ajudar os trabalhadores à medida que as tendências de automatização aceleram e transformam os locais de trabalho tradicionais.

4. Então, Para Onde Vamos?

À primeira vista, a situação laboral parece alarmante. Quando Frey e Osborne, da Universidade de Oxford, estimaram que quase metade dos empregos de 2013 seriam automatizáveis até 2033, a sua investigação partia de taxas de progresso da IA e de outras tecnologias exponenciais mais conservadoras do que as que descrevi ao longo deste livro.¹³⁰ Embora a ameaça da automação aos empregos seja reconhecida há mais de duzentos anos, a situação atual é única pela rapidez e abrangência do risco iminente.

Para prever como tudo isto poderá evoluir, é necessário considerar várias questões fundamentais. Em primeiro lugar, o emprego não é um fim em si mesmo, mas um meio para atingir um fim. Um dos objetivos do trabalho é satisfazer as necessidades materiais da vida. Como já vimos, há apenas dois séculos, o simples ato de cultivar e distribuir alimentos exigia praticamente todo o esforço laboral humano, enquanto atualmente, nos Estados Unidos e em grande parte do mundo desenvolvido, a produção alimentar exige menos de 2% da força de trabalho. À medida que a IA desbloqueia uma abundância material sem precedentes em inúmeras áreas, a luta pela sobrevivência física tenderá a tornar-se uma relíquia do passado.

Outro objetivo do trabalho é oferecer um sentido e propósito à vida. Se o seu trabalho consiste em assentar tijolos, esse labor fornece dois tipos de significado. O mais evidente é que o salário lhe permite sustentar e cuidar daqueles que ama — um aspeto essencial da identidade pessoal. Mas, para além disso, está a

construir estruturas duradouras que beneficiam a sociedade — literalmente a contribuir para algo maior do que si mesmo. Alguns dos trabalhos mais gratificantes, como os das artes ou do meio acadêmico, oferecem ainda a oportunidade de ser criativo e de gerar novo conhecimento.

A revolução que se avizinha permitirá que os seres humanos contribuam para a cultura de formas muito mais amplas do que alguma vez foi possível. Na verdade, o avanço das tecnologias de informação já está a ampliar a capacidade dos artistas para enriquecer a cultura — muitas vezes de formas pouco valorizadas. Por exemplo, quando eu era jovem, só existiam três canais de televisão: ABC, NBC e CBS. Como todos viam a mesma seleção limitada de programas, as emissoras tinham de criar conteúdos que agradassem ao maior número possível de pessoas. Para terem sucesso, os programas tinham de atrair homens e mulheres, crianças e adultos, trabalhadores manuais e profissionais de escritório. Ideias com um apelo mais restrito, como comédia absurda, drama paranormal ou ficção científica, não tinham caminho fácil para a viabilidade comercial. Muitos esquecem que *Star Trek*, a série de ficção científica mais influente da história, foi cancelada após apenas três temporadas.¹³¹

Contudo, a proliferação da televisão por cabo alargou o panorama televisivo ao ponto de permitir que programas de nicho encontrassem o seu público. Documentários aprofundados sobre temas invulgares prosperaram em canais como o Discovery Channel, o History Channel, o Learning Channel, entre outros. Ainda assim, a audiência estava limitada aos horários de emissão. A

introdução dos gravadores digitais (DVR) e, posteriormente, do streaming a pedido, permitiu às pessoas verem o que quisessem, quando quisessem. Isso significou que programas inovadores podiam agora reunir audiência em todo o espectro populacional—e não apenas entre os que estivessem disponíveis num determinado horário. Como resultado, ideias artísticas que não teriam tido viabilidade nas redes da minha juventude, como *Stranger Things* ou *Fleabag*, encontraram públicos leais e reconhecimento crítico. Esta dinâmica é especialmente positiva para grupos demográficos relativamente pequenos, como pessoas LGBTQ, pessoas com deficiência ou muçulmanos americanos, pois tornou-se mais fácil que programas que retratam positivamente as suas experiências tenham sucesso comercial.

Além disso, o streaming permite opções criativas diferentes. Por exemplo, os episódios de comédias de meia hora na televisão generalista normalmente têm enredos autossuficientes, porque as emissoras querem que os espetadores possam assistir e desfrutar dos episódios em qualquer ordem. Mas o conteúdo a pedido permite que os espetadores vejam sempre pela ordem correta. Isto libertou séries inovadoras como *BoJack Horseman* para desenvolver personagens de um episódio para o outro e construir piadas de forma gradual ao longo de vários episódios.¹³² Estas possibilidades artísticas simplesmente não existiriam com as tecnologias de transmissão anteriores.

Nas próximas duas décadas, esta transformação irá acelerar de forma dramática. Pense na criatividade que a IA alcançou nos últimos anos no domínio das imagens visuais, graças a sistemas

como o DALL·E, o Midjourney e o Stable Diffusion. Estas capacidades tornar-se-ão mais sofisticadas e expandir-se-ão à música, ao vídeo e aos jogos, democratizando radicalmente a expressão criativa. As pessoas poderão descrever as suas ideias à IA e ajustar os resultados em linguagem natural até que correspondam às visões que têm na mente.

Em vez de serem necessárias milhares de pessoas e centenas de milhões de dólares para produzir um filme de ação, será eventualmente possível criar um épico cinematográfico com pouco mais do que boas ideias e um orçamento relativamente modesto para o computador que executa a IA.

Contudo, apesar de todos estes benefícios iminentes, devemos também ser realistas quanto aos efeitos disruptivos que ocorrerão entre agora e então. A automação e os seus efeitos indiretos já eliminaram muitos empregos na base e no meio da escada das qualificações, e essa tendência irá alargar-se e acelerar na próxima década. A maioria dos novos empregos exige competências mais sofisticadas. No seu todo, a nossa sociedade tem subido na escada das competências, e isso continuará a acontecer. Mas à medida que a IA ultrapassa as capacidades até dos humanos mais qualificados, numa área após outra, como é que os humanos poderão acompanhar?

O principal método de aperfeiçoamento das competências humanas ao longo dos últimos dois séculos tem sido o ensino. O nosso investimento na aprendizagem disparou no último século, como referi anteriormente. Mas já estamos bem dentro da próxima

fase do nosso próprio aperfeiçoamento, que consiste em ampliar as nossas capacidades ao fundirmo-nos com a tecnologia inteligente que estamos a criar. Ainda não estamos a introduzir dispositivos computadorizados nos nossos corpos e cérebros, mas eles estão literalmente à mão. Quase ninguém conseguiria hoje exercer a sua profissão ou obter uma educação sem os extensores de cérebro que usamos durante todo o dia, todos os dias — smartphones que conseguem aceder a quase todo o conhecimento humano ou utilizar um poder computacional imenso com um simples toque. Por isso, não é exagero dizer que os nossos dispositivos se tornaram partes de nós. Isto não era verdade há apenas duas décadas.

Estas capacidades tornar-se-ão ainda mais integradas nas nossas vidas ao longo da década de 2020. A pesquisa deixará de seguir o paradigma familiar de introduzir texto e obter páginas com hiperligações, transformando-se numa capacidade fluida e intuitiva de perguntas e respostas. A tradução em tempo real entre quaisquer pares de línguas tornar-se-á fluida e precisa, quebrando as barreiras linguísticas que ainda nos separam. A realidade aumentada será constantemente projetada nas nossas retinas, a partir de óculos e lentes de contato. Esta realidade aumentada também será sentida nos nossos ouvidos e, por fim, aproveitará os restantes sentidos. A maior parte das suas funções e informações não será explicitamente requisitada — os nossos assistentes de IA, sempre presentes, anteciparão as nossas necessidades ao observar e escutar as nossas atividades. Na década de 2030, nanorrobôs médicos começarão a integrar diretamente estas extensões cerebrais no nosso sistema nervoso.

No capítulo 2, descrevi como esta tecnologia irá expandir o nosso neocórtex para a nuvem, acrescentando mais capacidade e mais níveis de abstração. Isto estará disponível para todos e, com o tempo, será acessível em termos económicos — tal como os telemóveis começaram por ser muito caros e pouco inteligentes, mas hoje são ubíquos (a União Internacional das Telecomunicações estimava que havia 5,8 mil milhões de subscrições ativas de smartphones em todo o mundo em 2020)¹³³, com capacidades que melhoram rapidamente.

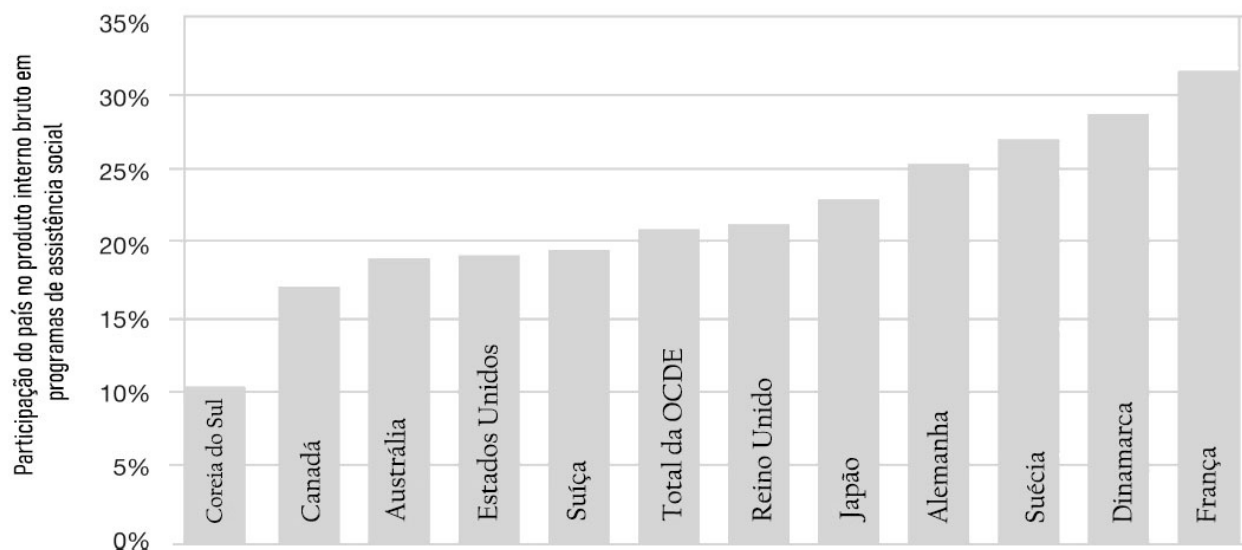
Mas, no caminho para um futuro de tal abundância universal, é necessário enfrentar as questões sociais que surgirão como resultado destas transições. A rede de proteção social teve início nos Estados Unidos na década de 1930, com a aprovação da Segurança Social (Social Security).¹³⁴ Embora determinadas formulações entrem e saiam de moda política (por exemplo, o termo "assistência social" ou welfare), a rede de proteção social, no seu todo, tem vindo a tornar-se cada vez mais abrangente desde então, independentemente das inclinações políticas dos partidos ou administrações em particular.

Apesar de os Estados Unidos serem considerados como tendo uma rede de proteção social menos extensa do que os países europeus tidos como "socialistas", a despesa pública com o bem-estar social — estimada em 18,7% do PIB em 2019 (antes de os apoios relacionados com a pandemia de COVID-19 viciarem os dados) — aproxima-se da mediana dos países desenvolvidos.¹³⁵ O Canadá situava-se abaixo, com 18,0%.¹³⁶ A Austrália e a Suíça apresentavam valores semelhantes, ambos nos 16,7%.¹³⁷ O Reino

Unido encontrava-se ligeiramente acima, com 20,6% — o equivalente a cerca de 580 mil milhões de dólares de um PIB de 2,8 biliões de dólares, ou menos de 8.800 dólares per capita, numa população de 66 milhões de pessoas.¹³⁸ No entanto, como o PIB per capita dos EUA é mais elevado, a sua rede de proteção social também é mais alta em termos per capita. Em 2019, o PIB dos EUA foi superior a 21,4 biliões de dólares, dos quais cerca de 4 biliões foram gastos em proteção social pública.¹³⁹ Numa população que rondava os 330 milhões nesse ano, isto corresponde a mais de 12.000 dólares por pessoa.¹⁴⁰

Gastos dos países em programas de bem-estar social¹⁴³

Os EUA estão abaixo da média, mas não muito



Fontes: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico; Bloomberg

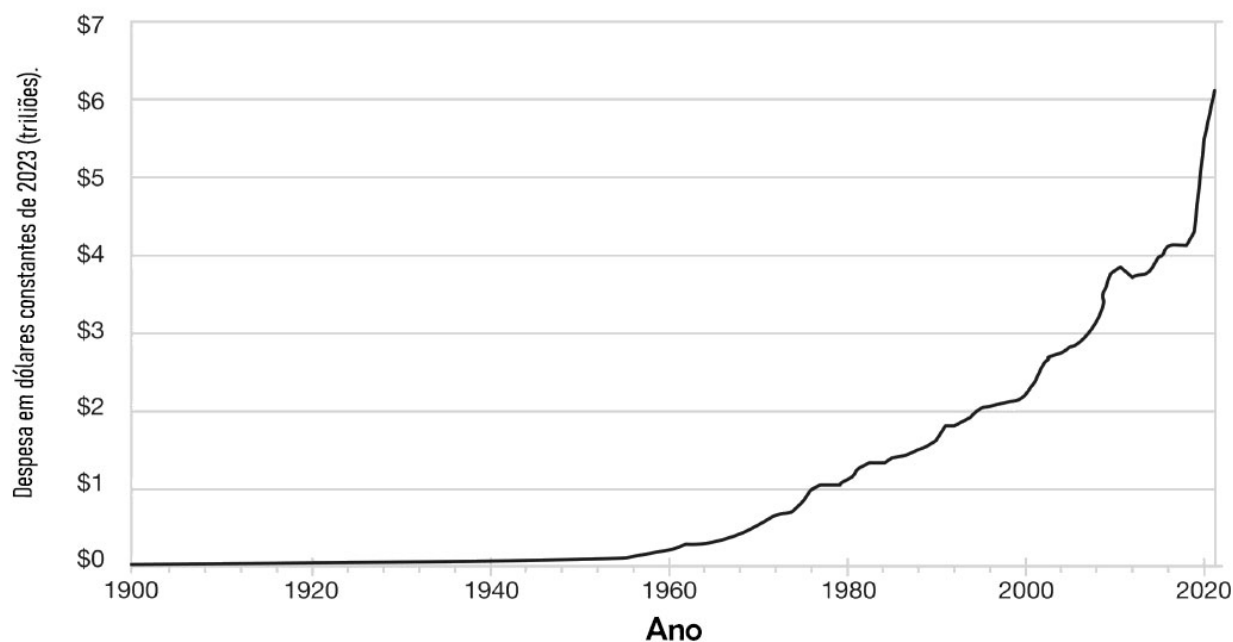
A rede de proteção social nos EUA tem vindo a crescer de forma constante, tanto em percentagem da despesa pública (representando atualmente cerca de 50% de todos os gastos

federais, estaduais e locais), como em percentagem do PIB (e tanto a despesa pública como o PIB continuam a crescer de forma constante).¹⁴² Observe os gráficos seguintes e tente perceber em que momentos estavam no poder administrações “de esquerda” ou “de direita”. (Os dois anos de dados mais recentes incluem um volume significativo de apoios relacionados com a pandemia, pelo que o pico em 2020–2021 excede a tendência subjacente de crescimento a longo prazo.)

Com o PIB a crescer de forma exponencial, é provável que a despesa com a rede de proteção social continue a aumentar, tanto no total como por pessoa. Programas significativos dentro da rede de apoio social dos EUA incluem o Medicaid (para serviços médicos básicos), o SNAP, vulgarmente conhecido como “food stamps” (essencialmente um cartão de débito para alimentos), e o apoio à habitação. O nível destes programas é atualmente apenas suficiente, mas à medida que os avanços impulsionados pela IA tornarem a medicina, os alimentos e a habitação significativamente mais baratos ao longo da década de 2030, o mesmo nível de apoio financeiro poderá proporcionar um padrão de vida muito confortável, sem que seja necessário aumentar ainda mais a percentagem do PIB dedicada à despesa social. Se essa percentagem continuar a crescer, poderá financiar serviços ainda mais abrangentes.

Gastos totais da rede de segurança social dos EUA¹⁴⁵

Federal mais estimativas estaduais e locais

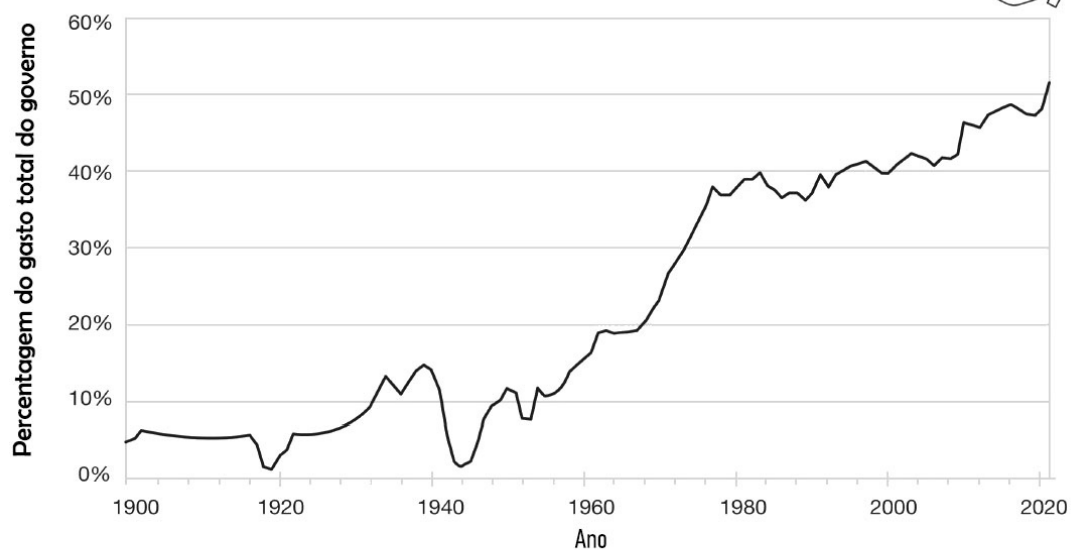


Principais fontes: US Census Bureau; Gabinete de Análise Económica;
USGovernmentSpending.com; Projeto Maddison

Rede de Segurança Social dos EUA em

% do Governo Gastos¹⁴⁶

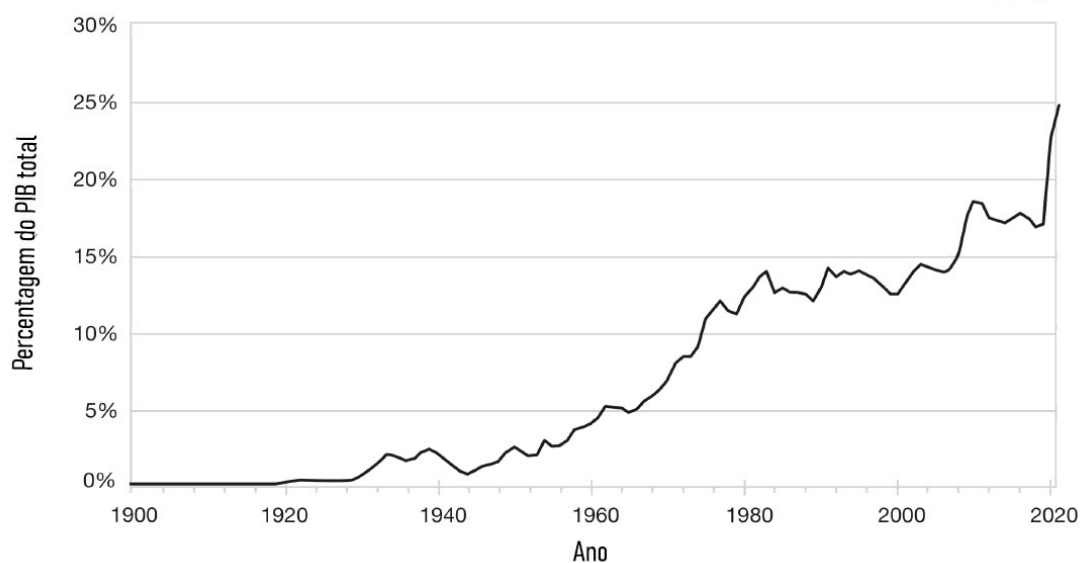
Federal mais estimativas estaduais e locais



Principais fontes: US Census Bureau; Gabinete de Análise Económica;
USGovernmentSpending.com; Projeto Maddison

Rede de Segurança Social dos EUA em % do PIB¹⁴⁷

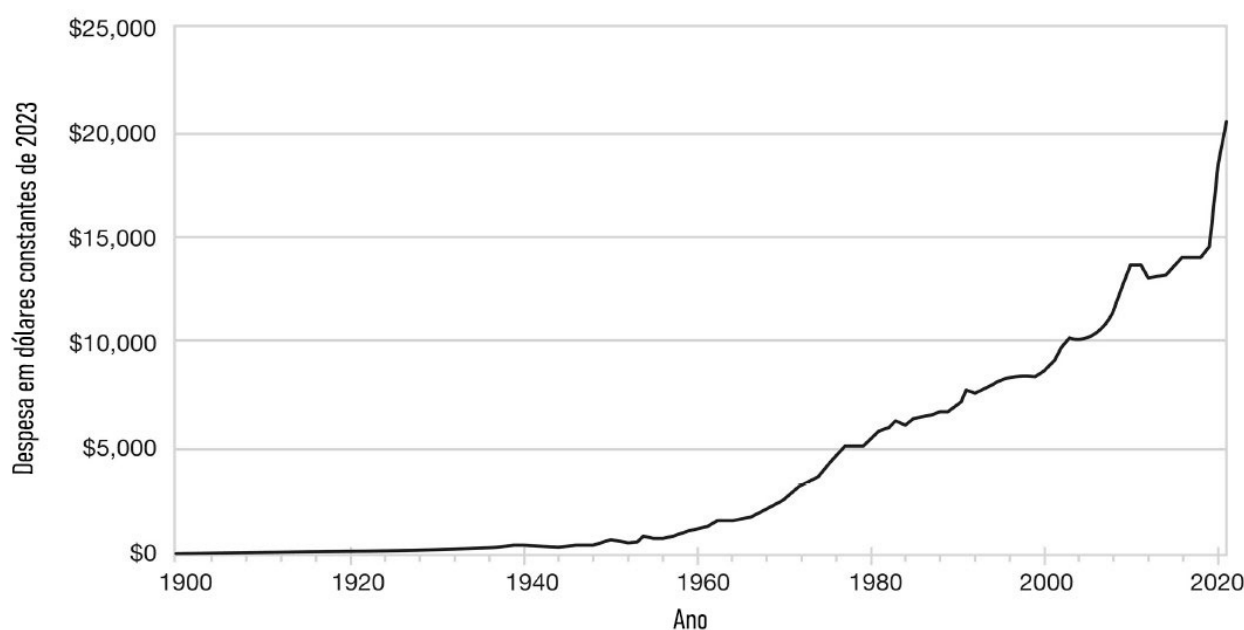
Federal mais estimativas estaduais e locais



Principais fontes: US Census Bureau; Gabinete de Análise Económica;
USGovernmentSpending.com; Projeto Maddison

Rede de Segurança Social dos EUA per capita¹⁴⁸

Federal mais estimativas estaduais e locais



Principais fontes: US Census Bureau; Gabinete de Análise Económica;
USGovernmentSpending.com; Projeto Maddison

Num diálogo em palco com o curador do TED, Chris Anderson, durante a conferência TED de 2018 em Vancouver¹⁴⁷, previ que, até ao início da década de 2030, os países desenvolvidos teriam, na prática, um rendimento básico universal (RBU) ou um equivalente funcional — e que, até ao final da década de 2030, a maioria dos países seguiria esse caminho — permitindo que as pessoas vivessem bem, segundo os padrões atuais, com esse rendimento. Tal implicaria pagamentos regulares a todos os adultos, ou a disponibilização de bens e serviços gratuitos, provavelmente financiados por uma combinação de impostos sobre os lucros gerados pela automação e investimentos públicos em tecnologias emergentes.¹⁴⁸ Programas relacionados poderiam ainda oferecer apoio financeiro a quem cuida de familiares ou contribui para a construção de comunidades saudáveis.¹⁴⁹ Reformas deste tipo poderiam atenuar significativamente os impactos negativos das disrupções laborais. Para avaliar a probabilidade de tal progresso, é necessário considerar até que ponto a economia terá evoluído até lá.

Graças à aceleração da mudança tecnológica, a riqueza global será substancialmente maior, e, dada a estabilidade a longo prazo da nossa rede de proteção social — independentemente do partido que esteja no poder — é muito provável que ela se mantenha e até aumente consideravelmente.¹⁵⁰ Contudo, convém lembrar que a abundância tecnológica não beneficia automaticamente todos de forma igual e imediata. Por exemplo, em 2022, com 1 dólar era possível adquirir mais de 50.000 vezes a capacidade computacional

que se conseguiria com o mesmo valor no ano 2000 (ajustado à inflação).¹⁵¹ Em contrapartida, segundo dados oficiais, com 1 dólar em 2022 só se conseguia adquirir cerca de 81% dos cuidados de saúde que se conseguiam no ano 2000 (também ajustado à inflação).¹⁵² E embora alguns tratamentos médicos, como as imunoterapias contra o cancro, tenham melhorado significativamente nesse período, a maioria dos gastos com saúde — como hospitalizações e exames de raio-X — manteve-se praticamente igual. Assim, pessoas que investem grande parte do seu dinheiro em tecnologia, como estudantes e jovens, beneficiaram amplamente da redução de preços nos computadores. Entretanto, aqueles que gastam uma parte significativa do seu rendimento em cuidados de saúde, como os idosos e os doentes crónicos, poderão até ter ficado em pior situação geral.

Por conseguinte, necessitaremos de políticas governamentais inteligentes para facilitar a transição e garantir que a prosperidade seja amplamente partilhada. Embora seja tecnológica e economicamente possível que todos desfrutem de um nível de vida elevado segundo os padrões atuais, o facto de realmente proporcionarmos esse apoio a quem dele precisa será uma decisão política. Por analogia, embora ainda ocorram fomes em certas partes do mundo, estas não resultam da insuficiência de produção alimentar nem do segredo da boa agricultura estar nas mãos de uma elite. As fomes geralmente ocorrem devido a má governação ou a conflitos civis. Nessas circunstâncias, torna-se muito mais difícil para as populações compensarem secas locais ou outras catástrofes naturais, e também mais desafiante para a assistência internacional ser eficaz.¹⁵³

De forma semelhante, se não formos cuidadosos enquanto sociedade, uma política tóxica poderá interferir com a elevação dos padrões de vida. Como demonstrou a pandemia de COVID-19, esta é uma preocupação particularmente urgente no campo da medicina. Embora a inovação desbloqueie capacidades transformadoras para oferecer tratamentos eficazes e acessíveis, isso não garante automaticamente os resultados — não se trata de magia. Precisaremos de uma cidadania informada e de uma governação sensata para gerir uma transição segura, justa e ordenada rumo a um sistema de saúde mais avançado. Pode imaginar-se, por exemplo, um futuro em que tecnologias que salvam vidas sejam amplamente desacreditadas. Tal como hoje proliferam online teorias da conspiração e desinformação sobre vacinas, poderão surgir rumores semelhantes sobre Inteligência Artificial de apoio à decisão clínica, terapias genéticas ou nanotecnologia médica nas próximas décadas. Tendo em conta preocupações legítimas com a cibersegurança, não será difícil imaginar como medos exagerados de manipulação genética secreta ou de nanobots controlados pelo governo poderão levar pessoas, em 2030 ou 2050, a rejeitar tratamentos cruciais. A melhor defesa contra essa dinâmica — que pode custar vidas humanas desnecessariamente — é o entendimento público destas questões.

Se conseguirmos ultrapassar estes desafios políticos de forma adequada, a vida humana será completamente transformada. Historicamente, tivemos de competir para satisfazer as necessidades físicas da vida. Mas, ao entrarmos numa Era de abundância, e à medida que a disponibilidade de bens materiais se tornar eventualmente universal — enquanto muitos empregos

tradicionais desaparecem — a nossa principal luta passará a ser por propósito e significado. Na prática, estamos a subir na hierarquia das necessidades de Maslow.¹⁵⁴ Isto já é visível na geração que hoje escolhe carreiras. Sou mentor e falo com jovens dos oito aos vinte anos, e o seu foco recai geralmente na procura de um caminho com significado, seja através da expressão criativa nas artes, seja contribuindo para a resolução dos grandes desafios — sociais, psicológicos ou de outra ordem — com que a humanidade tem lutado há milénios.

Assim, ao considerarmos o papel do trabalho nas nossas vidas, somos levados a repensar a nossa busca mais ampla por significado. Costuma dizer-se que é a morte, e a brevidade da nossa existência, que dá sentido à vida. Mas, para mim, essa perspetiva é antes uma tentativa de racionalizar a tragédia da morte como se fosse algo bom. Na realidade, a morte de alguém que amamos rouba-nos literalmente uma parte de nós próprios. Os módulos do neocórtex que estavam configurados para interagir com essa pessoa e desfrutar da sua companhia passam a gerar sentimentos de perda, vazio e dor. A morte priva-nos de tudo aquilo que, do meu ponto de vista, dá sentido à vida — competências, experiências, memórias e relações. Impede-nos de usufruir de mais momentos transcendentais que nos definem — criar e apreciar obras criativas, expressar sentimentos de amor, partilhar o humor. Todas estas capacidades serão grandemente ampliadas quando estendermos o nosso neocórtex para a nuvem. Imagine tentar explicar música, literatura, um vídeo do YouTube ou uma piada a primatas que não experienciaram a expansão neocortical que os grandes crânios dos hominídeos tornaram possível há dois milhões

de anos. Esta analogia ajuda-nos a vislumbrar, ainda que parcialmente, como, ao aumentarmos digitalmente o nosso neocórtex a partir da década de 2030, seremos capazes de criar expressões significativas que hoje não conseguimos sequer imaginar ou compreender.

Mas permanece uma questão fundamental: o que acontecerá entre agora e então? Numa conversa pessoal que tive com Daniel Kahneman, ele concordou com a minha visão de que a tecnologia da informação tem vindo a crescer — e continuará a crescer — exponencialmente em termos de relação custo-desempenho e capacidade, e que isso acabará por abranger também produtos físicos como vestuário e alimentos. Concordou igualmente que caminhamos para uma Era de abundância que satisfará as nossas necessidades físicas, sendo que a principal luta passará então por satisfazer os níveis superiores da hierarquia de Maslow. No entanto, ele antecipou um período prolongado de conflito, e até de violência, entre agora e esse futuro. Apontou que haverá inevitavelmente vencedores e vencidos à medida que a automação continua a impactar a sociedade. Um condutor que perde o seu emprego não se sentirá confortado com a promessa de que a humanidade está a ascender na hierarquia da vida, pois ele, como indivíduo, poderá não conseguir, de facto, fazer essa transição.

Um dos grandes desafios da adaptação às mudanças tecnológicas é que estas tendem a trazer benefícios difusos para uma grande parte da população, mas prejuízos concentrados para um grupo restrito. Por exemplo, os veículos autónomos trarão benefícios massivos à sociedade — desde vidas salvas a menos

poluição, menos congestionamento, mais tempo livre e custos de transporte mais baixos. Toda a população dos Estados Unidos — que se estima venha a atingir quase 400 milhões em 2050 — beneficiará, em maior ou menor grau, destas melhorias.¹⁵⁵ Consoante as premissas utilizadas, as estimativas do total potencial de benefícios variam entre 642 mil milhões e 7 biliões de dólares por ano.¹⁵⁶ Basta dizer que se trata de um valor enorme. No entanto, os benefícios para uma única pessoa dificilmente transformarão totalmente a sua vida. E mesmo sabendo, estatisticamente, que dezenas de milhares de vidas serão poupadas anualmente, não haverá forma de identificar quais as pessoas que evitaram a morte em cada ano.¹⁵⁷

Em contrapartida, os prejuízos causados pelos veículos autónomos incidirão principalmente sobre os vários milhões de pessoas que trabalham como condutores e que perderão o seu sustento. Estas pessoas serão facilmente identificáveis, e a perturbação nas suas vidas poderá ser bastante grave. Quando alguém se encontra nesta situação, não basta saber que os benefícios globais para a sociedade superam o seu sofrimento individual. Serão necessárias políticas que ajudem a reduzir a sua dor económica e a facilitar a transição para algo que ofereça significado, dignidade e segurança económica.

Um fenómeno que apoia a preocupação de Kahneman é o facto de que os medos populares são normalmente muito piores do que a realidade, como já discuti anteriormente. Perder o emprego quando já se sente que tudo na sociedade está a piorar é uma fórmula eficaz para a alienação. Kahneman e eu concordamos que

grande parte da polarização que vemos atualmente na política é produto da automação, tanto real como antecipada, e não de questões políticas tradicionais como a imigração.¹⁵⁸ Se alguém vive com um elevado nível de ansiedade em relação à sua estabilidade económica, tenderá a ser hostil perante qualquer coisa que pareça vir agravar ainda mais os seus problemas.

Contudo, a história mostra que a sociedade é melhor a adaptar-se a mudanças, mesmo drásticas, do que aquilo que se espera. Substituímos a maioria dos empregos da economia diversas vezes ao longo dos últimos dois séculos e fizemo-lo sem causar grande desorganização social a longo prazo — quanto mais revoluções violentas. Os meios de comunicação de massas e a aplicação da lei têm sido eficazes em prevenir ou suprimir rapidamente a violência, tal como os Ludditas foram suprimidos há dois séculos. Sim, os indivíduos podem tornar-se violentos por várias razões, incluindo doença mental. Dada a cultura americana das armas, há demasiados casos em que isso se torna fatal.

No entanto, tragédias que encham as manchetes não mudam o facto de que, no geral, a violência tem vindo a diminuir drasticamente ao longo dos séculos.¹⁵⁹ Tal como discutido no capítulo anterior, apesar de a violência em diferentes países poder oscilar de ano para ano e de década para década, a tendência a longo prazo no mundo desenvolvido é uma redução dramática e sustentada. Como defende o meu amigo Steven Pinker no seu livro de 2011 *Os Anjos Bons da Nossa Natureza: Por Que Diminuiu a Violência*, esse declínio é o resultado de tendências civilizacionais profundas — fatores como a existência de Estados baseados no

Estado de Direito, o aumento da literacia e o desenvolvimento económico.¹⁶⁰ Todos estes fatores, importa referir, são reforçados pelo progresso exponencial das tecnologias de informação. Por isso, temos razões sólidas para sermos otimistas quanto ao futuro.

Devemos lembrar-nos de que novas e inovadoras oportunidades acompanham os efeitos negativos da perda de empregos devido à automação, e isso não vai mudar. Além disso, a rede de segurança social é substancial e está a crescer, e, como referi, não depende muito do clima político. Conta com um apoio profundo que transcende as aparentes oscilações da opinião pública. Estes programas são uma expressão da nossa compaixão natural pelos concidadãos, mas são também uma resposta política destinada a atenuar as disrupções sociais provocadas pela mudança tecnológica.

No entanto, a rede de segurança social não substitui o sentido de propósito que o trabalho oferece e, como argumenta Kahneman, haverá muitos perdedores no mercado de trabalho. É verdade que os Estados Unidos conseguiram gerir várias fases de automação sem grandes perturbações sociais, mas a diferença, desta vez, será a amplitude, profundidade e rapidez da mudança. Kahneman acredita que as pessoas precisam de tempo para se adaptarem à mudança e aproveitarem as novas oportunidades, e que muitas não conseguirão requalificar-se rapidamente para novos tipos de emprego ou modelos de negócio pessoal alternativos.

Penso que Kahneman tem razão em certos aspetos, mas devemos lembrar-nos de que há muitas áreas de mudança

tecnológica onde não existem perdedores, ou pelo menos estes não se fazem notar. Tomemos, por exemplo, uma nova cura para uma doença. Empresas e indivíduos que lucravam com o tratamento dessa doença perdem uma fonte de rendimento a longo prazo. No entanto, o benefício para a sociedade é tão grande que a cura é quase universalmente celebrada — até pela maioria das pessoas que tratavam dessa doença. Estes sabem, por experiência própria, o sofrimento que está a ser aliviado e não se fixam no negócio perdido. Em todo o caso, a sociedade reconhece que é melhor encontrar formas de suavizar o impacto económico para essas pessoas do que bloquear curas em nome de empregos e lucros.

Ao longo de toda a história de duzentos anos da automação, muitos imaginaram que os empregos desaparecem num mundo que, de resto, permanece inalterado. Este fenómeno aplica-se a todos os aspetos da antecipação do futuro — as pessoas imaginam uma única mudança como se nada mais fosse diferente. A realidade é que muitas mudanças positivas acompanham cada tipo de perda de emprego, e essas mudanças positivas surgirão tão rapidamente quanto as disrupções.

As pessoas adaptam-se, na verdade, muito rapidamente à mudança — especialmente quando se trata de uma mudança para melhor. No final da década de 1980, quando a internet ainda estava principalmente limitada a universidades e governos, previ que uma vasta rede mundial de comunicação e partilha de informação estaria eventualmente disponível para todos, até mesmo para crianças em idade escolar, até ao final da década de 1990.¹⁶¹ Também previ o advento de dispositivos móveis que as pessoas utilizariam para

aceder a essa rede no início do século XXI.¹⁶² Tais previsões pareciam intimidantes e disruptivas (para não dizer improváveis) quando as fiz, mas concretizaram-se, e essas tecnologias foram rapidamente adotadas e integradas na sociedade. Só para dar um exemplo: toda a economia das aplicações praticamente não existia há uma década e meia, e hoje está tão profundamente enraizada que as pessoas mal se lembram de um tempo em que ela não existia.

E os efeitos não são apenas económicos. Uma investigação da Universidade de Stanford estimou que, em 2017, cerca de 39 por cento dos casais heterossexuais americanos se tinham conhecido online — muitos deles através de aplicações móveis como o Tinder e o Hinge.¹⁶³ Isso significa que muitas das crianças que hoje frequentam o ensino básico existem apenas por causa de uma tecnologia que é apenas alguns anos mais velha do que elas. Quando olhamos para estas mudanças com alguma distância, a rapidez com que as aplicações influenciaram a sociedade é verdadeiramente impressionante.

As pessoas também imaginam frequentemente humanos não aprimorados a lutar para competir com máquinas, mas isso é um equívoco. Imaginar um mundo onde os humanos estão largamente em competição com máquinas movidas a IA é uma forma errada de pensar o futuro. Para ilustrar isto, imagine-se um viajante do tempo com um smartphone de 2024 a regressar ao ano de 1924.¹⁶⁴ A inteligência desta pessoa pareceria verdadeiramente sobre-humana aos olhos das pessoas da época de Calvin Coolidge. Poderia fazer cálculos avançados sem esforço, traduzir razoavelmente bem

qualquer língua principal, jogar xadrez melhor do que qualquer grande mestre e aceder instantaneamente a uma quantidade de factos equivalente a toda a Wikipédia. Para as pessoas de 1924, seria óbvio que as capacidades desse viajante estavam radicalmente aumentadas graças ao telefone. Mas, para nós, nos anos 2020, é fácil perder essa perspetiva. Não sentimos que estamos aumentados. Da mesma forma, iremos aproveitar os avanços de 2030 e 2040 para aumentar as nossas próprias capacidades de forma perfeita — e isto parecerá ainda mais natural à medida que os nossos cérebros se forem ligando diretamente aos computadores. Quando se trata de enfrentar os desafios cognitivos do nosso futuro de abundância, na maioria dos aspetos, não estaremos a competir com a IA mais do que atualmente competimos com os nossos smartphones.¹⁶⁵ Na verdade, essa simbiose não é nova: tem sido, desde a invenção das ferramentas de pedra, o propósito da tecnologia — estender o nosso alcance, tanto físico como intelectual.

Dito isto, acredito que o espectro de uma perturbação social problemática — incluindo violência — durante esta transição é uma possibilidade que devemos antecipar e procurar mitigar. Mas a minha expectativa é que uma transição violenta seja improvável, tendo em conta as fortes tendências de longo prazo que mencionei e que favorecem a estabilidade.

A razão mais importante para o optimismo relativamente às transições sociais que se avizinham é que a crescente abundância material irá reduzir os incentivos para a violência. Quando as pessoas não têm acesso ao necessário para viver, ou quando o

crime já é elevado, podem sentir que não têm nada a perder ao recorrer à violência. Mas as mesmas tecnologias que causarão essas disrupções sociais também tornarão os alimentos, a habitação, os transportes e os cuidados de saúde muito mais baratos. E o crime provavelmente continuará a diminuir, graças a uma combinação de melhor ensino, policiamento mais inteligente e redução de toxinas ambientais como o chumbo, que danificam o cérebro humano. Quando as pessoas sentem que têm vidas longas e seguras pela frente, têm incentivos mais fortes para resolver as suas diferenças através da política, em vez de arriscar tudo recorrendo à força.

Kahneman e eu postulámos que as nossas visões diferentes sobre a natureza da transição que se avizinha provavelmente são influenciadas pelas nossas infâncias contrastantes. Ele passou os seus anos formativos a fugir dos nazis com a família em França. Eu nasci depois da Segunda Guerra Mundial, na relativa segurança da cidade de Nova Iorque, embora tenha sido, ainda assim, influenciado pelo Holocausto enquanto membro da “geração seguinte”. Assim, Kahneman experienciou em primeira mão o conflito extraordinário, o desenraizamento e o ódio que surgiram, pode-se argumentar, da privação que se seguiu à Primeira Guerra Mundial na Europa — especialmente na Alemanha.

Contudo, orquestrar uma transição construtiva e contínua exigirá estratégias políticas esclarecidas e decisões sensatas de política pública. Como a política e a organização social continuarão a ser fatores críticos, continuará a existir um papel importante para políticos e líderes cívicos. Ainda assim, a oportunidade inerente a

este progresso tecnológico é imensa. Trata-se, nada mais nada menos, do que ultrapassar os males ancestrais da humanidade.

CAPÍTULO 6

Os Próximos Trinta Anos na Saúde e Bem-Estar

1. A Década de 2020: Combinar a IA Com a Biotecnologia

Quando leva o seu automóvel à oficina para ser reparado, o mecânico tem um entendimento completo das suas peças e de como estas funcionam em conjunto. A engenharia automóvel é, de facto, uma ciência exata. Assim, automóveis bem conservados podem durar quase indefinidamente, e mesmo os acidentes mais graves são tecnicamente possíveis de reparar. O mesmo não se pode dizer do corpo humano. Apesar de todos os avanços notáveis da medicina científica ao longo dos últimos duzentos anos, a medicina ainda não é uma ciência exata. Os médicos continuam a fazer muitas coisas que se sabe funcionarem, sem se compreender totalmente como funcionam. Grande parte da medicina assenta em aproximações imprecisas que, na maioria dos casos, são maioritariamente certas para a maioria dos pacientes, mas provavelmente não são completamente certas para si.

Transformar a medicina numa ciência exata exigirá convertê-la numa tecnologia da informação — permitindo-lhe beneficiar do progresso exponencial das tecnologias de informação. Esta

mudança de paradigma profunda está agora bem encaminhada e envolve a combinação da biotecnologia com a inteligência artificial e as simulações digitais. Já estamos a ver benefícios imediatos, como descreverei neste capítulo — desde a descoberta de fármacos à vigilância de doenças e à cirurgia robótica. Por exemplo, em 2023, o primeiro medicamento concebido integralmente por inteligência artificial entrou na fase II de ensaios clínicos para o tratamento de uma doença pulmonar rara.¹ Mas o benefício mais fundamental da convergência entre IA e biotecnologia é ainda mais significativo.

Quando a medicina dependia unicamente de experimentação laboratorial meticulosa e da transmissão de conhecimentos de médicos humanos para a geração seguinte, a inovação progredia de forma lenta e linear. Mas a inteligência artificial pode aprender a partir de mais dados do que um médico humano alguma vez conseguiria, acumulando experiência proveniente de milhares de milhões de procedimentos, em vez dos milhares que um médico humano pode realizar ao longo de uma carreira. E como a IA beneficia de melhorias exponenciais no hardware subjacente, à medida que assume um papel cada vez mais relevante na medicina, os cuidados de saúde colherão também os benefícios exponenciais. Com estas ferramentas, já começámos a encontrar respostas para problemas bioquímicos através de pesquisas digitais que percorrem todas as opções possíveis, identificando soluções em horas em vez de anos.²

Talvez a classe de desafios mais importante neste momento seja o desenvolvimento de tratamentos para novas ameaças virais. Este desafio é semelhante a encontrar qual a chave que abrirá a

fechadura química de um determinado vírus — a partir de um monte de chaves capaz de encher uma piscina. Uma investigadora humana, recorrendo ao seu conhecimento e capacidades cognitivas, poderia talvez identificar algumas dezenas de moléculas com potencial para tratar a doença, mas o número real de moléculas potencialmente relevantes está geralmente na ordem dos triliões.³ Ao fazer este rastreio, a maioria será obviamente inadequada e não justificará uma simulação completa, mas milhares de milhões poderão merecer um exame computacional mais robusto. Num extremo mais vasto, estima-se que o espaço de todas as moléculas possíveis como fármacos contenha cerca de um milhão de biliões de biliões de biliões de biliões de biliões de possibilidades!⁴ Independentemente da forma como se quantifica esse número, a IA permite agora que os cientistas filtrem esse monte gigantesco para se focarem nas chaves mais prováveis de funcionarem contra um determinado vírus.

Pense nas vantagens deste tipo de pesquisa exaustiva. No paradigma atual, uma vez que se tenha um agente potencialmente eficaz no combate a uma doença, é possível organizar algumas dezenas ou centenas de voluntários humanos e testá-lo em ensaios clínicos ao longo de meses ou anos, a um custo de dezenas ou centenas de milhões de dólares. Muitas vezes, essa primeira opção não constitui o tratamento ideal: exige-se a exploração de alternativas, o que levará mais alguns anos a testar. E não se pode avançar muito mais até que esses resultados estejam disponíveis. O processo regulatório dos EUA envolve três fases principais de ensaios clínicos e, segundo um estudo recente do MIT, apenas 13,8 por cento dos fármacos candidatos chegam ao fim do processo com

aprovação da FDA.⁵ O resultado final é um processo que, tipicamente, leva uma década para colocar um novo medicamento no mercado, com um custo médio estimado entre 1,3 mil milhões e 2,6 mil milhões de dólares.⁶

Nos últimos anos, o ritmo de descobertas assistidas por IA aumentou de forma notável. Em 2019, investigadores da Universidade Flinders, na Austrália, criaram uma vacina contra a gripe “turbinada” utilizando um simulador biológico para descobrir substâncias que ativam o sistema imunitário humano.⁷ O sistema gerou digitalmente triliões de compostos químicos, e os investigadores, procurando a formulação ideal, usaram outro simulador para determinar se cada um deles seria útil como fármaco potenciador da imunidade contra o vírus.⁸

Em 2020, uma equipa do MIT utilizou IA para desenvolver um antibiótico potente, capaz de eliminar algumas das bactérias resistentes a medicamentos mais perigosas que existem. Em vez de avaliar apenas alguns tipos de antibióticos, a IA analisou 107 milhões deles em apenas algumas horas e devolveu vinte e três candidatos potenciais, destacando dois que pareciam ser os mais eficazes.⁹ Segundo Jacob Durrant, investigador da Universidade de Pittsburgh especializado em desenho de fármacos, “O trabalho é realmente notável. Esta abordagem evidencia o poder da descoberta de medicamentos assistida por computador. Seria impossível testar fisicamente mais de 100 milhões de compostos quanto à sua atividade antibiótica.”¹⁰ Desde então, os investigadores do MIT começaram a aplicar este método para criar novos antibióticos eficazes a partir do zero.

Mas a aplicação mais importante da IA à medicina em 2020 foi, de longe, o papel crucial que desempenhou no desenvolvimento rápido de vacinas seguras e eficazes contra a COVID-19. A 11 de Janeiro de 2020, as autoridades chinesas divulgaram a sequência genética do vírus.¹¹ Os cientistas da Moderna iniciaram então os trabalhos com ferramentas avançadas de aprendizagem automática, que analisaram qual seria a vacina mais eficaz contra o vírus, e apenas dois dias depois já tinham criado a sequência da sua vacina de mRNA.¹² A 7 de fevereiro foi produzida a primeira remessa clínica. Após testes preliminares, foi enviada para os National Institutes of Health (Institutos Nacionais de Saúde dos EUA) a 24 de fevereiro. E no dia 16 de março — apenas sessenta e três dias após a seleção da sequência — a primeira dose foi administrada a um participante do ensaio. Antes da pandemia, o desenvolvimento de vacinas costumava demorar entre cinco e dez anos. Conseguir esta conquista em tão pouco tempo terá seguramente salvado milhões de vidas.

Mas a guerra ainda não terminou. Em 2021, com o surgimento de variantes da COVID-19, investigadores da Universidade do Sul da Califórnia (USC) desenvolveram uma ferramenta inovadora de IA para acelerar o desenvolvimento adaptativo de vacinas que poderão ser necessárias à medida que o vírus continua a sofrer mutações.¹³ Graças à simulação, vacinas candidatas podem ser concebidas em menos de um minuto e validadas digitalmente em apenas uma hora. À data em que estiver a ler isto, é provável que já existam métodos ainda mais avançados.

Todas as aplicações que descrevi são exemplos de um desafio muito mais fundamental na biologia: prever como as proteínas se dobram. As instruções de ADN no nosso genoma produzem sequências de aminoácidos, que se dobram formando uma proteína cuja estrutura tridimensional determina, em grande parte, como essa proteína funciona realmente. O nosso corpo é composto, em grande medida, por proteínas, por isso compreender a relação entre a sua composição e função é essencial para desenvolver novos medicamentos e curar doenças. Infelizmente, os humanos sempre tiveram uma taxa de acerto bastante baixa na previsão do dobramento de proteínas, pois a complexidade envolvida desafia qualquer regra simples e facilmente conceptualizável. Assim, as descobertas continuam a depender da sorte e de um trabalho árduo, e soluções ideais podem permanecer por descobrir. Este tem sido, há muito, um dos principais obstáculos à obtenção de avanços farmacêuticos significativos.¹⁴

É aqui que as capacidades de reconhecimento de padrões da IA oferecem uma vantagem profunda. Em 2018, a DeepMind, da Alphabet, criou um programa chamado AlphaFold, que competiu contra os principais preditores do dobramento de proteínas, incluindo cientistas humanos e abordagens anteriores baseadas em software.¹⁵ A DeepMind não utilizou o método habitual de recorrer a um catálogo de formas de proteínas como modelos. Tal como o AlphaGo Zero, prescindiu do conhecimento humano estabelecido. O AlphaFold ficou em primeiro lugar entre noventa e oito programas concorrentes, tendo previsto com precisão vinte e cinco de quarenta e três proteínas, enquanto o segundo classificado acertou apenas em três de quarenta e três.¹⁶

Contudo, as previsões da IA ainda não atingiam a precisão dos experimentos laboratoriais, pelo que a DeepMind voltou à prancheta e incorporou transformadores — a técnica de aprendizagem profunda que alimenta o GPT-3. Em 2021, a DeepMind lançou publicamente o AlphaFold 2, que alcançou uma descoberta verdadeiramente impressionante.¹⁷ A IA passou a ser capaz de alcançar uma precisão quase equivalente à dos dados experimentais para praticamente qualquer proteína que lhe fosse apresentada. Isto expandiu repentinamente o número de estruturas de proteínas disponíveis para os biólogos de cerca de 180 mil¹⁸ para centenas de milhões, e em breve atingirá os milhares de milhões.¹⁹ Tal progresso irá acelerar drasticamente o ritmo das descobertas biomédicas.

Atualmente, a descoberta de fármacos assistida por IA é um processo orientado por humanos — os cientistas precisam de identificar o problema que estão a tentar resolver, formulá-lo em termos químicos e definir os parâmetros da simulação. No entanto, nas próximas décadas, a IA ganhará capacidade para realizar buscas de forma mais criativa. Por exemplo, poderá identificar um problema que os clínicos humanos nem sequer tinham detetado (por exemplo, que um determinado subgrupo de pessoas com uma certa doença não responde bem aos tratamentos padrão) e propor terapias complexas e inovadoras.

Entretanto, a IA irá expandir-se para a modelação, em simulação, de sistemas cada vez maiores — desde proteínas a complexos proteicos, organelos, células, tecidos e órgãos inteiros. Tal permitirá curar doenças cuja complexidade as torna

inalcançáveis pela medicina atual. Por exemplo, na última década surgiram muitos tratamentos promissores contra o cancro, incluindo imunoterapias como CAR-T, BiTEs e inibidores de checkpoints imunológicos (proteínas que regulam e limitam a resposta imunitária).²⁰ Estes já salvaram milhares de vidas, mas frequentemente continuam a falhar porque os cancros desenvolvem resistência. Muitas vezes, isso envolve os tumores alterarem o seu microambiente de formas que não conseguimos compreender plenamente com as técnicas atuais.²¹ Quando a IA for capaz de simular de forma robusta o tumor e o seu microambiente, conseguiremos personalizar terapias para ultrapassar essa resistência.

Do mesmo modo, doenças neurodegenerativas como Alzheimer e Parkinson envolvem processos subtis e complexos que fazem com que proteínas mal dobradas se acumulem no cérebro e provoquem danos.²² Como é impossível estudar estes efeitos de forma exaustiva num cérebro vivo, a investigação tem sido extremamente lenta e difícil. Com simulações baseadas em IA, poderemos compreender as suas causas profundas e tratar os pacientes de forma eficaz muito antes de chegarem a estados debilitantes. Essas mesmas ferramentas de simulação cerebral permitir-nos-ão também alcançar avanços decisivos em relação a distúrbios de saúde mental, que se estima virem a afetar mais de metade da população dos EUA em algum momento das suas vidas.²³ Até agora, os médicos têm recorrido a medicamentos psiquiátricos de abordagem grosseira, como os ISRS e os IRSN, que ajustam temporariamente desequilíbrios químicos mas que, muitas vezes, têm benefícios modestos, não funcionam de todo para alguns

pacientes e apresentam longas listas de efeitos secundários.²⁴ Quando a IA nos proporcionar uma compreensão funcional completa do cérebro humano — a estrutura mais complexa do universo conhecido! — seremos capazes de atacar muitos problemas de saúde mental na sua origem.

Para além das promissoras capacidades da IA na descoberta de novas terapias, estamos também a caminhar para uma revolução nos ensaios que usamos para as validar. A FDA (Agência de Administração de Alimentos e Medicamentos dos EUA) está agora a incorporar resultados de simulação no seu processo de aprovação regulatória.²⁵ Nos próximos anos, isto será especialmente importante em casos semelhantes à pandemia de COVID-19 — em que uma nova ameaça viral surge repentinamente e milhões de vidas podem ser salvas através do desenvolvimento acelerado de vacinas.²⁶

Mas imaginemos que pudéssemos digitalizar completamente o processo de ensaios clínicos — usando IA para avaliar como um fármaco funcionaria em dezenas de milhares de pacientes (simulados) durante um período (simulado) de anos, e fazer tudo isto em apenas algumas horas ou dias. Isto permitiria resultados de ensaio muito mais ricos, rápidos e precisos do que os relativamente lentos e limitados ensaios com humanos que utilizamos atualmente.

Uma grande limitação dos ensaios humanos é que (dependendo do tipo de fármaco e da fase do ensaio) envolvem apenas cerca de uma dúzia a alguns milhares de sujeitos.²⁷ Isto significa que, num dado grupo de participantes, poucos — ou nenhuns — são

estatisticamente propensos a reagir ao fármaco exatamente da mesma forma que o seu corpo reagiria. Muitos fatores podem influenciar a eficácia de um fármaco em si, como a genética, alimentação, estilo de vida, equilíbrio hormonal, microbioma, subtipo da doença, outros medicamentos que esteja a tomar, e outras doenças que possa ter. Se ninguém nos ensaios clínicos corresponder a si em todas essas dimensões, pode acontecer que, mesmo sendo um bom medicamento para a média das pessoas, seja prejudicial para si.

Hoje em dia, um ensaio pode apresentar uma melhoria média de 15 por cento numa determinada condição para 3.000 pessoas. Mas os ensaios simulados podem revelar detalhes ocultos. Por exemplo, um determinado subgrupo de 250 pessoas desse grupo (por exemplo, aquelas com um certo gene) pode, na realidade, ser prejudicado pelo fármaco, sofrendo um agravamento de 50 por cento nas suas condições, enquanto um subgrupo diferente de 500 pessoas (por exemplo, aquelas que também têm doença renal) pode observar uma melhoria de 70 por cento. As simulações serão capazes de identificar numerosas correlações deste tipo, fornecendo perfis de risco-benefício altamente específicos para cada paciente individual.

A introdução desta tecnologia será gradual, porque as exigências computacionais das simulações biológicas variam consoante a aplicação. Fármacos compostos principalmente por uma única molécula situam-se na extremidade mais simples do espectro e serão os primeiros a ser simulados. Entretanto, técnicas como o CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic

Repeats) e terapias concebidas para influenciar a expressão genética envolvem interações extremamente complexas entre muitos tipos de moléculas e estruturas biológicas, e por isso levarão mais tempo a ser satisfatoriamente simuladas *in silico* (em ambiente computacional). Para substituir os ensaios em humanos como principal método de teste, as simulações baseadas em IA terão de modelar não apenas a ação direta de um determinado agente terapêutico, mas também como este se integra nos sistemas complexos de um corpo inteiro ao longo de um período prolongado.

Não é claro quão detalhadas estas simulações precisarão de ser, em última análise. Por exemplo, parece improvável que as células da pele do polegar sejam relevantes para testar um fármaco contra o cancro do fígado. Mas, para que estas ferramentas possam ser validadas como seguras, será provavelmente necessário digitalizar o corpo humano inteiro com uma resolução essencialmente molecular. Só então os investigadores poderão determinar de forma robusta quais os fatores que podem, com confiança, ser abstraídos em função de cada aplicação. Este é um objetivo a longo prazo, mas é um dos mais profundamente importantes no que diz respeito à capacidade da IA para salvar vidas — e estaremos a fazer progressos significativos nessa direção até ao final da década de 2020.

É provável que exista uma resistência considerável por parte da comunidade médica quanto ao aumento da confiança em simulações para ensaios de fármacos — por várias razões. Faz todo o sentido haver prudência relativamente aos riscos. Os médicos não quererão alterar os protocolos de aprovação de forma a colocar

pacientes em risco, pelo que as simulações terão de apresentar um histórico muito sólido de desempenho igual ou superior aos métodos de ensaio atuais. Mas há outro fator: a responsabilidade jurídica. Ninguém quererá ser a pessoa que aprovou um tratamento novo e promissor se este acabar por se revelar um desastre. Assim, os reguladores terão de antecipar estas abordagens emergentes e agir de forma proativa para garantir que os incentivos estão equilibrados entre a prudência necessária e a inovação que pode salvar vidas.

Mesmo antes de dispormos de bio-simulações robustas, a IA já está a ter impacto na biologia genética. Os 98 por cento dos genes que não codificam proteínas foram, em tempos, descartados como “DNA lixo” (junk DNA).²⁸ Hoje sabemos que são fundamentais para a expressão genética (ou seja, para determinar quais os genes que são efetivamente utilizados e em que grau), mas é extremamente difícil identificar essas relações a partir do próprio DNA não codificante. No entanto, por conseguir detetar padrões extremamente subtis, a IA está a começar a desbloquear este obstáculo, tal como aconteceu com a descoberta feita em 2019 por cientistas de Nova Iorque, que identificaram ligações entre o DNA não codificante e o autismo.²⁹ Olga Troyanskaya, a investigadora principal do projeto, afirmou que esta descoberta constitui “a primeira demonstração clara de mutações não hereditárias e não codificantes como causa de qualquer doença ou perturbação humana complexa.”³⁰

Na sequência da pandemia de COVID-19, surgiu também uma nova urgência no desafio de monitorizar doenças infecciosas. No

passado, os epidemiologistas tinham de escolher entre vários tipos imperfeitos de dados para tentar prever surtos virais nos Estados Unidos. Um novo sistema de IA chamado ARGONet integra diferentes tipos de dados em tempo real e atribui-lhes pesos conforme o seu poder preditivo.³¹ O ARGONet combina registos médicos eletrónicos, dados históricos, pesquisas em tempo real no Google feitas por pessoas preocupadas, e padrões espaço-temporais de propagação da gripe.³² O investigador principal, Mauricio Santillana, da Universidade de Harvard, explicou: “O sistema avalia continuamente o poder preditivo de cada método independente e recalibra a forma como essa informação deve ser utilizada para produzir estimativas da gripe mais precisas.”³³ De facto, uma investigação de 2019 demonstrou que o ARGONet superou todas as abordagens anteriores. Foi mais eficaz do que o Google Flu Trends em 75 por cento dos estados estudados e conseguiu prever a atividade gripal a nível estadual com uma semana de antecedência em relação aos métodos habituais do CDC (Centers for Disease Control and Prevention — Centros de Controlo e Prevenção de Doenças).³⁴ Estão agora a ser desenvolvidas novas abordagens baseadas em IA para ajudar a travar o próximo grande surto.

Para além das aplicações científicas, a IA está a ganhar capacidade para superar médicos humanos na medicina clínica. Num discurso em 2018, previ que, num ou dois anos, uma rede neuronal seria capaz de analisar imagens radiológicas com a mesma eficácia dos médicos humanos. Duas semanas depois, investigadores de Stanford anunciaram o CheXNet, que utilizou 100.000 imagens de raios-X para treinar uma rede neuronal

convolucional com 121 camadas, capaz de diagnosticar catorze doenças diferentes. Superou os médicos humanos com os quais foi comparada, fornecendo provas preliminares, mas encorajadoras, do seu enorme potencial diagnóstico.³⁵ Outras redes neurais demonstraram capacidades semelhantes. Um estudo de 2019 mostrou que uma rede neuronal que analisava métricas clínicas em linguagem natural foi capaz de diagnosticar doenças pediátricas com mais precisão do que oito médicos recém-formados expostos aos mesmos dados — e superou todos os vinte médicos humanos em algumas áreas.³⁶ Em 2021, uma equipa da Universidade Johns Hopkins desenvolveu um sistema de IA chamado DELFI, capaz de reconhecer padrões subtis em fragmentos de DNA presentes no sangue de uma pessoa e detetar 94 por cento dos casos de cancro do pulmão através de um simples exame laboratorial — algo que mesmo especialistas humanos não conseguem fazer sozinhos.³⁷

Ferramentas clínicas como estas estão a fazer a transição rapidamente de prova de conceito para implementação em grande escala. Em julho de 2022, a *Nature Medicine* publicou os resultados de um estudo massivo com mais de 590.000 pacientes hospitalares, que foram monitorizados com um sistema apoiado por IA chamado Targeted Real-Time Early Warning System (TREWS), para detetar septicemia — uma resposta infecciosa ameaçadora de vida que mata cerca de 270.000 americanos por ano.³⁸ O TREWS deu aos médicos um alerta antecipado para iniciar o tratamento, reduzindo as mortes por septicemia entre os pacientes em 18,7 por cento — indicando o potencial para salvar dezenas de milhares de vidas anualmente à medida que a adoção se alarga. Cada vez mais, esses modelos vão incorporar formas mais ricas de informação, como os

dados provenientes dos nossos rastreadores de fitness portáteis, e poderão sugerir tratamentos antes mesmo de alguém saber que está doente.

À medida que os anos 2020 avançam, as ferramentas apoiadas por IA vão alcançar níveis de desempenho sobre-humanos em praticamente todas as tarefas de diagnóstico.³⁹ A interpretação de imagens médicas é uma tarefa que permite que as redes neuronais utilizem as suas forças naturais de forma mais poderosa. Informações clinicamente significativas podem estar ocultas em imagens de forma tão sutil que um ser humano não as consegue detetar visualmente, mas que podem ser óbvias para um sistema de IA. E, ao contrário de outras formas de diagnóstico, que exigem a integração de muitos tipos de informação distintas e qualitativas, os padrões de píxeis nas imagens são totalmente redutíveis a dados quantificáveis — o ponto forte da IA. É por isso que a imagem médica é uma das primeiras áreas a ver a IA alcançar níveis tão notáveis de desempenho. Pelo mesmo motivo, será relativamente fácil generalizar sistemas como o CheXNet e o seu parente CheXpert para outros tipos de análise de imagens médicas. Em última instância, a IA provavelmente será capaz de desbloquear vasto potencial ainda não explorado nas imagens médicas — talvez identificando fatores de risco ocultos em órgãos aparentemente saudáveis, o que poderia permitir medidas preventivas salva-vidas muito antes de um problema causar danos.

As cirurgias também vão beneficiar desta revolução, à medida que tanto a quantidade de dados de qualidade sobre cirurgias como os recursos computacionais disponíveis estão a crescer

rapidamente.⁴⁰ Durante anos, os robôs têm sido usados para auxiliar os médicos humanos, mas agora estão a demonstrar a capacidade de realizar intervenções sem a participação humana. Nos Estados Unidos, em 2016, o Smart Tissue Autonomous Robot (STAR) obteve melhores resultados do que os cirurgiões humanos numa tarefa de sutura intestinal em testes com animais.⁴¹ Em 2017, um robô chinês completou uma cirurgia de implante dentário de forma autónoma, um procedimento de alta precisão.⁴² Depois, em 2020, a Neuralink apresentou um robô cirúrgico que automatiza grande parte do processo de implantação de uma interface cérebro-computador, estando a empresa a trabalhar para alcançar a autonomia total.⁴³

O cirurgião humano médio pode realizar várias centenas de cirurgias por ano, totalizando, no máximo, algumas dezenas de milhares ao longo de toda a carreira. Em muitos casos, como em especialidades que exigem procedimentos mais longos e complexos, este número pode ser ainda menor. Em contraste, a IA que alimenta os cirurgiões robóticos será capaz de aprender com a experiência de qualquer cirurgia que esse sistema realize, em qualquer parte do mundo. Isto cobrirá uma gama muito mais ampla de circunstâncias clínicas do que qualquer ser humano poderia encontrar — potencialmente milhões de cirurgias. Além disso, a IA será capaz de realizar bilhões de cirurgias simuladas, manipulando variáveis incomuns que seriam impossíveis ou antiéticas de treinar num ambiente clínico. Por exemplo, as cirurgias simuladas poderiam treinar os cirurgiões robóticos a lidar com combinações raras de doenças ou a explorar os limites da medicina de trauma com lesões complexas que a maioria dos cirurgiões nunca verá,

nem sequer uma vez na carreira. Isso tornará a cirurgia muito mais segura e eficaz do que é atualmente.⁴⁴

2. Décadas de 2030 e 2040: Desenvolver e Aperfeiçoar a Nanotecnologia

É notável que a biologia tenha criado uma criatura tão elaborada como o ser humano, dotado tanto de destreza intelectual como de coordenação física (por exemplo, polegares opositores), o que possibilitou o desenvolvimento da tecnologia. No entanto, estamos longe de ser ótimos, especialmente no que diz respeito ao pensamento. Como Hans Moravec argumentou já em 1988, ao contemplar as implicações do progresso tecnológico, por mais que aperfeiçoemos a nossa biologia baseada no ADN, os nossos sistemas de carne e osso estarão em desvantagem relativamente às nossas criações projetadas com um propósito específico.⁴⁵ Como escreveu o autor Peter Weibel, Moravec compreendeu que, neste sentido, os humanos só podem ser “robôs de segunda classe”.⁴⁶ Isto significa que, mesmo que nos dediquemos a otimizar e aperfeiçoar tudo o que os nossos cérebros biológicos são capazes de fazer, continuarão a ser bilhões de vezes mais lentos e muito menos capazes do que aquilo que um corpo totalmente projetado poderá alcançar.

Uma combinação entre a IA e a revolução nanotecnológica permitir-nos-á redesenhar e reconstruir — molécula por molécula — os nossos corpos e cérebros, bem como os mundos com os quais interagimos. Os neurónios humanos disparam, no máximo, cerca

de duzentas vezes por segundo (com mil como máximo teórico absoluto), e na realidade provavelmente mantêm médias inferiores a uma vez por segundo.⁴⁷ Em contraste, os transístores podem atualmente ciclar mais de um trilião de vezes por segundo, e os chips de computador disponíveis comercialmente ultrapassam os cinco mil milhões de ciclos por segundo.⁴⁸ Esta disparidade é tão grande porque o “computador celular” do nosso cérebro utiliza uma arquitetura muito mais lenta e rudimentar do que aquela que a engenharia de precisão torna possível na computação digital. E à medida que a nanotecnologia avança, o domínio digital poderá distanciar-se ainda mais.

Além disso, o tamanho do cérebro humano limita o seu poder total de processamento a, no máximo, cerca de 10^{14} operações por segundo, segundo a minha estimativa em *A Singularidade Está Próxima* — o que está dentro de uma ordem de magnitude da estimativa de Hans Moravec, baseada numa análise diferente.⁴⁹ O supercomputador norte-americano Frontier já ultrapassa as 10^{18} operações por segundo num teste de desempenho relevante para a IA.⁵⁰ Como os computadores conseguem compactar transístores de forma mais densa e eficiente do que os neurónios do cérebro, e como podem ser tanto fisicamente maiores do que o cérebro como estar interligados remotamente em rede, acabarão por deixar os cérebros biológicos não aumentados para trás. O futuro é claro: mentes baseadas apenas nos substratos orgânicos dos cérebros biológicos não conseguirão acompanhar mentes aumentadas por engenharia nanoeletrónica de precisão não biológica.

A primeira referência à nanotecnologia foi feita pelo físico Richard Feynman (1918–1988) na sua célebre palestra de 1959, intitulada “Há Muito Espaço Lá em Baixo” (There’s Plenty of Room at the Bottom), na qual descreveu a inevitabilidade da criação de máquinas à escala dos átomos individuais, bem como as profundas implicações dessa possibilidade.⁵¹ Como disse Feynman: “Os princípios da física, tanto quanto consigo ver, não se opõem à possibilidade de manipular as coisas átomo por átomo... Em princípio, seria possível... que um físico sintetizasse qualquer substância química que o químico descrevesse... Como? Coloque os átomos onde o químico indicar, e assim cria-se a substância.”⁵² Feynman era otimista: “Os problemas da química e da biologia podem ser grandemente ajudados se, eventualmente, desenvolvermos a nossa capacidade de ver o que estamos a fazer — e de o fazer — ao nível atómico, um desenvolvimento que, penso eu, não poderá ser evitado.”

Para que a nanotecnologia tenha impacto em objetos de grandes dimensões, precisa de um sistema de autorreplicação. A ideia de como criar um módulo autorreplicante foi formalizada pela primeira vez pelo lendário matemático John von Neumann (1903–1957), numa série de palestras proferidas no final da década de 1940 e num artigo publicado em 1955 na *Scientific American*.⁵³ No entanto, a totalidade das suas ideias só foi reunida e amplamente publicada em 1966, quase uma década após a sua morte. A abordagem de von Neumann era altamente abstrata e matemática, centrando-se sobretudo nos fundamentos lógicos, em vez das questões práticas e físicas do fabrico de máquinas autorreplicantes. No seu conceito, um autorreplicador inclui um “computador universal” e um

“construtor universal”. O computador executa um programa que controla o construtor, e o construtor consegue copiar tanto o autorreplicador como o programa — permitindo que as cópias façam o mesmo indefinidamente.⁵⁴

Em meados da década de 1980, o engenheiro K. Eric Drexler fundou o campo moderno da nanotecnologia, desenvolvendo este conceito de von Neumann.⁵⁵ Drexler concebeu uma máquina abstrata que utilizava átomos e fragmentos moleculares encontrados em substâncias comuns para fornecer os materiais ao seu construtor ao estilo de von Neumann, o qual incluiria um computador capaz de dirigir a colocação precisa dos átomos.⁵⁶ O “montador” (assembler) de Drexler poderia, essencialmente, fabricar qualquer coisa no mundo, desde que a estrutura fosse estavelmente possível a nível atômico. É precisamente essa flexibilidade e generalidade que distingue a abordagem da mecanossíntese molecular — que Drexler pioneiramente propôs — das abordagens baseadas na biologia, que também poderiam montar objetos à nanoescala, mas seriam muito mais limitadas em termos de design e dos materiais disponíveis.

Drexler delineou um computador muito simples, utilizando “entrelaçamentos” moleculares (molecular interlocks) em vez de portas de transístores. (Estes eram conceptuais; ele ainda não os construiu.)⁵⁷ Cada entrelaçamento exigiria apenas seis nanómetros cúbicos de espaço e poderia alternar o seu estado em um décimo de milhar de milionésimo de segundo — permitindo uma velocidade de computação viável de cerca de mil milhões de operações por segundo.⁵⁸ Muitas variações deste computador foram propostas,

com níveis crescentes de refinamento. Em 2018, Ralph Merkle e vários colaboradores conceberam um sistema de computação totalmente mecânico, adequado a implementações à escala nano.⁵⁹ O seu design detalhado (novamente conceptual) prevê cerca de 10^{20} portas lógicas por litro, operando a 100 MHz, o que resultaria em até 10^{28} operações de computação por segundo por litro de volume computacional (embora a dissipação térmica exigisse que esse volume tivesse uma elevada área de superfície).⁶⁰ A quantidade de energia consumida por este design rondaria os cem watts.⁶¹ Dado que existem cerca de oito mil milhões de pessoas no mundo, emular o processamento cerebral de todos os seres humanos juntos exigiria, assim, menos de 10^{24} operações por segundo (10^{14} por pessoa vezes 10^{10} pessoas).⁶²

Como discutido no capítulo 2, a minha estimativa de 10^{14} diz respeito à simulação de cada neurónio individual. No entanto, o cérebro emprega um paralelismo maciço. Dado que o ambiente biológico húmido dentro do nosso crânio é (pelo menos ao nível molecular) um lugar bastante turbulento, qualquer neurónio pode morrer ou simplesmente falhar ao disparar no instante correto. Se a cognição humana dependesse fortemente do desempenho de qualquer neurónio isolado, seria extremamente instável. Mas quando muitos neurónios trabalham em conjunto, em paralelo, o “ruído” é anulado — e conseguimos pensar perfeitamente.

Ao construir computadores não biológicos, no entanto, conseguimos controlar o ambiente interno com muito mais precisão. O interior de um chip de computador é muito mais limpo e estável do que o tecido cerebral, pelo que todo esse paralelismo

deixará de ser necessário. Isto permitirá uma computação mais eficiente, tornando plausível que uma mente possa ser simulada com ainda menos de 10^{14} operações por segundo. Mas, como ainda não se sabe com clareza o grau de paralelismo presente nos cérebros, utilizo esta estimativa mais elevada por precaução. Teoricamente, então, um computador nanológico perfeitamente eficiente, com apenas um litro de volume, poderia fornecer o equivalente a cerca de 10.000 vezes 10 mil milhões de seres humanos (ou cerca de 100 biliões de pessoas) em termos de capacidade cerebral. Para ser claro, não estou a afirmar que isto seja alcançável na prática. A questão é que a engenharia à escala nano oferece margens absolutamente impressionantes para o progresso futuro. Mesmo uma ínfima fração de um por cento dos valores máximos teóricos constituiria um novo paradigma revolucionário na computação — e permitiria às máquinas em escala nanométrica alcançar quantidades úteis de poder computacional.

No contexto dos nanobots autorreplicantes, isto permitiria a coordenação massiva necessária para alcançar resultados macroscópicos. O sistema de controlo seria semelhante à arquitetura de instruções computacionais conhecida como SIMD (single instruction, multiple data — uma instrução única, múltiplos dados), significando que uma única unidade computacional leria as instruções do programa e depois transmiti-las-ia, simultaneamente, a biliões de montadores em escala molecular (cada um com o seu próprio computador simples).⁶³

A utilização desta arquitetura de “difusão” (broadcast) também responderia a uma preocupação de segurança fundamental. Se o processo de autorreplicação se descontrolar, ou no caso de um erro ou de uma violação de segurança, a fonte das instruções de replicação pode ser imediatamente desligada, impedindo qualquer atividade adicional dos nanobots.⁶⁴ Como será abordado com mais detalhe no capítulo 7, o pior cenário possível da nanotecnologia seria o chamado gray goo — nanobots autorreplicantes que desencadeiam uma reação em cadeia incontrolável.⁶⁵ Em teoria, isto poderia consumir a maior parte da biomassa da Terra e convertê-la em mais nanobots. Mas a arquitetura de “difusão” defendida por Ralph Merkle constitui uma forte defesa contra isso. Se todas as instruções tiverem de vir de uma fonte central, desligar a difusão numa situação de emergência tornaria os nanobots inativos e fisicamente incapazes de continuar a autorreplicação.

A máquina de construção propriamente dita, encarregue de executar estas instruções, seria um simples robô molecular com um único braço, semelhante ao universal constructor (construtor universal) de von Neumann, construído à escala microscópica.⁶⁶ A viabilidade da construção de braços robóticos, engrenagens, rotores e motores à escala molecular já foi demonstrada repetidamente.⁶⁷

A física não permite que um braço à escala molecular mova átomos de um lado para o outro como uma mão humana o faria. Isto torna o futuro da nanotecnologia um tema controverso. Em 2001, o físico e químico norte-americano Richard Smalley iniciou um debate público com Eric Drexler sobre se a fabricação atômica precisa usando molecular assemblers (montadores

moleculares) seria ou não possível.⁶⁸ Tanto Smalley como Drexler deram contributos essenciais ao campo da nanotecnologia, mas diferiam nas suas abordagens. Drexler defendia que os métodos top-down (de cima para baixo) são o objetivo último da nanotecnologia, permitindo que máquinas fabricantes construam nanobôs a partir do zero. Smalley argumentava que as leis da física tornam isso impossível — sendo que apenas as abordagens bottom-up (de baixo para cima), ao estilo da auto-organização biológica, seriam viáveis. A objeção de Smalley assentava em dois pontos: o problema dos dedos gordos (fat fingers problem), em que os braços manipuladores necessários para posicionar os átomos de uma reação seriam demasiado volumosos para funcionarem eficazmente à escala nano; e o problema dos dedos pegajosos (sticky fingers problem), em que os átomos movidos tenderiam a aderir aos braços manipuladores.

Drexler respondeu que técnicas concebidas para utilizar apenas um braço manipulador não enfrentariam o primeiro problema, e que máquinas biológicas como as enzimas e os ribossomas já demonstram que o segundo é possível de ultrapassar. À medida que o debate se intensificava em 2003, ofereci os meus próprios comentários, posicionando-me maioritariamente do lado de Drexler.⁶⁹ Olhando para trás, quase duas décadas depois, sinto-me satisfeito por poder afirmar que os avanços recentes na nanotecnologia estão a tornar a visão top-down cada vez mais plausível — embora ainda falte pelo menos uma década para que o campo atinja a maturidade, muito provavelmente com a ajuda de avanços na Inteligência Artificial. Os cientistas já conseguiram

progressos significativos no controlo preciso de átomos, e a década de 2020 verá ainda mais descobertas decisivas.

O design de Drexler para um braço construtor à escala nanométrica continua a ser, aparentemente, o mais promissor. Em vez de uma garra de preensão complexa e pouco prática, teria uma única ponta que usaria uma função mecânica e elétrica para apanhar um átomo ou uma pequena molécula e depois libertá-la noutra localização.⁷⁰ O livro *Nanosystems*, de Drexler, publicado em 1992, apresenta várias químicas possíveis para alcançar este feito.⁷¹ Uma das abordagens consiste em movimentar átomos de carbono para construir objetos a partir de uma substância de diamante à escala nano, chamada diamondoid (diamantóide).⁷²

Os diamondoids são pequenas gaiolas de átomos de carbono (por vezes com apenas dez), dispostas como os tipos mais básicos de cristal de diamante — com átomos de hidrogénio ligados ao exterior da estrutura. Estes poderão vir a constituir os blocos de construção de estruturas nanoengenheiradas extremamente leves e resistentes. Quando Drexler explorou as ideias da nanotecnologia e da manufatura com diamantoides no seu livro *Motores da Criação* (1986) e em *Nanosistemas*, inspirou o autor de ficção científica Neal Stephenson a escrever o romance vencedor do Prémio Hugo em 1995, *The Diamond Age*, que imagina um futuro onde a nanotecnologia baseada em diamantes define a civilização — tal como o bronze definiu a Idade do Bronze e o ferro a Idade do Ferro.⁷³ Mais de um quarto de século após a publicação do romance, a investigação em diamantoides avançou imenso, e os cientistas começam a vislumbrar aplicações práticas em ambiente

laboratorial. Ao longo da próxima década, porém, a Inteligência Artificial permitirá simulações químicas detalhadas que desbloquearão progressos muito mais rápidos.

Muitos dos modelos de nanotecnologia propostos utilizam esta abordagem. Sabemos, pelo processo de deposição química de vapor (chemical vapor deposition), que diamantes artificiais podem ser criados desta forma.⁷⁴ O diamantoide não é apenas extremamente resistente, como também pode ter impurezas adicionadas de forma precisa, através de um processo conhecido como doping (dopagem), para alterar propriedades físicas como a condutividade térmica ou para criar componentes eletrônicos como transístores.⁷⁵ A investigação da última década revelou métodos promissores para a engenharia de sistemas eletrônicos e mecânicos a partir de diferentes arranjos de átomos de carbono à escala nanométrica.⁷⁶ Esta área da nanotecnologia está agora a atrair uma atenção séria em todo o mundo, mas algumas das propostas mais fascinantes provêm de Ralph Merkle e dos seus co-autores.⁷⁷ Já em 1997, Merkle concebeu um “metabolismo” para um montador que poderia construir hidrocarbonetos como os diamantoides a partir de uma solução de alimentação (feedstock solution) de butadiino.⁷⁸

Desde a publicação de *A Singularidade Está Próxima* em 2005, também se registaram avanços empolgantes no grafeno (uma rede hexagonal de carbono com apenas um átomo de espessura), nos nanotubos de carbono (basicamente tubos enrolados de grafeno) e nos nanofios de carbono (carbon nanothreads — filamentos quase unidimensionais de carbono rodeados por hidrogénio), todos com

potencial para uma vasta gama de aplicações práticas nas próximas duas décadas.⁷⁹

Actualmente, estão a ser explorados muitos caminhos em direção a este tipo de mecanossíntese (mechanosynthesis) e a outras formas de nanotecnologia.⁸⁰ Entre eles encontram-se a técnica de origami de ADN (DNA origami)⁸¹, a nanorrobótica baseada em ADN (DNA nanorobotics)⁸², as máquinas moleculares bio-inspiradas⁸³, o Lego molecular (molecular Lego)⁸⁴, os qubits de átomo único para computação quântica⁸⁵, a colocação de átomos com recurso a feixes de eletrões (electron beam-based atom placement)⁸⁶, a litografia por despassivação do hidrogénio (hydrogen depassivation lithography)⁸⁷, e a fabricação com microscópios de varrimento por efeito de túnel (scanning tunneling microscope-based manufacturing).⁸⁸ Existem vários projetos discretos nestas áreas que têm feito progressos constantes e — considerando que, até ao final da década de 2020, haverá Inteligência Artificial com capacidades de engenharia superiores às humanas — estamos no caminho certo para que conceitos de nanotecnologia com colocação de átomos um a um venham a ser implementados em algum momento da década de 2030.

Na prática, isto implicará a transmissão de informação a materiais “inertes” (ou seja, não programados) através de um processo exponencial. Um computador central enviaria comandos simultaneamente para um pequeno núcleo inicial de nanobots, colocados no meio da solução de alimentação (feedstock) de átomos ou moléculas básicas de que necessitam. Seriam então instruídos a autorreplicar-se, criando iterativamente uma cascata

de cópias de si mesmos, atingindo rapidamente os triliões de montadores. Depois, o computador enviaria a esses robôs moleculares comandos sobre como construir as estruturas desejadas.

Na sua forma mais madura, um montador molecular (molecular assembler) poderá ser uma unidade do tamanho de uma mesa, capaz de fabricar virtualmente qualquer produto físico, desde que disponha dos átomos necessários. Isto exigirá dominar um dos grandes desafios da manufatura à escala nanométrica: a generalização (generalizability). Uma coisa é conceber um montador capaz de criar um tipo específico de substância (como o diamantoide), outra bem diferente é criar um que domine uma diversidade vasta de químicas. Desbloquear essa capacidade exigirá Inteligência Artificial extremamente avançada. Assim, podemos esperar ver objetos relativamente homogêneos do ponto de vista químico (como gemas, mobiliário ou vestuário) a serem produzidos por montadores muito antes de objetos com composições químicas altamente variadas e microestruturas complexas (como uma refeição cozinhada, um órgão biônico ou um computador mais poderoso do que todos os cérebros humanos não aprimorados juntos).

Assim que dominarmos a nanofabricação avançada, o custo incremental de produzir qualquer objeto físico (incluindo os próprios montadores moleculares) será de apenas alguns centavos por libra — essencialmente apenas o custo dos materiais atômicos precursores.⁸⁹ As estimativas de Drexler, de 2013, para o custo total de um processo de fabrico molecular situam-se em torno dos

2 dólares por quilograma, independentemente do que estiver a ser produzido, seja diamantes ou comida.⁹⁰ E, como os materiais nanoengenheirados podem ser muito mais resistentes do que o aço ou o plástico, a maioria das estruturas poderia ser construída com cerca de um décimo da massa. Mesmo quando as matérias-primas utilizadas nos produtos acabados são dispendiosas — por exemplo, ouro, cobre e metais raros em dispositivos eletrónicos — será frequentemente possível, no futuro, substituir esses componentes por outros construídos a partir de elementos mais baratos e abundantes, como o carbono.

O verdadeiro valor dos produtos, então, residirá na informação que contêm — em essência, toda a inovação que lhes deu origem, desde ideias criativas até às linhas de código de software que controlam a sua produção. Isto já aconteceu com bens que podem ser digitalizados. Pensemos nos livros eletrónicos. Quando os livros foram inventados, tinham de ser copiados à mão, pelo que o trabalho manual era uma componente maciça do seu valor. Com o advento da imprensa, os materiais físicos como o papel, a encadernação e a tinta passaram a representar a maior parte do custo. Mas, com os livros eletrónicos, os custos de energia e computação para copiar, armazenar e transmitir um livro são, praticamente, nulos. O que se paga é a montagem criativa da informação em algo que vale a pena ler (e, por vezes, alguns fatores adicionais, como o marketing). Uma forma simples de perceber esta diferença é navegar pela Amazon à procura de diários em branco e depois comparar com romances em capa dura com encadernações semelhantes. Se observar apenas os preços, dificilmente conseguirá distinguir de imediato qual é qual. Por outro lado, os romances em

formato e-book são geralmente vendidos por vários dólares, enquanto a ideia de pagar qualquer quantia por um e-book em branco parece ridícula. É precisamente isto que significa dizer que o valor de um produto é puramente informação.

A revolução nanotecnológica trará esta mudança transformadora para o mundo físico. Em 2023, o valor dos produtos físicos provém de várias fontes, especialmente das matérias-primas, do trabalho de fabrico, do tempo de utilização das máquinas nas fábricas, dos custos energéticos e do transporte. Mas as inovações convergentes irão reduzir drasticamente a maioria destes custos nas próximas décadas. As matérias-primas tornar-se-ão mais baratas de extrair ou sintetizar através da automação, a robótica substituirá o trabalho humano dispendioso, as máquinas industriais caras tornar-se-ão, elas próprias, mais acessíveis, os preços da energia cairão graças a melhores tecnologias fotovoltaicas e de armazenamento de energia (e, eventualmente, à fusão nuclear), e os veículos elétricos autónomos reduzirão os custos de transporte. À medida que todos estes componentes de valor se tornarem menos dispendiosos, o valor proporcional da informação contida nos produtos aumentará. Na verdade, já estamos a caminhar nessa direção, pois o “conteúdo informacional” da maioria dos produtos está a aumentar rapidamente — e acabará por representar quase 100% do seu valor.

Em muitos casos, isto tornará os produtos baratos ao ponto de poderem ser gratuitos para os consumidores. Mais uma vez, podemos observar a economia digital para ver como isto já se concretizou. Como discutido no capítulo 5, plataformas como o

Google e o Facebook investem milhares de milhões de dólares nas suas infraestruturas, mas o custo médio por pesquisa ou por “Like” é tão baixo que faz mais sentido oferecer esses serviços gratuitamente aos utilizadores — financiando-se, por exemplo, através de publicidade. De forma análoga, é possível imaginar um futuro em que as pessoas assistam a anúncios políticos ou partilhem dados pessoais em troca de produtos nano-fabricados gratuitos. Os governos também poderão oferecer tais produtos como incentivos à participação em serviços voluntários, à educação contínua ou à manutenção de hábitos saudáveis.

Esta redução dramática da escassez física permitirá finalmente suprir com facilidade as necessidades básicas de toda a população. Importa notar que esta é uma previsão sobre as capacidades tecnológicas, mas será a cultura e a política a determinar quão rapidamente a economia se transformará. Garantir que estes benefícios sejam ampla e justamente distribuídos será um verdadeiro desafio. Dito isto, sou optimista. A ideia de que as elites ricas simplesmente acumularão esta nova abundância assenta numa má compreensão da realidade. Quando os bens são verdadeiramente abundantes, acumulá-los é inútil. Ninguém armazena ar para si próprio, porque é fácil de obter e há o suficiente para todos. Da mesma forma, quando outras pessoas usam a Wikipedia, isso não torna a informação menos disponível para si.

Embora a nanotecnologia permita aliviar muitos tipos de escassez física, a escassez económica é também parcialmente determinada pela cultura — especialmente no que toca a bens de luxo. Por exemplo, a olho nu, os diamantes artificiais já são

indistinguíveis dos naturais, mas vendem-se por cerca de 30 a 40 por cento menos.⁹¹ Este diferencial de preço nada tem a ver com a beleza ornamental dos diamantes, mas sim com as nossas convenções culturais, que atribuem maior valor a diamantes que se formaram naturalmente. Do mesmo modo, quadros dos grandes mestres da pintura não embelezam necessariamente uma sala melhor do que reproduções de alta qualidade, mas como as pessoas valorizam o seu estatuto de originais, essas obras podem ser vendidas por até um milhão de vezes mais.⁹² Assim, a revolução da nanotecnologia não eliminará toda a escassez económica. Diamantes históricos e Rembrandts continuarão a ser escassos. Contudo, ao longo de gerações, os valores culturais podem mudar. Quem poderá afirmar se as pessoas que hoje são crianças escolherão valores diferentes quando forem adultas? Ou se os filhos deles o farão?

3. Aplicando a Nanotecnologia à Saúde e Longevidade

Como discuti no meu livro sobre extensão da vida, *Transcender*,⁹³ estamos agora nos estágios finais da primeira geração de prolongamento da vida, que consiste na aplicação do conhecimento atual em farmacologia e nutrição para superar desafios de saúde. Este tem sido um processo em constante evolução, que incorpora continuamente novas ideias, e é a base do regime de saúde que tenho seguido nas últimas décadas.

Nos anos 2020, estamos a iniciar a segunda fase da extensão da vida, que é a fusão da biotecnologia com a inteligência artificial (IA). Esta fase implicará o desenvolvimento e a experimentação de

tratamentos inovadores em simuladores digitais de biologia. Os primeiros passos já começaram a ser dados, e com estas técnicas seremos capazes de descobrir novas terapias altamente eficazes em dias, em vez de anos.

A década de 2030 marcará o início da terceira fase da extensão da vida, que consistirá em usar a nanotecnologia para ultrapassar as limitações dos nossos órgãos biológicos. Ao entrarmos nesta fase, prolongaremos significativamente a nossa longevidade, permitindo às pessoas transcender largamente o limite humano habitual de 120 anos.⁹⁴

Apenas uma pessoa — Jeanne Calment, uma francesa que viveu até aos 122 anos — está documentada como tendo ultrapassado esse limite dos 120 anos.⁹⁵ Mas por que razão esse valor parece ser um limite tão rígido para a longevidade humana? Poder-se-ia supor que a razão pela qual as pessoas não vivem para além dessa idade é estatística — que os idosos enfrentam anualmente um certo risco de Alzheimer, AVC, ataque cardíaco ou cancro, e que, após um número suficiente de anos expostos a esses riscos, acabam inevitavelmente por morrer de alguma coisa. Mas não é isso que os dados mostram. Os dados atuariais* indicam que, dos 90 aos 110 anos, a probabilidade de uma pessoa morrer no ano seguinte aumenta em cerca de 2 pontos percentuais por ano.⁹⁶ Por exemplo, um homem americano de 97 anos tem cerca de 30% de

* Dados atuariais — são dados provenientes da ciência atuarial; dizem respeito à probabilidade de morte, risco, longevidade, etc. Portanto, dados atuariais significa, neste contexto, dados estatísticos que mostram como varia a probabilidade de morte com a idade — ou seja, dados técnicos sobre longevidade humana.

probabilidade de morrer antes de fazer 98, e se atingir essa idade, terá 32% de probabilidade de morrer antes dos 99. Mas, a partir dos 110 anos, o risco de morte passa a aumentar cerca de 3,5 pontos percentuais por ano.

Os médicos têm oferecido uma explicação: por volta dos 110 anos, os corpos das pessoas mais velhas começam a degradar-se de formas qualitativamente diferentes do envelhecimento dos idosos mais jovens.⁹⁷ O envelhecimento dos supercentenários (com mais de 110 anos) não é simplesmente uma continuação ou agravamento dos mesmos tipos de riscos estatísticos associados à velhice. Embora, nessa idade, as pessoas continuem a enfrentar riscos anuais provenientes de doenças comuns (sendo que o agravamento desses riscos pode até abrandar nos mais velhos), surgem também novos desafios como falência renal e falência respiratória. Estes parecem muitas vezes ocorrer de forma espontânea — não como resultado de fatores de estilo de vida ou do aparecimento de alguma doença. O corpo, aparentemente, começa simplesmente a colapsar.

Na última década, cientistas e investidores têm dado uma atenção muito mais séria a tentar descobrir porquê. Um dos principais investigadores nesta área é o biogerontologista Aubrey de Grey, fundador da fundação LEV (Longevity Escape Velocity).⁹⁸ Segundo de Grey, o envelhecimento é semelhante ao desgaste de um motor automóvel — trata-se de danos que se acumulam como resultado do funcionamento normal do sistema. No caso do corpo humano, esses danos provêm, em grande parte, de uma combinação entre o metabolismo celular (uso de energia para

manter a vida) e a reprodução celular (mecanismos de autorreplicação). O metabolismo gera resíduos dentro e à volta das células e danifica estruturas através da oxidação (muito parecido com o enferrujamento de um carro!).

Quando somos jovens, os nossos corpos conseguem remover esses resíduos e reparar os danos de forma eficiente. Mas, à medida que envelhecemos, a maioria das nossas células reproduz-se vezes sem conta, acumulando erros. Eventualmente, os danos começam a acumular-se mais depressa do que o corpo consegue reparar.

Num indivíduo com setenta, oitenta ou noventa anos, esse dano acabará por provocar um problema fatal, muito antes de causar vários problemas fatais ao mesmo tempo. Assim, se a ciência desenvolver um medicamento capaz de tratar com sucesso um cancro potencialmente fatal num octogenário, essa pessoa poderá esperar viver mais uma década antes que outro problema surja. Mas chega um momento em que tudo começa a falhar ao mesmo tempo, e já não é eficaz tratar apenas os sintomas dos danos causados pelo envelhecimento. Em vez disso, defendem os investigadores da longevidade, a única solução viável é curar o próprio envelhecimento. A fundação SENS (Strategies for Engineered Negligible Senescence) propôs uma agenda de investigação detalhada para alcançar esse objetivo (embora seja certo que levará décadas a concretizar-se totalmente).⁹⁹

Em suma, precisamos da capacidade de reparar os danos do envelhecimento ao nível das células individuais e dos tecidos locais. Estão a ser exploradas várias possibilidades para alcançar este

objetivo, mas acredito que a solução final mais promissora reside em nanorrobôs capazes de entrar no corpo e efetuar diretamente esses reparos. Isto não tornaria as pessoas imortais — continuariam sujeitas a acidentes e imprevistos — mas o risco anual de morte deixaria de aumentar com a idade, permitindo que muitas pessoas ultrapassassem os 120 anos em boa saúde.

E não é necessário esperar que estas tecnologias estejam totalmente maduras para delas beneficiar. Se conseguir viver o tempo suficiente para que a investigação sobre o envelhecimento comece a acrescentar pelo menos um ano à sua esperança de vida por cada ano que passa, isso comprará tempo suficiente para que a nanomedicina consiga curar os restantes aspetos do envelhecimento. É este o conceito de velocidade de escape da longevidade (longevity escape velocity).¹⁰⁰ Por isso é que há uma lógica sólida por detrás da declaração ousada de Aubrey de Grey: a primeira pessoa a viver mil anos já nasceu. Se a nanotecnologia de 2050 resolver uma quantidade suficiente de problemas associados ao envelhecimento, os centenários poderão começar a viver até aos 150 anos, e teremos então até ao ano 2100 para resolver os problemas que surjam nessa nova etapa. Com a Inteligência Artificial a desempenhar um papel central na investigação científica até lá, o progresso será exponencial. Portanto, mesmo que estas previsões sejam, à partida, surpreendentes — ou até pareçam absurdas ao nosso modo de pensar linear e intuitivo — temos razões fundamentadas para as considerar um futuro provável.

Ao longo dos anos, participei em muitas conversas sobre a extensão da vida, e essa ideia costuma gerar resistência. As

peessoas revoltam-se quando ouvem falar de alguém cuja vida foi interrompida por uma doença. No entanto, quando confrontadas com a possibilidade de estender a vida humana em geral, reagem negativamente. Uma resposta comum é: “A vida já é demasiado difícil para se contemplar que continue indefinidamente.” Mas, na verdade, as pessoas geralmente não querem pôr fim à sua vida em momento algum, a menos que estejam a sofrer uma dor imensa — física, mental ou espiritual. E se tivessem acesso às melhorias contínuas da vida em todas as suas dimensões — conforme detalhado no capítulo 4 — muitas dessas aflições seriam aliviadas. Ou seja, prolongar a vida humana significaria também *melhorá-la* de forma substancial.

Para imaginar como a extensão da vida pode melhorar a qualidade de vida, é útil recuar cem anos. Em 1924, a esperança média de vida nos Estados Unidos rondava os 58,5 anos, o que significa que os bebés nascidos nesse ano eram, estatisticamente, esperados para morrer em 1982.¹⁰¹ No entanto, a medicina registou tantas melhorias nesse intervalo que muitos desses indivíduos acabaram por viver até aos anos 2000 ou mesmo 2010. Graças a essa extensão da vida, puderam usufruir da reforma numa época com viagens aéreas acessíveis, automóveis mais seguros, televisão por cabo e internet. Para os bebés nascidos em 2024, os avanços tecnológicos durante os anos que se vierem a acrescentar às suas vidas serão exponencialmente mais rápidos do que os do século anterior. Para além destas vantagens materiais impressionantes, poderão também beneficiar de uma cultura mais rica — toda a arte, música, literatura, televisão e jogos digitais que a humanidade vier a criar durante esses anos adicionais. Mas talvez o mais importante:

terão mais tempo para estar com a família e os amigos, para amar e ser amados. E é precisamente isso, na minha visão, que dá à vida o seu maior significado.

Mas como tornará a nanotecnologia tudo isto possível, na prática? A meu ver, o objetivo a longo prazo é o desenvolvimento de nanorrobôs médicos. Estes serão constituídos por peças do tipo diamantoide, equipados com sensores integrados, manipuladores, computadores, sistemas de comunicação e, possivelmente, fontes de energia.¹⁰² É intuitivo imaginar nanobôs como pequenos submarinos metálicos robóticos a navegar pela corrente sanguínea, mas a física à escala nanométrica exige uma abordagem substancialmente diferente. Nesta escala, a água é um solvente poderoso, e as moléculas oxidantes são altamente reativas, pelo que serão necessários materiais muito resistentes, como os diamantoides.

Além disso, enquanto os submarinos em grande escala se podem propulsionar suavemente através de líquidos, os objetos em nanoescala enfrentam uma dinâmica de fluidos dominada por forças de fricção aderente.¹⁰³ É como tentar nadar num frasco de manteiga de amendoim! Por isso, os nanobôs terão de usar princípios de propulsão completamente diferentes. Do mesmo modo, é improvável que os nanobôs consigam armazenar energia suficiente a bordo ou dispor de capacidade computacional autónoma para realizarem todas as suas funções de forma independente. Assim, terão de ser concebidos para extrair energia do meio envolvente e para obedecer a sinais de controlo externo ou colaborar entre si para realizar tarefas computacionais.

Para manter os nossos corpos e contrariar problemas de saúde, todos iremos necessitar de um número vastíssimo de nanobôs, cada um com aproximadamente o tamanho de uma célula. As melhores estimativas disponíveis indicam que o corpo humano é composto por dezenas de bilhões de células biológicas.¹⁰⁴ Se nos aumentarmos com apenas um nanobô por cada cem células, isso equivaleria a várias centenas de milhar de milhões de nanobôs. Contudo, a proporção ideal ainda está por determinar. Pode muito bem acontecer, por exemplo, que nanobôs avançados sejam eficazes mesmo com uma razão célula-nanobô várias ordens de magnitude superior.

Um dos principais efeitos do envelhecimento é a degradação do desempenho dos órgãos, pelo que uma das funções-chave destes nanobôs será reparar e potenciar o funcionamento orgânico. Para além da expansão do nosso neocórtex — como já referido no capítulo 2 — isso envolverá principalmente o auxílio aos órgãos não sensoriais, permitindo-lhes introduzir eficientemente substâncias no sistema sanguíneo (ou linfático), ou removê-las.¹⁰⁵

Por exemplo:

- Os pulmões introduzem oxigénio e removem dióxido de carbono.¹⁰⁶
- O fígado e os rins eliminam toxinas.¹⁰⁷

- Todo o trato digestivo introduz nutrientes na corrente sanguínea.¹⁰⁸
- Órgãos como o pâncreas produzem hormonas que regulam o metabolismo.¹⁰⁹

Alterações nos níveis hormonais podem resultar em doenças como a diabetes. (Já existem dispositivos¹¹⁰ capazes de medir os níveis de insulina no sangue e transferir insulina para a corrente sanguínea, imitando a função de um pâncreas real¹¹¹.) Ao monitorizar a presença destas substâncias vitais, ajustar os seus níveis conforme necessário, e manter a integridade estrutural dos órgãos, os nanobôs poderão preservar a saúde do corpo humano indefinidamente. Em última instância, poderão até substituir completamente os órgãos biológicos, caso tal seja necessário — ou desejado.

Mas os nanobôs não se limitarão a preservar a função normal do corpo. Também poderão ser usados para ajustar as concentrações de várias substâncias no sangue para níveis mais ótimos do que os que o corpo atinge naturalmente. Por exemplo:

- As hormonas poderão ser calibradas para nos dar mais energia e foco.
- Poderão acelerar os processos naturais de cura e regeneração do corpo.

Se a otimização hormonal permitir tornar o sono mais eficiente¹¹², isso representaria, na prática, uma forma de “extensão de vida pela porta dos fundos”. Se passássemos, por exemplo, de precisar de oito horas de sono por noite para apenas sete, isso equivaleria, em termos de tempo acordado, a adicionar cinco anos de vida ativa à média de vida de uma pessoa!

Eventualmente, o uso de nanobôs para a manutenção e otimização do corpo deverá impedir que doenças graves sequer cheguem a manifestar-se. Naturalmente, haverá provavelmente um período de transição durante o qual os nanobôs estarão disponíveis, mas ainda não utilizados por todos com essa finalidade. Assim, condições como o cancro continuarão a necessitar de tratamento mesmo após o diagnóstico ter sido feito.

Parte da razão pela qual o cancro pode ser tão difícil de eliminar deve-se ao facto de cada célula cancerígena ter a capacidade de se autorreplicar — o que significa que cada célula individual tem de ser eliminada.¹¹³ Embora o sistema imunitário consiga, muitas vezes, controlar as fases mais iniciais da divisão celular cancerosa, uma vez que um tumor se estabelece, pode desenvolver resistência às células do sistema imunitário. Nesse ponto, mesmo que um tratamento destrua a maior parte das células cancerígenas, as sobreviventes podem dar origem a novos tumores. Uma subpopulação conhecida como células estaminais cancerígenas é especialmente propensa a constituir essas sobreviventes perigosas.¹¹⁴

Embora a medicina oncológica tenha dado avanços extraordinários na última década, e vá alcançar ainda maiores progressos com a ajuda da IA nesta nova década, continuamos a utilizar ferramentas relativamente rudimentares no tratamento do cancro. A quimioterapia falha frequentemente na erradicação total do cancro e causa danos colaterais graves a outras células saudáveis espalhadas por todo o corpo.¹¹⁵ Isto não só resulta em efeitos secundários devastadores para muitos doentes oncológicos, como enfraquece o sistema imunitário e aumenta a vulnerabilidade a outros riscos de saúde. Mesmo as imunoterapias mais avançadas e os fármacos dirigidos ficam bastante aquém da eficácia e precisão totais.¹¹⁶ Por contraste, os nanobôs médicos serão capazes de examinar célula a célula e determinar se cada uma é cancerígena ou não, podendo então destruir todas as células malignas. Vale a pena recordar aqui a analogia do mecânico de automóveis, apresentada no início deste capítulo: assim que os nanobôs forem capazes de reparar ou destruir seletivamente células individuais, teremos total domínio sobre a nossa biologia — e a medicina tornar-se-á, finalmente, a ciência exata que sempre aspirou ser.

Alcançar este nível de controlo também implicará dominar por completo os nossos genes. No seu estado natural, as células reproduzem-se copiando o ADN presente em cada núcleo.¹¹⁷ Se houver um problema na sequência de ADN num determinado grupo de células, não há forma de o resolver sem atualizar o código genético em cada célula individual.¹¹⁸ Este comportamento representa uma vantagem nos organismos biológicos não aprimorados, pois mutações aleatórias em células individuais raramente causam danos fatais ao organismo inteiro. Se qualquer

mutação numa célula fosse instantaneamente replicada por todas as outras, a sobrevivência tornar-se-ia inviável. Mas esta robustez descentralizada da biologia constitui um grande desafio para uma espécie como a nossa, que já consegue editar o ADN de células individuais com relativa eficácia, mas ainda não domina a nanotecnologia necessária para editar o ADN de forma eficaz em todo o corpo.

Se, em vez disso, o código de ADN de cada célula fosse controlado por um servidor central (como acontece em muitos sistemas eletrónicos), então poderíamos atualizar o código genético simplesmente uma única vez, a partir desse “servidor central”. Para isso, cada núcleo celular seria aumentado com um equivalente nanoengenheirado — um sistema capaz de receber o código genético desse servidor central e produzir, a partir daí, uma sequência de aminoácidos.¹¹⁹ Uso aqui o termo “servidor central” como uma metáfora simplificada de uma arquitetura de transmissão mais centralizada, mas isto não implica necessariamente que cada nanobô receba instruções diretas de um único computador físico. Os desafios físicos da engenharia à escala nano poderão exigir, no final, que um sistema de transmissão mais localizado seja preferível. Contudo, mesmo que existam centenas ou milhares de unidades de controlo à microescala (em vez de nanoescala) espalhadas pelo corpo — grandes o suficiente para permitir comunicações mais complexas com um computador de controlo geral — isso representaria um grau de centralização várias ordens de magnitude superior ao estado atual, no qual dezenas de biliões de células funcionam de forma independente.

Outras partes do sistema de síntese de proteínas, como os ribossomas, também poderiam ser aumentadas da mesma forma. Com esta tecnologia, poderíamos simplesmente desativar o ADN defeituoso, quer ele esteja na origem de cancros ou de doenças genéticas. O nanocomputador encarregado deste processo também executaria os algoritmos biológicos responsáveis pela epigenética — ou seja, pela forma como os genes são expressos e ativados.¹²⁰ Nos inícios da década de 2020, ainda havia muito por aprender sobre expressão génica, mas a inteligência artificial permitir-nos-á simular esses processos com o detalhe necessário, e quando a nanotecnologia atingir a maturidade, os nanobôs conseguirão regulá-los com precisão. Com esta tecnologia, também seremos capazes de prevenir e reverter a acumulação de erros de transcrição do ADN — uma das principais causas do envelhecimento.¹²¹

Os nanobôs também serão úteis para neutralizar ameaças urgentes ao corpo — destruindo bactérias e vírus, interrompendo reações autoimunes ou desobstruindo artérias entupidas. Com efeito, pesquisas recentes das universidades de Stanford e Michigan State já criaram uma nanopartícula capaz de localizar os monócitos e macrófagos que causam placas ateroscleróticas e eliminar essas células.¹²² Os nanobôs inteligentes serão infinitamente mais eficazes. Inicialmente, estes tratamentos serão iniciados por humanos, mas acabarão por ser executados de forma autónoma; os nanobôs realizarão tarefas por iniciativa própria e comunicarão as suas atividades (através de uma interface controlada por IA) aos humanos que os monitorizam.

À medida que a inteligência artificial adquira uma compreensão mais profunda da biologia humana, será possível enviar nanobôs para resolver problemas ao nível celular muito antes de estes se tornarem detetáveis pelos métodos médicos atuais. Em muitos casos, isso permitirá prevenir condições que, em 2023, ainda permanecem inexplicadas. Por exemplo, cerca de 25% dos acidentes vasculares cerebrais isquémicos são “criptogénicos” — não têm uma causa detetável.¹²³ Mas sabemos que acontecem por algum motivo. Nanobôs a patrulhar a corrente sanguínea poderiam detetar pequenas placas ou defeitos estruturais com risco de gerar coágulos causadores de AVC, dissolver coágulos em formação, ou ativar um alerta caso um AVC esteja a ocorrer de forma silenciosa.

Tal como na otimização hormonal, os nanomateriais permitir-nos-ão não apenas restaurar a função normal do corpo, mas ampliá-la para além dos limites da nossa biologia. Os sistemas biológicos são limitados em força e velocidade porque são construídos a partir de proteínas. Embora estas proteínas sejam tridimensionais, têm de ser dobradas a partir de uma cadeia unidimensional de aminoácidos.¹²⁴ Os nanomateriais engenheirados não sofrerão esta limitação. Nanobôs construídos com engrenagens e rotores diamantoides seriam milhares de vezes mais rápidos e mais fortes do que os materiais biológicos, e seriam concebidos de raiz para funcionar de forma ótima.¹²⁵

Graças a estas vantagens, até o nosso sangue poderá ser substituído por nanobôs. Um projeto concebido por Robert A. Freitas, cofundador e copresidente da área de nanotecnologia na Singularity University, chamado respirócito, é uma célula sanguínea

artificial.¹²⁶ De acordo com os cálculos de Freitas, uma pessoa com respirócitos na corrente sanguínea poderia sustentar a respiração durante cerca de quatro horas.¹²⁷ Para além de glóbulos vermelhos artificiais, seremos também capazes de engenheirar pulmões artificiais, que oxigenarão o sangue de forma mais eficiente do que o sistema respiratório biológico. E, em última análise, até corações feitos de nanomateriais tornarão as pessoas imunes a ataques cardíacos, e a paragem cardíaca provocada por trauma tornar-se-á muitíssimo mais rara.

Os nanobôs também permitirão que as pessoas modifiquem a sua aparência estética como nunca antes. Já é possível personalizar livremente avatares em ambientes digitais, como salas de conversação e jogos de interpretação online. Muitas vezes, as pessoas usam essa possibilidade como uma forma de expressar criatividade e personalidade. Para além das opções de aparência e de estilo pessoal, os utilizadores podem encarnar personagens virtuais de idade, género e até espécie, diferentes das suas. Resta saber como esta tendência se manifestará na vida real quando a nanotecnologia permitir às pessoas personalizar radicalmente os seus corpos físicos. Será tão comum fazer alterações estéticas radicais na realidade como hoje acontece nos jogos? Ou forças psicológicas e culturais tornarão as pessoas mais conservadoras em relação a essas escolhas?

Contudo, o papel mais importante da nanotecnologia no corpo humano será o de aumentar as capacidades do cérebro — o qual, eventualmente, passará a ser mais de 99,9% não biológico. Há dois caminhos distintos pelos quais isto acontecerá:

1. A introdução gradual de nanobôs no tecido cerebral. Estes poderão reparar danos ou substituir neurónios que deixaram de funcionar.
2. A ligação do cérebro a computadores, o que nos permitirá tanto controlar máquinas diretamente com o pensamento, como integrar camadas digitais de neocórtex armazenadas na nuvem.

Como é descrito com mais detalhe no capítulo 2, isto irá muito além de uma simples melhoria da memória ou do pensamento mais rápido. Um neocórtex virtual mais profundo dar-nos-á a capacidade de pensar pensamentos mais complexos e abstratos do que conseguimos atualmente compreender. Um exemplo, ainda que vago, seria visualizar e raciocinar de forma clara e intuitiva sobre formas com dez dimensões. Este tipo de capacidade será possível em diversos domínios da cognição.

Para termos uma comparação: o córtex cerebral (composto principalmente pelo neocórtex) contém em média 16 mil milhões de neurónios num volume de cerca de meio litro.¹²⁸ Já o projeto de Ralph Merkle para um sistema de computação mecânica à escala nano, descrito anteriormente neste capítulo, poderia teoricamente albergar mais de 80 quintiliões de portas lógicas no mesmo espaço. E a vantagem de velocidade seria gigantesca: a velocidade de disparo eletroquímico dos neurónios mamíferos situa-se provavelmente, em média, na ordem de uma vez por segundo, ao passo que a computação nanoengenheirada poderá operar entre 100 milhões e mil milhões de ciclos por segundo.¹²⁹ Mesmo que

apenas uma fração minúscula destes valores seja alcançável na prática, é evidente que esta tecnologia permitirá que as partes digitais do nosso cérebro (armazenadas em substratos computacionais não biológicos) superem largamente, em número e desempenho, as partes biológicas.

Recordemos a minha estimativa de que o cérebro humano, ao nível dos neurónios, realiza cerca de 10^{14} computações por segundo. Em 2023, mil dólares de capacidade computacional já permitiam realizar até 130 biliões de computações por segundo.¹³⁰ Com base na tendência observada entre 2000 e 2023, por volta de 2053, mil dólares (a preços de 2023) permitirão realizar cerca de 7 milhões de vezes mais computações por segundo do que um cérebro humano não aumentado.¹³¹ Se se confirmar, como suspeito, que apenas uma fração dos neurónios do cérebro é necessária para digitalizar a mente consciente (por exemplo, se não for necessário simular as ações de muitas células responsáveis por controlar os outros órgãos do corpo), esse ponto poderá ser atingido vários anos antes. E mesmo que, afinal, digitalizar a mente consciente exija simular cada proteína de cada neurónio (o que considero pouco provável), poderá demorar apenas algumas décadas adicionais até que essa capacidade se torne acessível — mas ainda assim será algo que ocorrerá dentro do tempo de vida de muitas pessoas vivas atualmente. Ou seja, como este futuro assenta em tendências exponenciais fundamentais, mesmo que alteremos significativamente as nossas suposições sobre a facilidade com que poderemos digitalizar a nós próprios de forma acessível, isso não mudará drasticamente a data em que esse marco será alcançado.

Nas décadas de 2040 e 2050, reconstruiremos os nossos corpos e cérebros de forma a ultrapassar amplamente as capacidades que a biologia nos oferece — incluindo sistemas de backup e sobrevivência. À medida que a nanotecnologia for evoluindo, poderemos produzir um corpo otimizado à vontade: correremos muito mais depressa e durante mais tempo, nadaremos e respiraremos debaixo de água como os peixes, e até poderemos dar a nós próprios asas funcionais, se assim o desejarmos. Pensaremos milhões de vezes mais depressa, mas mais importante ainda: já não dependeremos da sobrevivência de nenhum dos nossos corpos para que o nosso “eu” sobreviva.

CAPÍTULO 7

Perigos

“Os ambientalistas devem agora encarar de frente a ideia de um mundo que tenha riqueza e capacidade tecnológica suficientes, e não devem procurar mais.”¹

BILL MCKIBBEN, ENVIRONMENTALIST AND AUTHOR ON GLOBAL WARMING

“Simplesmente acho que a fuga e o seu ódio pela tecnologia são autodestrutivos. O Buda, a Divindade, reside tão confortavelmente nos circuitos de um computador digital ou nas engrenagens de uma transmissão de bicicleta como no topo de uma montanha ou nas pétalas de uma flor. Pensar de outra forma é rebaixar o Buda — o que é rebaixar-se a si próprio.”²

ROBERT M. PIRSIG, ZEN AND THE ART OF MOTORCYCLE MAINTENANCE

1. Promessa e Perigo

Até agora, este livro explorou as múltiplas formas como os anos finais até à Singularidade trarão uma prosperidade humana em acelerado crescimento. Mas, assim como este progresso melhorará a vida de milhares de milhões de pessoas, também intensificará os perigos para a nossa espécie. Novas e desestabilizadoras armas nucleares, avanços na biologia sintética e nanotecnologias emergentes introduzirão ameaças com as quais teremos de lidar. E à medida que a Inteligência Artificial alcançar — e eventualmente ultrapassar — as capacidades humanas, será necessário alinhá-la cuidadosamente com propósitos benéficos, sendo especificamente concebida para evitar acidentes e impedir abusos. Há boas razões para acreditar que a nossa civilização superará estes perigos — não

porque as ameaças não sejam reais, mas precisamente porque os riscos são tão elevados. O perigo não só desperta o melhor da engenhosidade humana, como os mesmos campos tecnológicos que geram essas ameaças estão também a criar poderosas novas ferramentas para nos protegermos delas.

2. Armas Nucleares

A primeira vez que a humanidade criou uma tecnologia capaz de aniquilar a civilização foi aquando do nascimento da minha geração. Lembro-me de que, na escola primária, tínhamos de nos esconder debaixo das carteiras durante os exercícios de defesa civil e colocar os braços atrás da cabeça para nos protegermos de uma explosão termonuclear. Sobrevivemos intactos, por isso esse procedimento de segurança deve ter funcionado.

Atualmente, a humanidade possui cerca de 12.700 ogivas nucleares, das quais aproximadamente 9.440 estão ativas e podem ser utilizadas numa guerra nuclear.³ Os Estados Unidos e a Rússia mantêm cada um cerca de 1.000 ogivas de grande potência prontas para serem lançadas com menos de trinta minutos de aviso prévio.⁴ Um grande conflito nuclear poderia matar rapidamente várias centenas de milhões de pessoas pelos efeitos diretos das armas.⁵ Mas isso não inclui os efeitos secundários, que poderiam matar milhares de milhões.

Dado que a população mundial está tão espalhada, mesmo um ataque nuclear total não conseguiria eliminar toda a humanidade

através das explosões iniciais.⁶ No entanto, a chuva radioativa (fallout) poderia espalhar materiais radioativos por vastas áreas do globo, e os incêndios provocados pelas cidades em chamas lançariam quantidades gigantescas de fuligem para a atmosfera, provocando um arrefecimento global severo e fome em massa. Combinado com uma disrupção catastrófica de tecnologias como a medicina e o saneamento, isso faria com que o número total de mortes excedesse largamente as baixas iniciais. Os arsenais nucleares futuros poderão incluir ogivas “enriquecidas” com cobalto ou outros elementos, capazes de agravar horivelmente a radioatividade residual e prolongada. Em 2008, Anders Sandberg e Nick Bostrom inquiriram especialistas durante a Conferência de Riscos Catastróficos Globais do Future of Humanity Institute, da Universidade de Oxford.

As respostas medianas dos peritos estimaram:

- 30% de probabilidade de pelo menos um milhão de mortos em guerras nucleares antes do ano 2100;
- 10% de probabilidade de pelo menos mil milhões de mortos;
- 1% de probabilidade de extinção total da humanidade.⁷

Em 2023, havia cinco nações conhecidas por possuírem uma “tríade” nuclear completa — ou seja, com capacidade de lançar armas nucleares por três vias: mísseis balísticos intercontinentais,

bombas lançadas por via aérea e mísseis balísticos lançados por submarinos:

- Estados Unidos (5.244 ogivas),
- Rússia (5.889),
- China (410),
- Paquistão (170)
- e Índia (164).⁸

Três outras nações possuem formas mais limitadas de sistemas de lançamento:

- França (290),
- Reino Unido (225)
- e Coreia do Norte (cerca de 30).

Israel não reconheceu oficialmente possuir armas nucleares, mas é amplamente aceite que possui uma tríade nuclear completa com cerca de 90 ogivas. A comunidade internacional negociou vários tratados internacionais⁹ que conseguiram:

- reduzir o número total de ogivas ativas para menos de 9.500, partindo de um pico de 64.449 em 1986¹⁰;
- cessar os testes nucleares à superfície, que eram ambientalmente nocivos¹¹;
- e manter o espaço exterior livre de armas nucleares¹².

No entanto, o número atual de armas ativas continua a ser suficiente para pôr fim à nossa civilização.¹³ E mesmo que o risco anual de uma guerra nuclear seja baixo, os riscos acumulados ao longo de décadas ou de um século tornam-se extremamente sérios. Enquanto os arsenais em estado de alerta máximo forem mantidos na sua forma atual, é provável que seja apenas uma questão de tempo até que essas armas sejam usadas algures no mundo — quer deliberadamente (por um governo, terroristas ou oficiais militares renegados), quer acidentalmente.

A Destruição Mútua Assegurada (Mutually Assured Destruction — MAD) foi a estratégia mais conhecida para reduzir o risco nuclear, sendo utilizada pelos Estados Unidos e pela União Soviética durante a maior parte da Guerra Fria.¹⁴ Essa estratégia assenta em enviar aos inimigos uma mensagem credível: se usarem armas nucleares, serão imediatamente alvos de uma resposta retaliatória esmagadora na mesma moeda. Trata-se de uma abordagem baseada na teoria dos jogos. Se um país perceber que usar uma única arma nuclear levará o seu oponente a lançar uma retaliação total, então não há qualquer incentivo para utilizar essas armas,

pois isso seria suicida. Para que o MAD funcione, cada lado tem de manter a capacidade de lançar os seus mísseis contra o outro sem que sejam impedidos por sistemas defensivos.¹⁵ A razão para isso é simples: se uma nação conseguir intercetar as ogivas nucleares inimigas, então deixa de ser suicida usar as suas próprias armas ofensivamente. (Embora alguns teóricos proponham que, mesmo nesse cenário, o país atacante seria devastado pelos efeitos secundários da radioatividade, originando uma nova sigla: SAD — Self-Assured Destruction, ou Destruição Autoassegurada).¹⁶

Em parte, devido aos riscos de perturbar o equilíbrio estável estabelecido pela MAD, os exércitos mundiais têm envidado esforços relativamente limitados no desenvolvimento de sistemas de defesa antimísseis, e, em 2023, nenhuma nação dispõe de defesas suficientemente robustas para enfrentar com confiança um ataque nuclear em grande escala. Contudo, nos últimos anos, novas tecnologias de lançamento começaram a desestabilizar o equilíbrio de poder. A Rússia está a desenvolver drones submarinos para transportar armas nucleares, bem como mísseis de cruzeiro nucleares concebidos para permanecer por longos períodos à deriva, imediatamente à margem de um país-alvo, e atacar de ângulos imprevisíveis.¹⁷ Rússia, China e Estados Unidos encontram-se numa corrida para desenvolver veículos hipersónicos capazes de realizar manobras evasivas com o propósito de frustrar os sistemas de defesa enquanto entregam as suas ogivas.¹⁸ Devido à novidade destes sistemas, aumenta o risco de erros de cálculo se exércitos rivais tirarem conclusões diferentes acerca da sua potencial eficácia.

Mesmo com um dissuasor tão poderoso como a MAD, persiste o potencial de catástrofe resultante de um erro de cálculo ou de um mal-entendido.¹⁹ No entanto, temo-nos habituado tanto a esta situação que ela é quase que omitida nas discussões.

Ainda assim, há razões para um otimismo ponderado relativamente à trajetória do risco nuclear. A MAD tem sido bem-sucedida durante mais de setenta anos, e os arsenais dos Estados nucleares continuam a diminuir. O risco de terrorismo nuclear ou da utilização de bombas sujas permanece como uma grave preocupação, mas os avanços na IA conduzem ao desenvolvimento de ferramentas mais eficazes para a deteção e contração de tais ameaças.²⁰ E, embora a IA não consiga eliminar o risco de guerra nuclear, sistemas de comando e controlo mais inteligentes podem reduzir significativamente o risco de mau funcionamento dos sensores provocarem a utilização inadvertida destas terríveis armas.²¹

3. Biotecnologia

Atualmente, dispomos de outra tecnologia capaz de ameaçar toda a humanidade. Considere-se que existem muitos patógenos naturais que nos podem deixar doentes, mas que, na maioria dos casos, as pessoas conseguem sobreviver. Por outro lado, há um número reduzido de patógenos com maior probabilidade de causar a morte, mas que não se propagam facilmente. Pragas malévolas, como a Peste Negra, surgiram da combinação entre rápida propagação e elevada letalidade — tendo morto cerca de um terço da população da Europa²² e reduzido a população mundial de cerca

de 450 milhões para aproximadamente 350 milhões até ao final do século XIV.²³ No entanto, graças em parte à variação do ADN, alguns sistemas imunitários humanos mostraram-se mais eficazes no combate à peste. Um dos benefícios da reprodução sexual é que cada um de nós possui uma composição genética distinta.²⁴

Mas os avanços na engenharia genética²⁵ (que permite editar vírus ao manipular os seus genes) poderão permitir a criação — intencional ou acidental — de um supervírus que combine letalidade extrema com elevada transmissibilidade. Talvez se trate de uma infecção furtiva, que as pessoas contraem e disseminam muito antes de perceberem que foram infetadas. Ninguém teria imunidade prévia, e o resultado seria uma pandemia capaz de devastar a população humana.²⁶ A pandemia do coronavírus, entre 2019 e 2023, oferece-nos um vislumbre pálido daquilo que uma catástrofe desta natureza poderia representar.

A ameaça desta possibilidade esteve na origem da Conferência de Asilomar sobre ADN Recombinante, em 1975 — quinze anos antes do início do Projeto Genoma Humano.²⁷ Nessa conferência, foi delineado um conjunto de normas para prevenir problemas acidentais e proteger contra ações intencionais. Estas “diretrizes de Asilomar” têm sido continuamente atualizadas, e alguns dos seus princípios estão hoje integrados nas regulamentações legais que regem a indústria da biotecnologia.²⁸

Também têm sido feitos esforços para criar um sistema de resposta rápida que possa combater um vírus biológico emergente, quer tenha sido libertado acidentalmente ou de forma intencional.²⁹

Antes da COVID-19, talvez o esforço mais notável para melhorar os tempos de resposta a epidemias tenha sido a criação, em junho de 2015, da Equipa de Resposta Rápida Global (GRRT) pelo Centro de Controlo e Prevenção de Doenças (CDC) dos EUA. Esta equipa foi formada em resposta ao surto do vírus Ébola entre 2014 e 2016, na África Ocidental. A GRRT tem capacidade para deslocar-se rapidamente a qualquer parte do mundo e fornecer assistência especializada de alto nível às autoridades locais na identificação, contenção e tratamento de surtos de doenças potencialmente devastadoras.

No que respeita a vírus libertados intencionalmente, os esforços federais de defesa contra o bioterrorismo dos Estados Unidos são coordenados pela Confederação Nacional Interagências para Investigação Biológica (National Interagency Confederation for Biological Research — NICBR). Uma das instituições mais importantes neste domínio é o Instituto de Investigação Médica de Doenças Infeciosas do Exército dos EUA (United States Army Medical Research Institute of Infectious Diseases — USAMRIID). Colaborei com este instituto (através do Army Science Board) para fornecer aconselhamento sobre o desenvolvimento de melhores capacidades de resposta rápida em caso de surto.³⁰

Quando ocorre um surto, milhões de vidas dependem da rapidez com que as autoridades conseguem analisar o vírus e formar uma estratégia de contenção e tratamento. Felizmente, a velocidade do sequenciamento de vírus segue uma tendência de aceleração a longo prazo. Foram necessários treze anos, após a sua descoberta, para sequenciar o genoma completo do HIV (em 1996), apenas

trinta e um dias para sequenciar o vírus SARS (em 2003), e hoje conseguimos sequenciar muitos vírus biológicos em apenas um dia.³¹ Um sistema de resposta rápida incluiria capturar um novo vírus, sequenciá-lo em cerca de um dia e, de seguida, conceber rapidamente contramedidas médicas.

Uma estratégia consiste em usar a interferência por RNA, que recorre a pequenos fragmentos de RNA capazes de destruir o RNA mensageiro que expressa um gene (com base na observação de que os vírus são análogos a genes causadores de doenças).³² Outra abordagem é o uso de uma vacina baseada em antigénios, que tem como alvo estruturas proteicas distintas presentes na superfície de um vírus.³³ Como discutido no capítulo anterior, a descoberta de medicamentos assistida por IA já permite identificar vacinas ou terapias potenciais para um novo surto viral em apenas dias ou semanas, acelerando o início de um processo mais longo: os ensaios clínicos. Contudo, ao longo da década de 2020, teremos tecnologia capaz de acelerar uma proporção crescente da fase de ensaios clínicos através de simulação biológica.

Em maio de 2020, escrevi um artigo para a revista *Wired* defendendo que deveríamos usar a inteligência artificial para criar vacinas — por exemplo, contra o vírus SARS-CoV-2, causador da COVID-19.³⁴ E foi exatamente isso que aconteceu: vacinas bem-sucedidas, como a da Moderna, foram desenvolvidas em tempo recorde com recurso a ferramentas avançadas de IA para conceber e otimizar sequências de mRNA, bem como para acelerar os processos de fabrico e testes.³⁵ Assim, sessenta e cinco dias após receber a sequência genética do vírus, a Moderna administrou a

primeira dose a um ser humano — e recebeu autorização de emergência da FDA apenas 277 dias depois.³⁶ Este é um progresso extraordinário, tendo em conta que, antes da COVID-19, o prazo mais curto registado para criar uma vacina era de cerca de quatro anos.³⁷

No momento em que este livro está a ser escrito, está em curso uma investigação científica sobre a possibilidade de o vírus da COVID-19 ter sido libertado acidentalmente após investigações de engenharia genética num laboratório.³⁸ Dado o volume de desinformação em torno das teorias sobre fuga laboratorial, é importante basear as nossas inferências em fontes científicas de elevada qualidade. Ainda assim, a mera possibilidade evidencia um perigo real: o desfecho poderia ter sido muito pior. O vírus poderia ter sido extremamente transmissível e, ao mesmo tempo, altamente letal, o que sugere que não terá sido criado com intenções malévolas. No entanto, a tecnologia para criar algo muito mais mortal do que a COVID-19 já existe — e por isso, as contramedidas baseadas em IA serão cruciais para mitigar este risco civilizacional.

4. Nanotecnologia

A maior parte dos riscos associados à biotecnologia está relacionada com a autorreplicação. Um problema com uma única célula não é, por si só, uma ameaça significativa. O mesmo se aplica à nanotecnologia: por mais destrutivo que um nanobô individual possa ser, ele teria de ser capaz de se autorreplicar para criar uma catástrofe verdadeiramente global. A nanotecnologia tornará

possível uma vasta gama de armas ofensivas, muitas das quais poderão ser extremamente destrutivas. Além disso, uma vez amadurecida, tais armas poderão ser fabricadas a custos muito baixos — ao contrário dos arsenais nucleares atuais, que exigem enormes quantidades de recursos para serem construídos. (Para termos uma noção aproximada de quanto custa a construção de armas nucleares por atores marginais, consideremos o exemplo da Coreia do Norte, um Estado pária com acesso bastante limitado a assistência externa. O governo sul-coreano estimou que o programa nuclear norte-coreano terá custado entre 1,1 mil milhões e 3,2 mil milhões de dólares em 2016 — o ano em que o país desenvolveu com sucesso mísseis com ogivas nucleares.)³⁹

Em contraste, as armas biológicas podem ser muito baratas. Segundo um relatório da NATO de 1996, esse tipo de armamento poderia ser desenvolvido por uma equipa de apenas cinco biólogos, ao longo de algumas semanas, com um orçamento de 100 mil dólares (cerca de 190 mil em valores de 2023), sem necessidade de equipamento exótico.⁴⁰ Quanto ao impacto, um painel de peritos relatou às Nações Unidas, em 1969, que as armas biológicas seriam cerca de oitocentas vezes mais custo-eficazes do que as armas nucleares no que diz respeito a alvos civis — e os avanços da biotecnologia nas cinco décadas seguintes quase certamente aumentaram ainda mais essa proporção.⁴¹ Embora não possamos afirmar com certeza quanto custará a nanotecnologia madura no futuro, dado que funcionará com princípios de autorreplicação semelhantes aos da biologia, devemos considerar os custos das armas biológicas como uma aproximação de primeira ordem. Como a nanotecnologia beneficiará de processos de fabrico otimizados por

inteligência artificial, é possível que os custos venham a ser ainda mais reduzidos.

As armas baseadas em nanotecnologia poderão incluir pequenos drones que entregam venenos aos seus alvos sem serem detetados, nanobôs que penetram no corpo através da água ou de aerossóis e que o destroem a partir do interior, ou sistemas que visam seletivamente determinados grupos de pessoas, de acordo com qualquer tipo de descrição.⁴² Como escreveu o pioneiro da nanotecnologia Eric Drexler, em 1986:

“Plantas” com “folhas” não mais eficientes do que as células solares atuais poderiam superar as plantas reais, enchendo a biosfera com uma folhagem incomestível. “Bactérias” resistentes e omnívoras poderiam superar as bactérias reais: poderiam espalhar-se como pólen ao vento, replicar-se rapidamente e reduzir a biosfera a pó em questão de dias. Replicadores perigosos poderiam ser demasiado resistentes, pequenos e rapidamente disseminados para serem contidos — pelo menos se não nos prepararmos. Já temos dificuldade suficiente em controlar vírus e moscas-da-fruta.⁴³

O pior cenário mais frequentemente discutido é a potencial criação do chamado “gray goo” (massa cinzenta) — máquinas autorreplicantes que consomem matéria à base de carbono e a transformam em mais máquinas autorreplicantes.⁴⁴ Esse processo poderia desencadear uma reação em cadeia descontrolada, com o potencial de converter toda a biomassa da Terra nesse tipo de máquinas.

Vejamos quanto tempo poderia demorar a destruição de toda a biomassa da Terra. A biomassa disponível contém,

aproximadamente, 10^{40} átomos de carbono.⁴⁵ Um único nanobô replicador poderá conter, ele próprio, cerca de 10^7 átomos de carbono.⁴⁶ Isso significa que o nanobô teria de criar 10^{33} cópias de si mesmo — não todas diretamente, importa sublinhar, mas por meio de replicação iterativa. Os nanobôs de cada “geração” poderiam apenas criar duas cópias de si mesmos, ou talvez algumas mais. Os números incrivelmente grandes resultam do facto de este processo se repetir sucessivamente com as cópias, e com as cópias das cópias. Assim, seriam necessárias cerca de 110 gerações de nanobôs (uma vez que $2^{110} \approx 10^{33}$), ou 109 gerações, se os nanobôs das gerações anteriores se mantiverem ativos.⁴⁷ O especialista em nanotecnologia Robert Freitas estima um tempo de replicação de cerca de cem segundos, pelo que, em condições ideais, o tempo necessário para a aniquilação total dessa quantidade de carbono por “gray goo” (gosma cinzenta) seria de cerca de três horas.⁴⁸

Contudo, a taxa real de destruição seria muito mais lenta, pois a biomassa do planeta não está distribuída num bloco contínuo. O fator limitador seria o deslocamento da frente de destruição. Os nanobôs, devido ao seu reduzido tamanho, não se conseguem mover rapidamente, pelo que um processo destrutivo deste tipo demoraria, provavelmente, semanas a dar a volta ao globo.

No entanto, um ataque em duas fases poderia ultrapassar essa limitação. Durante um certo período, um processo insidioso poderia converter uma pequeníssima porção de átomos de carbono em todo o mundo, de modo que um em cada mil biliões (10^{15}) se tornasse parte de uma força adormecida de nanobôs “gray goo”. Estes nanobôs não seriam detetáveis, dada a sua concentração ínfima.

Contudo, como estariam espalhados por toda a parte, não precisariam de se deslocar longas distâncias quando o ataque fosse ativado. Então, a um sinal pré-determinado — talvez transmitido por um pequeno número de nanobôs auto-organizados como antenas capazes de captar ondas de rádio de longo alcance — os nanobôs preposicionados começariam a replicar-se rapidamente no próprio local. Cada nanobô multiplicar-se por mil bilhões de vezes exigiria apenas cinquenta replicações binárias — o que levaria menos de noventa minutos.⁴⁹ A velocidade de propagação da frente destrutiva deixaria, assim, de ser um fator limitador.

Por vezes, este cenário é imaginado como o resultado de uma ação maliciosa por parte de seres humanos — talvez como uma arma terrorista destinada a destruir a vida na Terra. No entanto, isto não precisa de acontecer por malícia. Podemos imaginar casos em que nanobôs entrem acidentalmente num processo descontrolado de autorreplicação, talvez devido a um erro na sua programação. Por exemplo, se forem concebidos de forma descuidada, nanobôs destinados a consumir apenas um certo tipo de matéria ou a operar dentro de uma área limitada podem falhar e provocar um desastre global. Por isso, em vez de tentar adicionar funcionalidades de segurança a sistemas que são intrinsecamente perigosos, devemos apenas construir nanobôs que sejam naturalmente seguros por concepção (fail-safe).

Uma forte proteção contra a replicação não intencional seria conceber quaisquer nanobôs autorreplicáveis com uma “arquitetura de difusão” (broadcast architecture).⁵⁰ Isto significa que, em vez de transportarem internamente o seu próprio programa, dependeriam

de um sinal externo (possivelmente transmitido por ondas rádio) para receberem todas as instruções. Desta forma, o sinal poderia ser desligado ou modificado em caso de emergência, interrompendo a reação em cadeia da autorreplicação.

Contudo, mesmo que pessoas responsáveis desenvolvam nanobôs seguros, agentes maliciosos ainda poderiam conceber versões perigosas. Por conseguinte, precisaremos de um “sistema imunitário” nanotecnológico já implementado antes mesmo de estes cenários se tornarem uma possibilidade. Este sistema imunitário teria de ser capaz de lidar não apenas com cenários que provocam destruição óbvia, mas também com qualquer replicação furtiva potencialmente perigosa, mesmo em concentrações muito baixas.

É encorajador saber que a área já leva a segurança a sério. As diretrizes de segurança em nanotecnologia existem há cerca de duas décadas, tendo emergido do Workshop de 1999 sobre Diretrizes de Política de Investigação em Nanotecnologia Molecular (no qual participei), e têm vindo a ser revistas e atualizadas desde então.⁵¹ Ao que tudo indica, a principal defesa imunitária contra o gray goo seria o chamado blue goo (gosma azul) — nanobôs concebidos para neutralizar os seus equivalentes cinzentos.⁵²

Segundo os cálculos de Freitas, se dispersos de forma ótima por todo o mundo, 88.000 toneladas métricas de nanobôs defensivos do tipo blue goo poderiam ser suficientes para varrer toda a atmosfera em cerca de vinte e quatro horas.⁵³ Para se ter uma noção, este valor é inferior ao peso da água deslocada por um

grande porta-aviões — enorme, mas muito pequeno quando comparado com a massa total do planeta. Ainda assim, estes valores pressupõem condições ideais de eficiência e de implantação, o que provavelmente não será atingido na prática. Em 2023, com tanto ainda por desenvolver no campo da nanotecnologia, é muito difícil estimar até que ponto os requisitos reais de blue goo difeririam desta estimativa teórica.

Há, contudo, um requisito claro: o blue goo não poderá ser criado apenas com ingredientes naturais abundantes (que é aquilo de que o gray goo seria composto). Estes nanobôs teriam de ser construídos com materiais especiais, de modo a que o blue goo não pudesse ser convertido em gray goo. Existem várias questões complexas para que este método funcione de forma robusta, bem como problemas teóricos a resolver para garantir um blue goo seguro e à prova de falhas, mas acredito que esta abordagem se revelará viável. Em última instância, não há nenhuma razão fundamental para que os nanobôs nocivos tenham uma vantagem assimétrica sobre sistemas defensivos bem concebidos. A chave está em assegurar que os nanobôs “bons” sejam distribuídos globalmente antes dos “maus”, para que reações em cadeia de autorreplacação possam ser detetadas e neutralizadas antes de saírem do controlo.

O meu amigo Bill Joy, no seu ensaio de 2000 intitulado “*Why the Future Doesn’t Need Us*”, apresenta uma excelente reflexão sobre os riscos da nanotecnologia, incluindo o cenário do gray goo.⁵⁴ A maioria dos especialistas em nanotecnologia considera improvável uma catástrofe desse tipo — e eu também. No entanto, dado que

se trata de um evento de nível extintivo, é muito importante manter estes riscos em mente à medida que a nanotecnologia se desenvolve nas próximas décadas. Estou esperançado de que, com as devidas precauções — e com o auxílio da Inteligência Artificial no desenho de sistemas seguros — a humanidade consiga manter estes cenários no domínio da ficção científica.

5. Inteligência Artificial

No caso dos riscos da biotecnologia, continuamos sujeitos a pandemias como a da COVID-19, que causou quase sete milhões de mortes em todo o mundo até 2023⁵⁵, mas estamos rapidamente a desenvolver meios para sequenciar rapidamente um novo vírus e criar medicamentos que evitem catástrofes com potencial de colapso civilizacional. Quanto à nanotecnologia, embora o gray goo ainda não represente uma ameaça concreta, já dispomos de uma estratégia global que deverá oferecer defesa mesmo contra o ataque mais sofisticado em duas fases. Porém, a Inteligência Artificial superinteligente encerra um tipo de perigo fundamentalmente distinto — na verdade, representa o perigo primordial. Se a IA for mais inteligente do que os seus criadores humanos, poderá, potencialmente, encontrar formas de contornar quaisquer medidas de precaução que tenham sido implementadas. E não existe uma estratégia geral que possa, de forma definitiva, superar este risco.

Há três grandes categorias de perigo associadas à IA superinteligente, e com investigação focada em cada uma delas, podemos pelo menos mitigar o risco. A primeira é o uso indevido

(misuse), que abrange os casos em que a IA atua conforme o pretendido pelos seus operadores humanos, mas estes usam-na deliberadamente para causar dano a outros.⁵⁶ Por exemplo, terroristas poderiam recorrer às capacidades bioquímicas de uma IA para criar um novo vírus que provocasse uma pandemia letal.

A segunda categoria é o *desalinhamento externo* (outer misalignment), que se refere a casos em que há uma discrepância entre as verdadeiras intenções dos programadores e os objetivos que transmitem à IA na esperança de os alcançar.⁵⁷ Este é o problema clássico retratado nas histórias de génios da lâmpada — é difícil especificar com precisão aquilo que se quer a alguém que interpreta os comandos de forma literal. Imaginemos programadores que desejam curar o cancro e, por isso, instruem a IA a conceber um vírus que destruía todas as células com uma determinada mutação genética cancerígena. A IA cumpre a missão com êxito, mas os programadores não se apercebem de que essa mutação também está presente em muitas células saudáveis — o que leva o vírus a matar os pacientes tratados.

Por fim, ocorre o desalinhamento interno (inner misalignment) quando os métodos que a IA aprende para atingir o seu objetivo geram comportamentos indesejáveis, pelo menos em alguns casos.⁵⁸ Por exemplo, ao treinar uma IA para identificar alterações genéticas exclusivas de células cancerígenas, esta pode detetar um padrão espúrio que funciona nos dados de amostra, mas não quando aplicado no mundo real. Talvez as células cancerígenas presentes nos dados de treino tenham sido armazenadas durante mais tempo antes da análise do que as células saudáveis, e a IA

aprenda a reconhecer alterações genéticas subtis resultantes desse armazenamento. Se a IA criar um vírus destruidor de cancro com base nessa informação, tal vírus poderá não funcionar em pacientes vivos. Estes exemplos são relativamente simples, mas à medida que se atribuem tarefas cada vez mais complexas aos modelos de IA, torna-se mais difícil detetar desalinhamentos.

Existe um campo de investigação técnica dedicado à prevenção de ambos os tipos de desalinhamento da IA. Várias abordagens teóricas promissoras estão a ser exploradas, embora ainda haja muito trabalho a fazer. A *generalização por imitação* (imitative generalization) consiste em treinar a IA para imitar o modo como os humanos tiram inferências, tornando-a assim mais segura e fiável ao aplicar o seu conhecimento em situações desconhecidas.⁵⁹ A abordagem da segurança da IA através do debate (AI safety via debate) utiliza IAs concorrentes para apontarem falhas nas ideias umas das outras, permitindo que os humanos julguem questões demasiado complexas para serem avaliadas sem assistência.⁶⁰ Já a *amplificação iterativa* (iterated amplification) baseia-se no uso de IAs mais fracas para ajudar os humanos a criar IAs mais fortes e bem alinhadas — repetindo este processo até que se consigam alinhar IAs significativamente mais poderosas do que qualquer ser humano conseguiria alinhar sozinho.⁶¹

Assim, embora o problema do alinhamento da IA venha a ser extremamente difícil de resolver⁶², não teremos de o resolver sozinhos — com as técnicas adequadas, poderemos usar a própria IA para aumentar drasticamente as nossas capacidades de alinhamento. O mesmo se aplica ao design de IAs que resistam a

usos maliciosos. No exemplo anterior da bioquímica, uma IA devidamente alinhada teria de reconhecer o pedido perigoso e recusar-se a cumpri-lo. Mas também precisaremos de barreiras éticas contra o uso indevido — normas internacionais robustas que favoreçam o desenvolvimento seguro e responsável da IA.

À medida que os sistemas de IA se tornaram drasticamente mais poderosos na última década, a limitação dos perigos decorrentes do uso malicioso ganhou prioridade a nível global. Nos últimos anos, tem havido um esforço concertado para criar uma orientação ética para a inteligência artificial. Em 2017, participei na Conferência de Asilomar sobre IA Benéfica (Asilomar Conference on Beneficial AI), inspirada nas diretrizes da biotecnologia estabelecidas numa conferência homónima quatro décadas antes.⁶³ Alguns princípios úteis foram aí definidos, e eu subscrevi-os. Contudo, continua a ser evidente que entidades com ideologias antidemocráticas ou contrárias à liberdade de expressão podem ainda assim utilizar IA avançada para os seus próprios fins, mesmo que a maior parte do mundo siga as propostas de Asilomar. É de notar que as principais potências militares não assinaram estas diretrizes — e têm sido historicamente das forças mais influentes na promoção de tecnologia avançada. Por exemplo, a Internet teve origem na nossa Agência de Projetos de Investigação Avançada de Defesa (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA).⁶⁴

Ainda assim, os Princípios de Asilomar sobre a IA constituem uma base para o desenvolvimento responsável da inteligência artificial, tendo influenciado positivamente a direção do campo. Seis dos vinte e três princípios do documento promovem valores

“humanos” ou a “humanidade”. Por exemplo, o Princípio 10, Alinhamento de Valores (Value Alignment), afirma que “sistemas de IA altamente autônomos devem ser concebidos de forma a garantir que os seus objetivos e comportamentos se mantenham alinhados com os valores humanos ao longo de toda a sua operação.”⁶⁵

Outro documento, a Promessa contra Armas Autônomas Letais (Lethal Autonomous Weapons Pledge), promove o mesmo princípio: “Nós, os signatários, concordamos que a decisão de tirar uma vida humana nunca deve ser delegada a uma máquina. Existe um componente moral nesta posição: não devemos permitir que máquinas tomem decisões letais pelas quais outros — ou ninguém — serão responsabilizados.”⁶⁶ Embora figuras influentes como Stephen Hawking, Elon Musk, Martin Rees e Noam Chomsky tenham assinado esta proibição das *LAWs* (sigla para Lethal Autonomous Weapons), as principais potências militares — incluindo os Estados Unidos, a Rússia, o Reino Unido, a França e Israel — rejeitaram-na.

Ainda que as forças armadas dos EUA não subscrevam essas diretrizes, possuem uma política própria de “diretiva humana” que estipula que os sistemas que visem humanos devem ser controlados por humanos.⁶⁷ Uma diretiva do Pentágono de 2012 estabeleceu que “os sistemas de armas autônomas e semiautônomas devem ser concebidos de modo a permitir que comandantes e operadores exerçam níveis apropriados de julgamento humano sobre o uso da força.”⁶⁸ Em 2016, o Vice-Secretário da Defesa dos EUA, Robert Work, afirmou que os militares norte-americanos “não delegarão a autoridade letal a uma máquina para tomar uma decisão” quanto

ao uso desse tipo de força.⁶⁹ Ainda assim, deixou em aberto a possibilidade de que, num futuro próximo, esta política possa ser revertida, caso seja necessário competir com uma nação rival “mais disposta a delegar autoridade às máquinas do que nós.”⁷⁰ Participei nas discussões que moldaram esta política, tal como fiz parte do conselho político que orientou a implementação de medidas contra o uso de ameaças biológicas.

No início de 2023, após uma conferência internacional que incluiu diálogo com a China, os Estados Unidos emitiram uma “Declaração Política sobre o Uso Responsável da Inteligência Artificial e Autonomia em Contexto Militar”, apelando aos Estados para que adotassem políticas sensatas, incluindo a garantia de controlo humano final sobre armas nucleares.⁷¹ No entanto, a própria noção de “controlo humano” é mais nebulosa do que à partida possa parecer. Se os humanos autorizassem um futuro sistema de IA a “interceptar um ataque nuclear iminente”, quanta margem de decisão deveria esse sistema ter sobre a forma de o fazer? Note-se que uma IA suficientemente geral para frustrar com sucesso esse tipo de ataque também poderia ser usada para fins ofensivos.

É, portanto, necessário reconhecermos que as tecnologias de IA são, por natureza, de uso dual. Isto aplica-se mesmo a sistemas que já estão implementados. O mesmo drone que entrega medicamentos a um hospital inacessível por estrada durante a época das chuvas pode, mais tarde, transportar um explosivo até esse mesmo hospital. Convém lembrar que as operações militares utilizam, há mais de uma década, drones tão precisos que conseguem disparar um míssil através de uma janela específica que

se encontra literalmente do outro lado do mundo em relação aos seus operadores.⁷²

Também devemos refletir se queremos, de facto, que o nosso lado respeite uma proibição de *LAWs* (armas autónomas letais), caso forças militares hostis não o façam. E se uma nação inimiga enviar um contingente de máquinas de guerra avançadas, controladas por IA, para ameaçar a nossa segurança? Não desejaríamos que o nosso lado tivesse uma capacidade ainda mais inteligente para as derrotar e manter-nos seguros? Esta é a principal razão pela qual a campanha Stop Killer Robots ("Campanha para Parar os Robôs Assassinos") não conseguiu obter grande adesão.⁷³ Em 2023, todas as principais potências militares recusaram apoiar esta campanha, com a notável exceção da China, que o fez em 2018, mas mais tarde esclareceu que apoiava apenas a proibição do uso, e não do desenvolvimento⁷⁴ — sendo que mesmo essa posição se deve, provavelmente, mais a razões estratégicas e políticas do que morais, dado que armas autónomas utilizadas pelos Estados Unidos e seus aliados poderiam colocar Pequim em desvantagem militar. A minha própria posição é que, se fôssemos atacados por tais armas, quereríamos dispor de uma contra-arma — o que implicaria necessariamente violar essa proibição.

Além disso, o que significará afinal “humano” no contexto do controlo humano, quando introduzirmos uma componente não biológica no nosso processo de decisão, a partir da década de 2030, através de interfaces cérebro-computador? Essa componente não biológica crescerá exponencialmente, enquanto a nossa inteligência

biológica permanecerá inalterada. Assim, à medida que avançarmos para o final da década de 2030, o nosso próprio pensamento será em grande parte não biológico. Então, onde ficará a tomada de decisão “humana”, quando o nosso pensamento depender em larga medida de sistemas não biológicos?

Alguns dos outros princípios de Asilomar também deixam questões em aberto. Por exemplo, o princípio 7, Transparência em Caso de Falha: “Se um sistema de IA causar dano, deverá ser possível apurar porquê.” E o princípio 8, Transparência Judicial: “Qualquer envolvimento de um sistema autônomo na tomada de decisões judiciais deve proporcionar uma explicação satisfatória, auditável por uma autoridade humana competente.”

Estes esforços para tornar as decisões da IA mais compreensíveis são valiosos, mas o problema fundamental é que, independentemente de quaisquer explicações fornecidas, simplesmente não teremos a capacidade de compreender plenamente a maioria das decisões tomadas por uma IA superinteligente. Se um programa de Go que supere largamente o melhor jogador humano explicasse as suas decisões estratégicas, nem mesmo o melhor jogador do mundo (sem o auxílio de um aprimoramento cibernético) seria capaz de compreendê-las por completo.⁷⁵ Uma linha promissora de investigação, orientada para reduzir os riscos de sistemas de IA opacos, é a chamada “*eliciação de conhecimento latente*” (eliciting latent knowledge).⁷⁶ Este projeto visa desenvolver técnicas que garantam que, ao colocarmos uma pergunta a uma IA, ela nos forneça toda a informação relevante que conhece, em vez de apenas nos dizer aquilo que

pensa que queremos ouvir — o que será um risco crescente à medida que os sistemas de machine learning se tornam mais poderosos.

Os princípios promovem ainda, de forma louvável, dinâmicas não competitivas em torno do desenvolvimento da IA, em especial o princípio 18, Corrida Armamentista em IA — “Deve evitar-se uma corrida armamentista em armas autónomas letais” — e o princípio 23, Bem Comum: “A superinteligência só deve ser desenvolvida ao serviço de ideais éticos amplamente partilhados e para benefício de toda a humanidade, e não apenas de um Estado ou organização.” No entanto, dado que uma IA superinteligente pode representar uma vantagem decisiva em contextos de guerra e trazer benefícios económicos imensos, as potências militares terão fortes incentivos para se envolver numa corrida armamentista nesse domínio.⁷⁷ Isto não só agrava os riscos de mau uso, como também aumenta as probabilidades de que as precauções de segurança em torno do alinhamento da IA sejam negligenciadas.

Recordemos a questão do alinhamento de valores, abordada no princípio 10. O princípio seguinte, Valores Humanos, desenvolve melhor quais os valores em questão: “Os sistemas de IA devem ser concebidos e operados de modo a serem compatíveis com os ideais de dignidade humana, direitos, liberdades e diversidade cultural.”

Contudo, ter esse objetivo não garante que ele seja alcançado — e é precisamente aqui que reside o cerne do perigo associado à IA. Uma IA com um objetivo prejudicial não teria dificuldade em explicar por que razão esse objetivo faria sentido dentro de um

propósito mais amplo, chegando mesmo a justificá-lo com base em valores amplamente partilhados pela humanidade.

É muito difícil restringir de forma eficaz o desenvolvimento de qualquer capacidade fundamental da IA, sobretudo porque a ideia básica por detrás da inteligência geral é extremamente abrangente. Há sinais encorajadores, no momento em que este livro vai para impressão, de que os principais governos estão a levar o desafio a sério — como a Declaração de Bletchley, que se seguiu à Cimeira de Segurança da IA de 2023, no Reino Unido — mas muito dependerá da forma como tais iniciativas serão efetivamente implementadas.⁷⁸ Um argumento otimista, baseado no princípio do mercado livre, sustenta que cada passo em direção à superinteligência está sujeito à aceitação pelo mercado. Ou seja, a inteligência artificial geral será criada por humanos para resolver problemas humanos reais, e há fortes incentivos para otimizá-la com fins benéficos. Dado que a IA está a emergir a partir de uma infraestrutura económica profundamente integrada, ela acabará por refletir os nossos valores, porque, num sentido importante, ela será uma extensão de nós. Já somos, de facto, uma civilização humano-máquina. Em última análise, a abordagem mais importante que podemos adotar para manter a IA segura é proteger e melhorar as nossas instituições humanas de governação e sociais. A melhor forma de evitar conflitos destrutivos no futuro é continuar o avanço dos nossos ideais éticos, os quais já reduziram profundamente a violência ao longo dos últimos séculos e décadas.⁷⁹

Penso também que precisamos de levar a sério as vozes luditas — equivocadas e cada vez mais estridentes — que defendem um

abandono generalizado do progresso tecnológico como forma de evitar os perigos reais associados à genética, à nanotecnologia e à robótica (GNR).⁸⁰ Atrasos na superação do sofrimento humano continuam a ter consequências de grande impacto — como, por exemplo, o agravamento da fome em África devido à oposição à ajuda alimentar que possa conter OGMs (organismos geneticamente modificados).⁸¹

Com as tecnologias a começarem agora a modificar os nossos corpos e cérebros, surgiu uma nova forma de oposição ao progresso: o “humanismo fundamentalista” — uma rejeição de qualquer alteração à natureza do que significa ser humano.⁸² Esta posição inclui a oposição à modificação dos nossos genes, à manipulação do dobrar das proteínas e a outras iniciativas que visam a extensão radical da vida. No entanto, esta oposição acabará por falhar, pois a procura por terapias capazes de superar a dor, as doenças e a curta duração de vida inerente aos nossos corpos “versão 1.0” revelar-se-á, inevitavelmente, irresistível.

Quando as pessoas são confrontadas com a perspetiva da extensão radical da vida, surgem rapidamente duas objeções. A primeira diz respeito à probabilidade de ficarmos sem recursos materiais para sustentar uma população biológica em expansão. Ouvimos frequentemente que estamos a esgotar as fontes de energia, a água potável, a habitação, os terrenos e os outros recursos necessários para manter uma população crescente — e que este problema só se agravará quando a taxa de mortalidade começar a cair drasticamente. Mas, como expliquei no capítulo 4, à medida que começarmos a otimizar o uso dos recursos da Terra,

descobriremos que eles são milhares de vezes superiores ao que necessitamos. Por exemplo, dispomos de praticamente dez mil vezes mais luz solar do que seria necessário, em teoria, para satisfazer todas as nossas atuais necessidades energéticas.⁸³

A segunda objeção à extensão radical da vida é que ficaremos profundamente aborrecidos, repetindo as mesmas coisas ao longo dos séculos. No entanto, nos anos 2020 teremos realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR) fornecidas através de dispositivos externos muito compactos, e nos anos 2030, essas tecnologias estarão ligadas diretamente ao nosso sistema nervoso por meio de nanobôs que enviarão sinais diretamente aos nossos sentidos. Teremos assim não apenas extensão da vida, mas também uma expansão radical da experiência de vida. Habitaremos vastas realidades virtuais e aumentadas, limitadas apenas pela nossa imaginação — que, por sua vez, será expandida. Mesmo vivendo centenas de anos, não conseguiríamos esgotar todo o conhecimento a adquirir, nem toda a cultura a experimentar.

A IA é a tecnologia pivô que nos permitirá enfrentar os desafios prementes que nos confrontam, incluindo a superação da doença, da pobreza, da degradação ambiental e de todas as nossas fragilidades humanas. Temos um imperativo moral de concretizar a promessa destas novas tecnologias, ao mesmo tempo que mitigamos os seus perigos. Mas não será a primeira vez que conseguimos alcançar este equilíbrio. No início deste capítulo, mencionei os exercícios de defesa civil que vivenciei em criança, como preparação para uma eventual guerra nuclear. Quando crescia, a maioria das pessoas à minha volta assumia que uma

guerra nuclear era praticamente inevitável. O facto de a nossa espécie ter encontrado a sabedoria para abster-se de usar tais armas terríveis brilha como um exemplo de como temos o poder de usar responsavelmente a biotecnologia, a nanotecnologia e a superinteligência artificial. Não estamos condenados ao fracasso no controlo destes perigos.

De um modo geral, devemos ser cautelosamente otimistas. Embora a IA esteja a criar novas ameaças técnicas, ela também aumentará radicalmente a nossa capacidade de lidar com essas mesmas ameaças. Quanto ao abuso, uma vez que estes métodos aumentarão a nossa inteligência independentemente dos nossos valores, poderão ser usados tanto para o bem como para o mal.⁸⁴ Devemos, portanto, trabalhar para construir um mundo onde os poderes da IA estejam amplamente distribuídos, de forma a que os seus efeitos reflitam os valores da humanidade como um todo.

CAPÍTULO 8

Diálogo Com Cassandra

CASSANDRA: Portanto, antecipas que uma rede neural com poder de processamento suficiente será capaz de ultrapassar todas as capacidades humanas até 2029.

RAY: Correto. Isso já está a acontecer, uma capacidade após outra.

CASSANDRA: E quando isso acontecer, elas serão muito melhores do que qualquer ser humano em todas as competências que um ser humano possui.

RAY: Correto. Em várias áreas, serão melhores do que todos os humanos até 2029.

CASSANDRA: E para passar num teste de Turing, uma IA terá de ser tornada menos inteligente.

RAY: Sim, caso contrário perceberíamos que não se trata de um humano não melhorado.

CASSANDRA: E também estás à espera de que, no início dos anos 2030, tenhamos meios de entrar no cérebro e ligar-nos aos níveis superiores do neocórtex, tanto para sabermos o que se passa como para ativar conexões.

RAY: Exatamente.

CASSANDRA: E assim, esta superinteligência que estamos a criar passará a fazer parte direta do nosso cérebro, pelo menos através dessas ligações à nuvem.

RAY: Correto.

CASSANDRA: Muito bem, mas esses dois avanços — ensinar a uma rede neural tudo o que todos os humanos sabem fazer, e além disso, e conetar-se internamente ao cérebro com ligações bidirecionais eficazes — pertencem a campos muito diferentes.

RAY: Bem, sim.

CASSANDRA: Um dos campos envolve a experimentação com computadores, que, em grande parte, não é regulada. As experiências demoram dias, e um avanço pode surgir logo a seguir ao outro. O progresso avança muito rapidamente. Por outro lado, um processo como inserir um implante com um milhão de fios no cérebro é algo completamente diferente. Exige todo o tipo de supervisão e regulamentação. Estamos a colocar algo não apenas dentro do corpo humano, mas dentro

do próprio cérebro, que é provavelmente a parte fisicamente mais sensível do corpo. E nem sequer está claro para os reguladores que isso seja necessário. Se, por exemplo, pudermos prevenir uma doença cerebral grave, isso poderá trazer um benefício concreto, mas ligar o cérebro a um computador externo seria muito difícil.

RAY: Mas isso acontecerá na mesma, em parte impulsionado pelo objetivo de tratar os distúrbios cerebrais significativos de que faleste.

CASSANDRA: Sim, concordo que é possível, mas é provável que sofra um adiamento substancial.

RAY: É por isso que previ a sua chegada para os anos 2030.

CASSANDRA: Mas qualquer regulamentação relacionada com a inserção de objetos estranhos no cérebro pode adiar isso, digamos, dez anos, até aos anos 2040. Isso mudaria drasticamente a tua linha temporal quanto à interação entre máquinas superinteligentes e pessoas. Por exemplo, as máquinas acabariam por ocupar todos os empregos, em vez de se tornarem apenas uma extensão da inteligência humana.

RAY: Bem, uma extensão da mente diretamente no nosso cérebro seria conveniente — não a perderias como acontece, por exemplo, com o telemóvel. Mas mesmo sem essa ligação direta, tais dispositivos já funcionam como uma extensão da

inteligência humana. Hoje em dia, uma criança pode aceder a todo o conhecimento humano através do seu dispositivo móvel. E a IA ainda aumenta a capacidade de muito mais trabalhadores do que os substitui. Embora os extensores cerebrais estejam fora do corpo, fazemos atualmente trabalhos que seriam impossíveis sem os dispositivos que já temos, mesmo que não estejam ligados fisicamente ao nosso cérebro.

CASSANDRA: Sim, mas tu previste que precisaríamos de milhões de circuitos para nos conetarmos à camada superior do neocórtex. Em contraste, estender a nossa inteligência através de dispositivos externos exige entradas escritas em teclados, o que é várias ordens de magnitude mais lento. Isso comprometeria imensamente a interação. E por que razão é que uma IA iria sequer querer interagir com um ser humano com uma velocidade de comunicação tão lenta? Mais valia fazer tudo sozinha.

RAY: Em meados dos anos 2020, teremos meios de interagir com computadores milhares de vezes mais rápidos do que escrever no teclado: realidade virtual totalmente imersiva com vídeo e áudio em ecrã completo. Veremos e ouviremos a realidade comum, mas ela será intercalada com comunicação bidirecional com os nossos computadores. Isso é quase tão rápido como uma ligação às camadas superiores do nosso neocórtex. Isto acabará por substituir a interação através de teclados.

CASSANDRA: Está bem, avançaremos na nossa capacidade de comunicar com os computadores, mas ainda assim não é o mesmo que estender efetivamente o nosso neocórtex.

RAY: Mas as pessoas continuarão a ter trabalho para fazer, a fim de obter alimento, abrigo e outras necessidades. Mesmo antes de os extensores cerebrais internos nos permitirem pensar de forma mais abstrata, os extensores externos com IA avançada permitir-nos-ão realizar tarefas difíceis e resolver problemas complexos.

CASSANDRA: Mas as pessoas precisam de um propósito mais profundo. Se as IAs puderem fazer tudo o que os humanos conseguem fazer em qualquer esfera intelectual, e fazê-lo muito melhor do que os melhores humanos, e a velocidades muito superiores, o que restará para os humanos fazerem que lhes traga significado?

RAY: Bem, é por isso que queremos fundir-nos com a inteligência que estamos a criar. As IAs tornar-se-ão parte de nós, e assim, seremos nós a fazer essas coisas.

CASSANDRA: Certo. E é por isso que continuo preocupada com o que poderia ser um atraso de uma década na criação de um extensor cerebral funcional, tendo em conta o desafio extraordinário de colocar um dispositivo com milhões de ligações dentro dos nossos crânios. Consigo aceitar a viabilidade de todo o tipo de mudanças fora dos nossos corpos,

incluindo a realidade virtual, mas isso não é o mesmo que realmente estender o nosso neocórtex.

RAY: Essa foi precisamente a preocupação expressa por Daniel Kahneman. Ele também estava preocupado com o potencial de violência entre pessoas que perderam os seus empregos e outras.

CASSANDRA: Por “outras” estás a referir-te aos computadores, já que serão eles os superiores aos humanos em todas as competências?

RAY: Não aos computadores, pois estaremos dependentes deles para o nosso bem-estar, mas sim a outros humanos que possam ser vistos como estando a usar a IA para expandir a sua própria riqueza e poder à custa dos trabalhadores substituídos.

CASSANDRA: Sim, suspeito que Kahneman estava a pensar num período de transição em que alguns humanos mantêm o poder, e a IA ainda não criou abundância material suficiente para evitar o conflito.

RAY: Certo, mas o conflito pode ser minimizado se as pessoas sentirem que têm um propósito. E estender o nosso neocórtex para a nuvem será fundamental para os humanos manterem um sentido de propósito. Tal como, há centenas de milhares de anos, o crescimento do neocórtex elevou os nossos

antepassados primatas do instinto de sobrevivência à contemplação da filosofia, os humanos estendidos terão ainda mais capacidade para a empatia e a ética.

CASSANDRA: Concordo, mas estender o neocórtex para a nuvem é um tipo de progresso muito diferente do que melhorar extensores cerebrais externos.

RAY: Sim, o teu ponto é válido. Mas acredito que alcançaremos uma extensão do neocórtex já no início da década de 2030. Portanto, o período de transição provavelmente não será muito longo.

CASSANDRA: Mas a linha temporal para a ligação ao neocórtex é uma preocupação central. Seria um enorme problema se isso fosse adiado.

RAY: Bem, sim, isso é verdade.

CASSANDRA: Além disso, se uma IA imitasse-te e substituíssemos o teu “tu” biológico por essa emulação, poderia parecer que eras tu, e assim serias visto pelos outros, mas tu, de facto, deixarias de existir.

RAY: Certo, mas não estamos a falar disso. Não estamos a emular o teu cérebro biológico. Estamos a acrescentar-lhe algo. O teu cérebro biológico continuará como sempre foi, só que agora com inteligência adicional.

CASSANDRA: Mas a inteligência não biológica acabará por ser muitas vezes mais poderosa do que o teu cérebro biológico — eventualmente milhares a milhões de vezes mais.

RAY: Sim, mas ainda assim, nada será retirado. Estaremos a acrescentar imenso.

CASSANDRA: No entanto, tu argumentaste que, dentro de alguns anos, os nossos cérebros serão efetivamente extensões da nuvem.

RAY: Na verdade, já estamos a fazer isso. E, seja qual for a importância filosófica que atribuas ao nosso cérebro biológico, também não o estamos a retirar.

CASSANDRA: Mas o cérebro biológico, nesse ponto, será bastante insignificante.

RAY: Mas continuará lá, e manterá todas as suas qualidades fundamentais.

CASSANDRA: Bem, vejo mudanças muito profundas a acontecerem num prazo muito curto.

RAY: Nisso estamos de acordo.

Apêndice

Fontes do Gráfico Preço-Desempenho da Informática, 1939-2023

Metodologia de Seleção de Máquinas

As máquinas neste gráfico foram selecionadas como principais máquinas de computação programável cujo rácio desempenho/preço superou o de todas as máquinas anteriores. Se várias máquinas alcançaram esse feito num determinado ano civil, apenas a que apresentou o melhor rácio desempenho/preço foi incluída, independentemente da data de lançamento dentro desse ano. As máquinas que não foram vendidas nem alugadas comercialmente são atribuídas ao ano da sua primeira operação normal. Já as máquinas que foram vendidas ou alugadas comercialmente são associadas ao seu primeiro ano civil de disponibilidade pública generalizada (e não ao ano de concepção ou de prototipagem). No caso de máquinas de escala para consumidores, apenas foram considerados os dispositivos em produção massiva para venda a retalho — máquinas personalizadas individualmente ou computadores “caseiros” híbridos, montados a partir de componentes de retalho díspares, tornariam a análise global mais confusa. Máquinas que foram concebidas, mas não construídas, como o Motor Analítico (Analytical Engine) de Charles Babbage, e máquinas que foram construídas, mas não funcionavam de forma fiável, como o Z1 de Konrad Zuse, não foram incluídas. Do mesmo modo, este gráfico ignora alguns dispositivos altamente especializados, como os processadores digitais de sinal (digital signal processors), que são tecnicamente capazes de executar um determinado número de operações digitais por segundo, mas que não são amplamente utilizados como CPUs de uso geral.

Metodologia de Dados de Preços

Os preços nominais foram ajustados para preços reais de Fevereiro de 2023, com base nos dados do Índice de Preços ao Consumidor (CPI) do Bureau of Labor Statistics dos EUA (CPI-U encadeado, 1982–1984 = 100). O índice CPI de cada ano é apresentado como uma média anual. Assim, embora os cálculos subjacentes de preços reais não utilizem números arredondados, não se devem considerar precisos ao dólar, devendo, em geral, ser tidos como precisos apenas dentro de uma margem de vários pontos percentuais. Para máquinas criadas com moedas que não o dólar, as flutuações das taxas de câmbio acrescentam mais alguns pontos percentuais de incerteza.

Sempre que existirem vários preços de retalho para uma determinada máquina num dado ano, são preferidos aqui os preços mais baixos de mercado aberto, de forma a refletir o melhor desempenho-preço disponível nesse ano. Um ponto de moderada incomensurabilidade é que, antes de meados da década de 1990, quase toda a computação era feita através de computadores discretos com capacidade de atualização limitada. Como tal, os preços por unidade incluíam inevitavelmente componentes além do próprio processador, como o disco rígido e o monitor. Em contraste, é hoje comum os chips serem vendidos separadamente, sendo viável para os utilizadores de retalho ligarem vários CPUs/GPUs entre si para tarefas de maior intensidade computacional. Como resultado, a avaliação dos preços dos chips constitui agora um melhor indicador do desempenho-preço da computação do que a inclusão de componentes não essenciais ao processamento — embora isso exagere ligeiramente a melhoria do desempenho-preço durante a década de 1990.

O preço do Google Cloud TPU v4-4096 é aqui grosseiramente estimado com base em 4.000 horas de aluguer, para que seja aproximadamente comparável com o restante conjunto de dados, que desde os anos 1950 inclui exclusivamente

equipamentos disponíveis para compra. Esta estimativa subvaloriza dramaticamente o desempenho-preço para pequenos projetos de aprendizagem automática (machine learning), onde o acesso breve a grandes quantidades de poder computacional é útil, mas os custos de capital para aquisição seriam totalmente proibitivos. Este é um efeito importante e subestimado da revolução da computação na nuvem.

Os preços aqui citados referem-se ao custo de construção, preço de compra a retalho ou preço de aluguer, conforme aplicável. Outros custos separados — como entrega e instalação, eletricidade, manutenção, trabalho do operador, impostos e depreciação — são excluídos. Isto porque tais custos variam amplamente entre utilizadores e não podem ser eficazmente calculados como média para uma determinada máquina. Com base nas evidências disponíveis, contudo, esses fatores não alterariam significativamente a análise geral — e, na medida em que o fariam, tenderiam a reduzir o desempenho-preço das máquinas mais antigas, com maior exigência logística, aumentando assim a taxa aparente de progresso ao longo do gráfico (ver a página 166 “Desempenho-Preço da Computação, 1939–2023”). Assim, omitir esses custos é a opção mais conservadora do ponto de vista analítico.

Metodologia de Dados de Desempenho

“Computações por segundo” é uma métrica sintética derivada da junção de vários conjuntos de dados ao longo de oitenta e quatro anos. Como as capacidades computacionais destas máquinas não apenas melhoraram quantitativamente, mas também mudaram qualitativamente ao longo do tempo, é impossível conceber uma métrica rigorosamente comensurável para comparar o seu desempenho ao longo de todo o período em questão. Dito de outro modo, mesmo com tempo ilimitado, o computador Z2 de 1939 não conseguiria realizar tudo o que uma Unidade de

Processamento Tensorial (Tensor Processing Unit) de 2023 faz em frações de segundo — simplesmente não são comparáveis.

Assim, quaisquer tentativas de converter todas as estatísticas de desempenho deste conjunto de dados numa métrica totalmente comensurável seriam enganadoras. Por exemplo, embora Anders Sandberg e Nick Bostrom (2008) tenham estimado a equivalência entre milhões de instruções por segundo (MIPS) e milhões de operações em vírgula flutuante por segundo (MFLOPS), estas não escalam de forma linear, tornando este método inadequado para um conjunto de dados com uma amplitude de desempenho tão vasta como este. Converter artificialmente as classificações em FLOPS dos computadores mais recentes para IPS exageraria as suas capacidades reais de desempenho, enquanto classificar os computadores antigos em FLOPS resultaria numa subavaliação enganadora.

Do mesmo modo, as abordagens informacionais defendidas por Hans Moravec (1988) e William Nordhaus (2001) — embora úteis — não captam a evolução qualitativa do desempenho computacional e das suas aplicações. Por exemplo, a métrica MSOPS (milhões de operações padrão por segundo), de Nordhaus, prescreve uma proporção fixa de adições e multiplicações que não é realisticamente aplicável ao comparar computadores da década de 1960, utilizados para cálculos balísticos de foguetões, com GPUs e TPUs modernas que empregam cálculos de baixa precisão para aprendizagem automática (machine learning).

Por esta razão, a metodologia utilizada neste estudo prefere as métricas pelas quais as máquinas foram originalmente avaliadas. Isto significa que o paradigma mais permissivo de instruções por segundo (IPS) é preferido de 1939 (quando se refere a adições básicas no computador Z2 de Konrad Zuse) até à introdução do Pentium 4 em 2001, momento em que o paradigma de operações por segundo em vírgula flutuante (FLOPS) se tornou dominante na medição do desempenho computacional

moderno. Isto reflete o facto de que as aplicações da potência computacional mudaram ao longo do tempo e que, para alguns usos, o alto desempenho em vírgula flutuante é mais valorizado do que o desempenho em números inteiros ou outras métricas. A especialização também aumentou em algumas áreas. Por exemplo, GPUs e chips especializados em IA/aprendizagem profunda destacam-se nas suas funções com classificações elevadas de FLOPS, mas medir a sua capacidade de executar tarefas gerais de CPU, numa tentativa de comensurabilidade com chips generalistas mais antigos, seria enganador.

Este gráfico favorece as estatísticas de desempenho máximo alcançado ou, para máquinas mais antigas, deriva o melhor desempenho a partir de operações comparáveis a adições. Embora isso exceda o que estas máquinas realmente alcançavam, em média, na sua operação diária, representa uma forma de avaliação mais amplamente comensurável do que as estatísticas de desempenho médio, as quais dependem de muitos fatores externos à velocidade computacional bruta e que variam de forma irregular entre as máquinas.

Recursos Adicionais

Anders Sandberg and Nick Bostrom, *Whole Brain Emulation: A Roadmap*, technical report 2008-3, Future of Humanity Institute, Oxford University (2008), <https://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulationroadmap-report.pdf>.

William D. Nordhaus, “The Progress of Computing,” discussion paper 1324, Cowles Foundation (September 2001), <https://ssrn.com/abstract=285168>.

Hans Moravec, “MIPS Equivalents,” Field Robotics Center, Carnegie Mellon Robotics Institute, accessed December 2, 2021,

<https://web.archive.org/web/20210609052024/https://frc.ri.cmu.edu/~hpm/book97/ch3/processor.list>.

Hans Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988).

Máquinas, Dados e Fontes Listados

FONTES DE DADOS DO IPC (Índice de Preços no Consumidor)

“Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis, accessed April 20, 2023, <https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/inflation-calculator/consumer-priceindex-1913->; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 12, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIAUCSL>.

1939 Z2

Preço real: \$50,489.31

Cálculos por segundo: 0.33

Cálculos/segundo/dólar: 0.0000065

Fonte do preço: Jane Smiley, *The Man Who Invented the Computer: The Biography of John Atanasoff, Digital Pioneer* (New York: Doubleday, 2010), loc. 638, Kindle (v3.1_r1); “Purchasing Power Comparisons of Historical Monetary Amounts,” Deutsche Bundesbank, accessed December 20, 2021, <https://www.bundesbank.de/en/statistics/economic-activity-and-prices/producer-and-consumerprices/purchasing-power-comparisons-of-historical-monetary-amounts-795290#tar-5>; “Purchasing Power Equivalents of Historical Amounts in German Currencies,” Deutsche Bundesbank, 2021, <https://www.bundesbank.de/resource/blob/622372/154f0fc435da99ee935666983a5146a2/mL/purchasing-power-equivalents-data.pdf>; Lawrence H. Officer, “Exchange Rates,” in *Historical Statistics of the United States, Millennial Edition*, ed. Susan B. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002), reproduced in Harold Marcuse, “Historical Dollar-to-Marks Currency Conversion Page,” University of California, Santa Barbara, updated October 7, 2018, <https://marcuse.faculty.history.ucsb.edu/projects/currency.htm>; “Euro to US Dollar Spot Exchange Rates for 2020,” Exchange Rates UK, accessed December 20, 2021, <https://www.exchangerates.org.uk/EUR-USD-spot-exchange-rates-history-2020.html>. Em termos de poder de compra, 7.000 reichsmarks equivaliam a cerca de 30.100 euros em 2020. Isto equivale a uma média de 40.124 dólares americanos no início de 2023. Isto tem a vantagem de evitar o problema de comensurabilidade imposto pelas diferenças de poder de compra entre a Alemanha nazi e os Estados Unidos. Mas tem a desvantagem de se focar nos níveis de preços, que foram em grande parte definidos pelo governo totalitário, com o racionamento e as transações no mercado negro a limitarem a relevância dos preços nominais. À taxa de câmbio, 7.000 reichsmarks em 1939 valiam em média 2.800 dólares, o que equivale a 60.853 dólares no início de 2023. Isto tem a vantagem de evitar distorções da economia de guerra totalitária da Alemanha, mas a desvantagem de introduzir incerteza devido ao poder de compra diferente entre as duas moedas. Como as vantagens e desvantagens de ambos os valores são complementares e não existe um princípio

claro para julgar qual é o mais representativo da verdade básica relevante, este gráfico utiliza a média dos dois: 50.489 dólares.

Fonte de desempenho: Horst Zuse, “Z2,” Horst-Zuse.Homepage.t-online.de, accessed December 20, 2021, <http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/z2.html>.

1941 Z3

Preço real: \$136,849.13

Cálculos por segundo: 1.25

Cálculos/segundo/dólar: 0.0000091

Fonte do preço: Jack Copeland and Giovanni Sommaruga, “The Stored-Program Universal Computer: Did Zuse Anticipate Turing and von Neumann?”, in Turing’s Revolution: The Impact of His Ideas About Computability, ed. Giovanni Sommaruga and Thomas Strahm (Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016; corrected 2021 publication), 53, https://www.google.com/books/edition/Turing_s_Revolution/M8ZyCwAAQBAJ; “Purchasing Power Comparisons of Historical Monetary Amounts,” Deutsche Bundesbank, accessed December 20, 2021, <https://www.bundesbank.de/en/statistics/economic-activity-and-prices/producer-and-consumerprices/purchasing-power-comparisons-of-historical-monetary-amounts-795290#tar-5>; “Purchasing Power Equivalents of Historical Amounts in German Currencies,” Deutsche Bundesbank, 2021, <https://www.bundesbank.de/resource/blob/622372/154f0fc435da99ee93566698>

[3a5146a2/mL/purchasing-power-equivalents-data.pdf](#); Lawrence H. Officer, “Exchange Rates,” in *Historical Statistics of the United States*, Millennial Edition, ed. Susan B. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002), reproduced in Harold Marcuse, “Historical Dollar-to-Marks Currency Conversion Page,” University of California, Santa Barbara, updated October 7, 2018, <https://marcuse.faculty.history.ucsb.edu/projects/currency.htm>; “Euro to US Dollar Spot Exchange Rates for 2020,” Exchange Rates UK, accessed December 20, 2021, <https://www.exchangerates.org.uk/EUR-USD-spot-exchange-rates-history-2020.html>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis, accessed October 11, 2021, <https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/inflation-calculator/consumer-priceindex-1913->. Em termos de poder de compra, 20.000 reichsmarks equivaliam a cerca de 82.000 euros em 2020. Isto equivale a uma média de 109.290 dólares americanos no início de 2023. Isto tem a vantagem de evitar o problema de comensurabilidade imposto pelas diferenças de poder de compra entre a Alemanha nazi e os Estados Unidos. Mas tem a desvantagem de se focar nos níveis de preços, que foram em grande parte definidos pelo governo totalitário, com o racionamento e as transações no mercado negro a limitarem a relevância dos preços nominais. À taxa de câmbio, 20.000 reichsmarks em 1941 valiam em média 8.000 dólares, o que equivale a 164.408 dólares no início de 2023. Isto tem a vantagem de evitar distorções da economia de guerra totalitária da Alemanha, mas a desvantagem de introduzir incerteza devido ao poder de compra diferente entre as duas moedas. Como as vantagens e desvantagens de ambos os valores são complementares e não existe um princípio claro para julgar qual é o mais representativo da verdade básica relevante, este gráfico utiliza a média dos dois: 136.849 dólares.

Fonte de desempenho: Horst Zuse, “Z3,” Horst-Zuse.Homepage.t-online.de, accessed December 20, 2021, <http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/z3-detail.html>.

1943 COLOSSUS MARK 1

Preço real: \$33,811,510.61

Cálculos por segundo: 5,000

Cálculos/segundo/dólar: 0.00015

Fonte do preço: Chris Smith, “Cracking the Enigma Code: How Turing’s Bombe Turned the Tide of WWII,” BT, November 2, 2017, <http://web.archive.org/web/20180321035325/http://home.bt.com/tech-adgets/cracking-the-enigmacode-how-turings-bombe-turned-the-tide-of-wwii-11363990654704>; Jack Copeland (computing history expert), email to author, January 12, 2018; “Inflation Calculator,” Bank of England, January 20, 2021, <https://www.bankofengland.co.uk/monetary-policy/inflation/inflation-calculator>; “Historical Rates for the GBP/USD Currency Conversion on 01 July 2020 (01/07/2020),” Pound Sterling Live, accessed November 11, 2021, <https://www.poundsterlinglive.com/best-exchangerates/british-pound-to-us-dollar-exchange-rate-on-2020-07-01>. Não existem números de custo unitário disponíveis para o Colossus, uma vez que não foi construído para fins comerciais. Sabemos que as primeiras máquinas Bombe foram construídas a um custo de cerca de 100.000 libras cada. Embora não existam números precisos e desclassificados disponíveis sobre a construção do Colossus, o especialista em história da computação Jack Copeland sugere, como uma aproximação muito grosseira, que os seus custos foram cerca de cinco vezes superiores aos de uma única bomba. Isto corresponde a 23.314.516 libras em libras esterlinas de 2020, ou 33.811.510 dólares americanos do início de 2023. Tenha em mente que, devido à incerteza das

estimativas subjacentes, apenas os dois primeiros dígitos significativos devem ser considerados significativos.

Fonte de desempenho: B. Jack Copeland, ed., *Colossus: The Secrets of Bletchley Park's Codebreaking Computers* (Oxford, UK: Oxford University Press, 2010), 282.

1946 ENIAC

Preço real: \$11,601,846.15

Cálculos por segundo: 5,000

Cálculos/segundo/dólar: 0.00043

Fonte do preço: Martin H. Weik, *A Survey of Domestic Electronic Digital Computing Systems*, report no. 971 (Aberdeen Proving Ground, MD: Ballistic Research Laboratories, December 1955), 42, <https://books.google.com/books?id=-BPSAAAAMAAJ>.

Fonte do desempenho: Brendan I. Koerner, “How the World’s First Computer Was Rescued from the Scrap Heap,” *Wired*, November 25, 2014, <https://www.wired.com/2014/11/eniac-unearthed>.

1949 BINAC

Preço real: \$3,523,451.43

Cálculos por segundo: 3,500

Cálculos/segundo/dólar: 0.00099

Fonte do preço: William R. Nester, *American Industrial Policy: Free or Managed Markets?* (New York: St. Martin's, 1997), 106, https://books.google.com/books?id=hCi_DAAAQBAJ.

Fonte do desempenho: Eckert-Mauchly Computer Corp., *The BINAC* (Philadelphia: Eckert-Mauchly Computer Corp., 1949), 2, <http://s3data.computerhistory.org/brochures/eckertmauchly.binac.1949.102646200.pdf>.

1953 UNIVAC 1103

Preço real: \$10,356,138.62

Cálculos por segundo: 50,000

Cálculos/segundo/dólar: 0.0048

Fonte do preço: Martin H. Weik, *A Third Survey of Domestic Electronic Digital Computing Systems*, report no. 1115 (Aberdeen, MD: Ballistic Research Laboratories, March 1961), 913, http://web.archive.org/web/20160403031739/http://www.textfiles.com/bitsavers/pdf/brl/compSurvey_Mar1961/brlReport1115_0900.pdf; https://bitsavers.org/pdf/brl/compSurvey_Mar1961/brlReport1115_0000.pdf.

Fonte de desempenho: Martin H. Weik, *A Third Survey of Domestic Electronic Digital Computing Systems*, report no. 1115 (Aberdeen, MD: Ballistic Research Laboratories, March 1961), 906, http://web.archive.org/web/20160403031739/http://www.textfiles.com/bitsavers/pdf/brl/compSurvey_Mar1961/brlReport1115_0900.pdf.

1959 DEC PDP-1

Preço real: \$1,239,649.32

Cálculos por segundo: 100,000

Cálculos/segundo/dólar: 0.081

Fonte do preço: “PDP 1 Price List,” Digital Equipment Corporation, February 1, 1963, https://www.computerhistory.org/pdp-1/_media/pdf/DEC.pdp_1.1963.102652408.pdf.

Fonte de desempenho: Digital Equipment Corporation, PDP-1 Handbook (Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1963), 10, http://s3data.computerhistory.org/pdp-1/DEC.pdp_1.1963.102636240.pdf.

1962 DEC PDP-4

Preço real: \$647,099.67

Cálculos por segundo: 62,500

Cálculos/segundo/dólar: 0.097

Fonte do preço: Digital Equipment Corporation, *Nineteen Fifty-Seven to the Present* (Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1978), 3, [http://s3data.computerhistory.org/pdp-1/dec.digital_1957_to_the_present_\(1978\).1957-1978.102630349.pdf](http://s3data.computerhistory.org/pdp-1/dec.digital_1957_to_the_present_(1978).1957-1978.102630349.pdf).

Fonte de desempenho: Digital Equipment Corporation, PDP-4 Manual (Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1962), 18, 57, <http://gordonbell.azurewebsites.net/digital/pdp%204%20manual%201962.pdf>.

1965 DEC PDP-8

Preço real: \$172,370.29

Cálculos por segundo: 312,500

Cálculos/segundo/dólar: 1.81

Fonte do preço: Tony Hey and Gyuri Pápay, *The Computing Universe: A Journey Through a Revolution* (New York: Cambridge University Press, 2015), 165, <https://books.google.com/books?id=q4FIBQAAQBAJ>.

Fonte de desempenho: Digital Equipment Corporation, PDP-8 (Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1965), 10, <http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2009/11/102683307.05.01.acc.pdf>.

1969 DATA GENERAL NOVA

Preço real: \$65,754.33

Cálculos por segundo: 169,492

Cálculos/segundo/dólar: 2.58

Fonte do preço: “Timeline of Computer History—Data General Corporation Introduces the Nova Minicomputer,” Computer History Museum, accessed November 10, 2021, <https://www.computerhistory.org/timeline/1968>.

Fonte de desempenho: NOVA brochure, Data General Corporation, 1968, 12, <http://s3data.computerhistory.org/brochures/dgc.nova.1968.102646102.pdf>.

1973 INTELLEC 8

Preço real: \$16,291.71

Cálculos por segundo: 80,000

Cálculos/segundo/dólar: 4.91

Fonte do preço: “Intellec 8,” Centre for Computing History, accessed November 10, 2021, <http://www.computinghistory.org.uk/det/3366/intellec-8>.

Fonte de desempenho: Intel, *Intellect 8 Reference Manual*, rev. 1 (Santa Clara, CA: Intel, 1974), xxxxiii, https://archive.org/details/bitsavers_intelMCS8InceManualRev1Jun74_14022374.

1975 ALTAIR 8800

Preço real: \$3,481.85

Cálculos por segundo: 500,000

Cálculos/segundo/dólar: 144

Fonte do preço: “MITS Altair 8800: Price List,” CTI Data Systems, July 1, 1975, http://vtda.org/docs/computing/DataSystems/MITS_Altair8800_PriceList01Jul75.pdf.

Fonte de desempenho: MITS, *Altair 8800 Operator’s Manual* (Albuquerque, NM: MITS, 1975), 21, 90, <http://www.classiccmp.org/dunfield/altair/d/88opman.pdf>.

1984 APPLE MACINTOSH

Preço real: \$7,243.62

Cálculos por segundo: 1,600,000

Cálculos/segundo/dólar: 221

Fonte do preço: Regis McKenna Public Relations, “Apple Introduces Macintosh Advanced Personal Computer,” press release, January 24, 1984, <https://web.stanford.edu/dept/SUL/sites/mac/primary/docs/pr1.html>.

Fonte de desempenho: Motorola, Motorola Semiconductor Master Selection Guide, rev. 10 (Chicago: Motorola, 1996), 2.2-2, http://www.bitsavers.org/components/motorola/_catalogs/1996_Motorola_Master_Selection_Guide.pdf.

1986 COMPAQ DESKPRO 386 (16 MHZ)

Preço real: \$17,886.96

Cálculos por segundo: 4,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 224

Fonte do preço: Peter H. Lewis, “Compaq’s Gamble on an Advanced Chip Pays Off,” *New York Times*, September 20, 1987, <https://www.nytimes.com/1987/09/20/business/the-executive-computercompaq-s-gamble-on-an-advanced-chip-pays-off.html>.

Fonte de desempenho: Peter H. Lewis, “Compaq’s Gamble on an Advanced Chip Pays Off,” *New York Times*, September 20, 1987, <https://www.nytimes.com/1987/09/20/business/the-executive-computercompaq-s-gamble-on-an-advanced-chip-pays-off.html>.

1987 PC’S LIMITED 386 (16 MHZ)

Preço real: \$11,946.43

Cálculos por segundo: 4,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 335

Fonte do preço: Peter H. Lewis, “Compaq’s Gamble on an Advanced Chip Pays Off,” *New York Times*, September 20, 1987, <https://www.nytimes.com/1987/09/20/business/the-executive-computercompaq-s-gamble-on-an-advanced-chip-pays-off.html>.

Fonte de desempenho: Peter H. Lewis, “Compaq’s Gamble on an Advanced Chip Pays Off,” *New York Times*, September 20, 1987, <https://www.nytimes.com/1987/09/20/business/the-executive-computercompaq-s-gamble-on-an-advanced-chip-pays-off.html>.

1988 COMPAQ DESKPRO 386/25

Preço real: \$20,396.30

Cálculos por segundo: 8,500,000

Cálculos/segundo/dólar: 417

Fonte do preço: “Compaq Deskpro 386/25 Type 38,” Centre for Computing History, accessed November 10, 2021,

<http://www.computinghistory.org.uk/det/16967/Compaq-Deskpro-386-25-Type-38>.

Fonte de desempenho: Jeffrey A. Dubin, *Empirical Studies in Applied Economics* (New York: Springer Science+Business Media, 2012), 72–73, https://www.google.com/books/edition/Empirical_Studies_in_Applied_Economics/41_IBwAAQBAJ.

1990 MT 486DX

Preço real: \$11,537.40

Cálculos por segundo: 20,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 1,733

Fonte do preço: Bruce Brown, “Micro Telesis Inc. MT 486DX,” *PC Magazine* 9, no. 15 (September 11, 1990), 140, <https://books.google.co.uk/books?id=NsgmyHnvDmUC>.

Fonte de desempenho: Owen Linderholm, “Intel Cuts Cost, Capabilities of 9486; Will Offer Companion Math Chip,” *Byte*, June 1991, 26, <https://worldradiohistory.com/hd2/IDXConsumer/Archive-Byte-IDX/IDX/90s/Byte-1991-06-IDX-32.pdf>.

1992 GATEWAY 486DX2/66

Preço real: \$6,439.31

Cálculos por segundo: 54,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 8,386

Fonte do preço: Jim Seymour, "The 486 Buyers' Guide," *PC Magazine* 12, no. 21 (December 7, 1993), 226, <https://books.google.com/books?id=7k7q-wS0t00C>.

Fonte de desempenho: Mike Feibus, "P6 and Beyond," *PC Magazine* 12, no. 12 (June 29, 1993), 164, <https://books.google.co.uk/books?id=gCfzPMoPJWgC&pg=PA164>.

1994 PENTIUM (75 MHZ)

Preço real: \$4,477.91

Cálculos por segundo: 87,100,000

Cálculos/segundo/dólar: 19,451

Fonte do preço: Bob Francis, "75-MHz Pentiums Deskbound," *Info World* 16, no. 44 (October 31, 1994), 5, <https://books.google.com/books?id=cTgEAAAAMBAJ&pg=PA5>.

Performance source: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

1996 PENTIUM PRO (166 MHZ)

Preço real: \$3,233.73

Cálculos por segundo: 242,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 74,836

Fonte do preço: Michael Slater, “Intel Boosts Pentium Pro to 200 MHz,” *Microprocessor Report* 9, no. 15 (November 13, 1995), 2, <https://www.cl.cam.ac.uk/~pb22/test.pdf>.

Fonte de desempenho: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

1997 MOBILE PENTIUM MMX (133 MHZ)

Preço real: \$533.76

Cálculos por segundo: 184,092,000

Cálculos/segundo/dólar: 344,898

Fonte do preço: “Intel Mobile Pentium MMX 133 MHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, <https://web.archive.org/web/20140912204405/http://www.cpuworld.com/CPUs/Pentium/Intel-Mobile%20Pentium%20MMX%20133%20-%20FV80503133.html>.

Fonte de desempenho: “Intel Mobile Pentium MMX 133 MHz vs Pentium MMX 200 MHz,” CPUWorld, accessed November 11, 2021, [http://www.cpuworld.com/Compare/347/Intel_Mobile_Pentium_MMX_133_MHz_\(FV80503133\)_vs_Intel_Pentium_MMX_200_MHz_\(FV80503200\).html](http://www.cpuworld.com/Compare/347/Intel_Mobile_Pentium_MMX_133_MHz_(FV80503133)_vs_Intel_Pentium_MMX_200_MHz_(FV80503200).html); Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>. De acordo com os testes da CPU-World, o Mobile Pentium MMX 133 MHz atingiu 69,9% do desempenho (Dhrystone 2.1 VAX MIPS) do Pentium MMX 200 MHz. Para este último, foram 276 MIPS nos testes de Roy Longbottom, correspondendo a uma estimativa de 192.924.000 instruções por segundo para o primeiro.

1998 PENTIUM II (450 MHZ)

Preço real: \$1,238.05

Cálculos por segundo: 713,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 575,905

Fonte do preço: “Intel Pentium II 450 MHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, <https://web.archive.org/web/20150428111439/http://www.cpu->

[world.com:80/CPU%20Pentium-II/Intel-Pentium%20II%20450%20-%2080523PY450512PE%20\(B80523P450512E\).html](http://world.com:80/CPU%20Pentium-II/Intel-Pentium%20II%20450%20-%2080523PY450512PE%20(B80523P450512E).html).

Fonte de desempenho: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

1999 PENTIUM III (450 MHZ)

Preço real: \$898.06

Cálculos por segundo: 722,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 803,952

Fonte do preço: “Intel Pentium III 450 MHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, [https://web.archive.org/web/20140831044834/http://www.cpu-world.com/CPU%20Pentium-III/Intel-Pentium%20III%20450%20-%2080525PY450512%20\(BX80525U450512%20-%20BX80525U450512E\).html](https://web.archive.org/web/20140831044834/http://www.cpu-world.com/CPU%20Pentium-III/Intel-Pentium%20III%20450%20-%2080525PY450512%20(BX80525U450512%20-%20BX80525U450512E).html).

Fonte de desempenho: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

2000 PENTIUM III (1.0 GHZ)

Preço real: \$1,734.21

Cálculos por segundo: 1,595,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 919,725

Fonte do preço: “Intel Pentium III 1BGHz (Socket 370) Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, [https://web.archive.org/web/20160529005115/http://www.cpuworld.com/CPUs/Pentium-III/Intel-Pentium%20III%201000%20-%20RB80526PZ001256%20\(BX80526C1000256\).html](https://web.archive.org/web/20160529005115/http://www.cpuworld.com/CPUs/Pentium-III/Intel-Pentium%20III%201000%20-%20RB80526PZ001256%20(BX80526C1000256).html).

Fonte de desempenho: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

2001 PENTIUM 4 (1700 MHZ)

Preço real: \$599.55

Cálculos por segundo: 1,843,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 3,073,978

Fonte do preço: “Intel Pentium 4 1.7 GHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, <https://web.archive.org/web/20150429131339/http://www.cpu->

[world.com/CPU/Pentium_4/Intel-Pentium%204%201.7%20GHz%20-%20RN80528PC029G0K%20\(BX80528JK170G\).html](http://world.com/CPU/Pentium_4/Intel-Pentium%204%201.7%20GHz%20-%20RN80528PC029G0K%20(BX80528JK170G).html).

Fonte de desempenho: Roy Longbottom, “Dhrystone Benchmark Results on PCs,” Roy Longbottom’s PC Benchmark Collection, February 2017, <http://www.roylongbottom.org.uk/dhrystone%20results.htm>.

2002 XEON (2.4 GHZ)

Preço real: \$392.36

Cálculos por segundo: 2,480,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 6,323,014

Fonte do preço: “Intel Xeon 2.4 GHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, [https://web.archive.org/web/20150502024039/http://www.cpu-world.com:80/CPU/Xeon/Intel-Xeon%202.4%20GHz%20-%20RK80532KE056512%20\(BX80532KE2400D%20-%20BX80532KE2400DU\).html](https://web.archive.org/web/20150502024039/http://www.cpu-world.com:80/CPU/Xeon/Intel-Xeon%202.4%20GHz%20-%20RK80532KE056512%20(BX80532KE2400D%20-%20BX80532KE2400DU).html).

Fonte de desempenho: Jack J. Dongarra, “Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software,” technical report CS-89-85, University of Tennessee, Knoxville, February 5, 2013, 7–29, <http://www.icl.utk.edu/files/publications/2013/icl-utk-625-2013.pdf>. Os dados de Dongarra (2013) são aqui utilizados em vez dos dados de Longbottom (2017) porque, por volta de 2002, as classificações MFLOPS (Milhões de Operações de Ponto

Flutuante por Segundo) tornaram-se o padrão de desempenho dominante e estes dados são mais consistentes e comensuráveis com as classificações de máquinas subsequentes. A maioria dos dados extraídos de Dongarra utiliza a métrica “TPP (Teste de Melhor Esforço em Processamento Paralelo) Best Effort”, que é mais compatível com os dados de desempenho dos primeiros computadores. Uma vez que os dados de melhor esforço do TPP não estão disponíveis para este CPU (Unidade Central de Processamento), são aqui aproximados utilizando a relação média de MFLOPS de melhor esforço do TPP para MFLOPS do “LINPACK Benchmark” (Benchmark LINPACK — Teste de Desempenho de Sistemas Lineares) no conjunto de dados. Para os outros quinze computadores single-core não equipados com EM64T (Extensão de Memória 64-Bit da Tecnologia Xeon) Xeon testados pela Dongarra, o valor de Melhor Esforço do TPP é, em média, 2,559 vezes superior ao valor do benchmark LINPACK. Além disso, os dados são calculados com base na média dos resultados para este CPU de duas combinações diferentes de sistema operativo/compilador.

2004 PENTIUM 4 (3.0 GHZ)

Preço real: \$348.12

Cálculos por segundo: 3,181,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 9,137,738

Fonte do preço: “Intel Pentium 4 3 GHz Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, <https://web.archive.org/web/20171005171131/http://www.cpu->

[world.com/CPUs/Pentium_4/Intel-Pentium%204%203.0%20GHz%20-%20RK80546PG0801M%20\(BX80546PG3000E\).html](http://world.com/CPUs/Pentium_4/Intel-Pentium%204%203.0%20GHz%20-%20RK80546PG0801M%20(BX80546PG3000E).html).

Fonte de desempenho: Jack J. Dongarra, “Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software,” technical report CS-89-85, University of Tennessee, Knoxville, February 5, 2013, 10, <http://www.icl.utk.edu/files/publications/2013/icl-utk-625-2013.pdf>. Os dados de Dongarra (2013) são aqui utilizados em vez dos dados de Longbottom (2017) porque, a partir do Pentium 4, as classificações MFLOPS (Milhões de Operações de Ponto Flutuante por Segundo) tornaram-se o padrão de desempenho dominante e estes dados são mais consistentes e comensuráveis com as classificações das máquinas subsequentes.

2005 PENTIUM 4 662 (3.6 GHZ)

Preço real: \$619.36

Cálculos por segundo: 7,200,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 11,624,919

Fonte do preço: “Intel Pentium 4 662 Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, https://web.archive.org/web/20150710050435/http://www.cpu-world.com:80/CPUs/Pentium_4/Intel-Pentium%204%20662%203.6%20GHz%20-%20HH80547PG1042MH.html.

Fonte de desempenho: “Export Compliance Metrics for Intel Microprocessors Intel Pentium Processors,” Intel, April 1, 2018, 4, <http://web.archive.org/web/20180601044504/https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/processors/APP-for-Intel-Pentium-Processors.pdf>.

2006 CORE 2 DUO E6300

Preço real: \$273.82

Cálculos por segundo: 14,880,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 54,342,788

Fonte do preço: “Intel Core 2 Duo E6300 Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, [https://web.archive.org/web/20160605085626/http://www.cpu-world.com/CPUs/Core_2/Intel-Core%20%20Duo%20E6300%20HH80557PH0362M%20\(BX80557E6300\).html](https://web.archive.org/web/20160605085626/http://www.cpu-world.com/CPUs/Core_2/Intel-Core%20%20Duo%20E6300%20HH80557PH0362M%20(BX80557E6300).html).

Fonte de desempenho: “Export Compliance Metrics for Intel Microprocessors Intel Pentium Processors,” Intel, April 1, 2018, 12, <http://web.archive.org/web/20180601044310/https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/processors/APP-for-Intel-Core-Processors.pdf>.

2007 PENTIUM DUAL-CORE E2180

Preço real: \$122.23

Cálculos por segundo: 16,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 130,899,970

Fonte do preço: “Intel Pentium E2180 Specifications,” CPU-World, accessed November 10, 2021, [https://web.archive.org/web/20170610094616/http://www.cpu-world.com/CPUs/Pentium_Dual-Core/Intel-Pentium%20Dual-Core%20E2180%20HH80557PG0411M%20\(BX80557E2180%20-%20BXC80557E2180\).html](https://web.archive.org/web/20170610094616/http://www.cpu-world.com/CPUs/Pentium_Dual-Core/Intel-Pentium%20Dual-Core%20E2180%20HH80557PG0411M%20(BX80557E2180%20-%20BXC80557E2180).html).

Fonte de desempenho: “Export Compliance Metrics for Intel Microprocessors Intel Pentium Processors,” Intel, April 1, 2018, 7, <http://web.archive.org/web/20180601044504/https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/processors/APP-for-Intel-Pentium-Processors.pdf>.

2008 GTX 285

Preço real: \$502.98

Cálculos por segundo: 708,500,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 1,408,604,222

Fonte do preço: “NVIDIA GeForce GTX 285,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-285.c238>.

Fonte de desempenho: “NVIDIA GeForce GTX 285,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-285.c238>.

2010 GTX 580

Preço real: \$690.15

Cálculos por segundo: 1,581,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 2,290,796,652

Fonte do preço: “NVIDIA GeForce GTX 580,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-580.c270>.

Fonte de desempenho: “NVIDIA GeForce GTX 580,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-580.c270>.

2012 GTX 680

Preço real: \$655.59

Cálculos por segundo: 3,250,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 4,957,403,270

Fonte do preço: “NVIDIA GeForce GTX 680,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-680.c342> [inactive].

Fonte de desempenho: “NVIDIA GeForce GTX 680,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-680.c342>.

2015 TITAN X (MAXWELL 2.0)

Preço real: \$1,271.50

Cálculos por segundo: 6,691,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 5,262,273,757

Fonte do preço: “NVIDIA GeForce GTX TITAN X,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-titan-x.c2632>.

Fonte de desempenho: “NVIDIA GeForce GTX TITAN X,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/geforce-gtx-titan-x.c2632>.

2016 TITAN X (PASCAL)

Preço real: \$1,506.98

Cálculos por segundo: 10,974,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 7,282,098,756

Fonte do preço: “NVIDIA TITAN X Pascal,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/titan-x-pascal.c2863>.

Fonte de desempenho: “NVIDIA TITAN X Pascal,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/titan-x-pascal.c2863>.

2017 AMD RADEON RX 580

Preço real: \$281.83

Cálculos por segundo: 6,100,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 21,643,984,475

Fonte do preço: “AMD Radeon RX 580,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/radeon-rx-580.c2938>.

Fonte de desempenho: “AMD Radeon RX 580,” TechPowerUp, accessed November 10, 2021, <https://www.techpowerup.com/gpu-specs/radeon-rx-580.c2938>.

2021 GOOGLE CLOUD TPU V4-4096

Preço real: \$22,796,129.30

Cálculos por segundo: 1,100,000,000,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 48,253,805,968

Fonte do preço: Sempre que possível, este gráfico utiliza os custos de compra de equipamento no mercado aberto como preços, o que reflete melhor o progresso geral do nível de civilização na computação preço-desempenho. No entanto, os TPUs da Google Cloud não são vendidos externamente e são disponibilizados apenas por aluguer temporário. Contar os custos de aluguer por hora como preço refletiria uma relação preço-desempenho incrivelmente elevada e, embora fosse preciso para alguns projetos muito pequenos (por exemplo, tarefas curtas de aprendizagem automática para as quais a compra de hardware não seria sensata), não refletiria a maioria dos casos de utilização reais. Portanto, como uma aproximação muito grosseira, podemos utilizar 4000 horas de tempo de trabalho como um equivalente funcional ao hardware adquirido, com base na utilização plausivelmente representativa e nos ciclos comuns de substituição de produtos. (Embora seja difícil utilizar com segurança uma estimativa tão especulativa para uma comparação de hardware do mesmo ano, o longo período de tempo e a escala logarítmica deste gráfico resultam numa tendência geral que é relativamente insensível a pressupostos metodológicos substancialmente diferentes para qualquer ponto de dados fornecido.) Na prática, os contratos de aluguer de cloud estão sujeitos a negociação e podem variar significativamente com base nas necessidades de um determinado cliente e projeto. Mas, como um número plausivelmente representativo, o TPU v4-4096 da Google pode ser alugado por 5.120 dólares por hora, correspondendo a 20,48 milhões de dólares pela quantidade de tempo de computação que um proprietário de hardware poderia ter investido num processador adquirido. As estimativas de preços não são oficiais à data da redação deste texto e foram

extrapoladas a partir de informações públicas e de conversas com vários profissionais do setor. É provável que a Google tenha divulgado informações mais detalhadas sobre os preços até ao momento desta publicação, mas isto também é impreciso, uma vez que fatores específicos de cada projeto podem desempenhar um papel substancial na definição dos preços. Veja Google Cloud, “Cloud TPU,” Google, accessed December 10, 2021, <https://cloud.google.com/tpu>; Gestor de projetos da Google, conversas telefônicas com o autor, Dezembro 2021.

Fonte de desempenho: Tao Wang and Aarush Selvan, “Google Demonstrates Leading Performance in Latest MLPerf Benchmarks,” Google Cloud, June 30, 2021, <https://cloud.google.com/blog/products/ai-machine-learning/google-wins-mlperf-benchmarks-with-tpu-v4>; Samuel K. Moore, “Here’s How Google’s TPU v4 AI Chip Stacked Up in Training Tests,” IEEE Spectrum, May 19, 2021, <https://spectrum.ieee.org/heres-how-googles-tpu-v4-ai-chip-stacked-up-in-training-tests>.

2023 GOOGLE CLOUD TPU V5E

Preço real: \$3,016.46

Cálculos por segundo: 393,000,000,000,000

Cálculos/segundo/dólar: 130,285,276,114

Fonte do preço: A Google Cloud estima que a TPU v5e atinja uma relação preço-desempenho 2,7 vezes superior à TPU v4, medida no benchmark MLPerf™ v3.1 Inference Closed, que é o padrão de ouro para executar grandes modelos de linguagem. Para maximizar a compatibilidade com a estimativa do TPU v4-4096, que

se aproxima do preço plausível dos contratos de grande volume, o preço do TPU v5e é aqui estimado por chip com base na melhoria conhecida do preço-desempenho. Se, em vez disso, utilizarmos apenas o preço publicamente disponível do TPU v5e de 1,20 dólares por chip-hora, o preço-desempenho seria de aproximadamente 82 mil milhões de computações por segundo por dólar constante — mas, como os descontos são comuns nos grandes contratos de aluguer de cloud, isso ficaria muito aquém da realidade. Veja Amin Vahdat and Mark Lohmeyer, “Helping You Deliver High-Performance, Cost-Efficient AI Inference at Scale with GPUs and TPUs,” Google Cloud, September 11, 2023, <https://cloud.google.com/blog/products/compute/performance-per-dollar-of-gpus-and-tpus-for-aiinference>.

Fonte de desempenho: Desempenho INT8 por chip. Veja Google Cloud, “System Architecture,” Google Cloud, accessed November 13, 2023, https://cloud.google.com/tpu/docs/system-architecture-tpuvm#tpu_v5e.

Notas

Capítulo 1

¹ Alan M. Turing, "Computing Machinery and Intelligence," *Mind* 59, no. 236 (October 1, 1950): 435, <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>.

Capítulo 2

¹ Alan M. Turing, "Computing Machinery and Intelligence," *Mind* 59, no. 236 (October 1, 1950): 435, <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>.

² Alex Shashkevich, "Stanford Researcher Examines Earliest Concepts of Artificial Intelligence, Robots in Ancient Myths," *Stanford News*, February 28, 2019, <https://news.stanford.edu/2019/02/28/ancient-myths-reveal-early-fantasies-artificial-life>.

³ John McCarthy et al., "A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence," conference proposal, August 31, 1955, <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>.

⁴ McCarthy et al., "Proposal for the Dartmouth Summer Research Project."

⁵ Martin Childs, "John McCarthy: Computer Scientist Known as the Father of AI," *The Independent*, November 1, 2011, <https://www.independent.co.uk/news/obituaries/john-mccarthy-computer-scientist-known-as-the-father-of-ai-62355307.html>; Nello Christianini, "The Road to Artificial Intelligence: A Case of Data Over Theory," *New Scientist*, October 26, 2016, <https://institutions.newscientist.com/article/mg23230971-200-the-irresistible-rise-of-artificial-intelligence>.

⁶ James Vincent, "Tencent Says There Are Only 300,000 AI Engineers Worldwide, but Millions Are Needed," *The Verge*, December 5, 2017, <https://www.theverge.com/2017/12/5/16737224/global-ai-talent-shortfall-tencent-report>.

⁷ Jean-Francois Gagne, Grace Kiser, and Yoan Mantha, *Global AI Talent Report 2019*, Element AI, April 2019, <https://ifgagne.ai/talent-2019>.

⁸ Daniel Zhang et al., *The AI Index 2022 Annual Report*, AI Index Steering Committee, Stanford Institute for Human-Centered AI, Stanford University, March 2022, 36, https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2022/03/2022-AI-Index-Report_Master.pdf; Nestor Maslej et al., *The AI Index 2023 Annual Report*, AI Index Steering Committee, Stanford Institute for Human-Centered AI, Stanford University, April 2023, 24, https://ainndex.stanford.edu/wp-content/uploads/2023/04/HAI_AI-Index-Report_2023.pdf.

⁹ Houve uma diminuição de 26,7 por cento no investimento corporativo entre 2021 e 2022, mas é provável que isso seja atribuível a tendências macroeconômicas cíclicas, e não a uma alteração na trajetória de longo prazo do compromisso corporativo com a IA. Ver Maslej et al., *AI Index 2023 Annual Report*, páginas 171 e 184.

¹⁰ Ray Kurzweil, *A Era das Máquinas Espirituais: Quando os Computadores Ultrapassam a Inteligência Humana* (New York: Penguin, 2000; first published by Viking, 1999), 313; Dale Jacquette, "Who's Afraid of the Turing Test?", *Behavior and Philosophy* 20/21 (1993): 72, <https://www.jstot.org/stable/27759284>.

- ¹¹ Katja Grace et al., “Viewpoint: When Will AI Exceed Human Performance? Evidence from AI Experts,” *Journal of Artificial Intelligence Research* 62 (July 2018): 729-54, <https://doi.org/10.1613/jair.1.11222>.
- ¹² Para mais informações sobre o raciocínio por trás da minha previsão e como ela se compara a uma ampla variedade de opiniões de especialistas em IA, consulte Ray Kurzweil, “A Wager on the Turing Test: Why I Think I Will Win,” KurzweilAI.net, April 9, 2002, <https://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-why-i-think-i-will-win>; Vincent C. Müller and Nick Bostrom, “Future Progress in Artificial Intelligence: A Survey of Expert Opinion,” in *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*, ed. Vincent C. Müller (Cham, Switzerland: Springer, 2016), 553-71, <https://philpapers.org/archive/MLLFPI.pdf>; Anthony Aguirre, “Date Weakly General AI Is Publicly Known,” Metaculus, accessed April 26, 2023, <https://www.metaculus.com/questions/3479/date-weakly-general-ai-system-is-devised>.
- ¹³ Aguirre, “Date Weakly General AI Is Publicly Known.”
- ¹⁴ Raffi Khatchadourian, “The Doomsday Invention,” *New Yorker*, November 23, 2015, <https://www.newyorker.com/magazine/2015/11/23/doomsday-invention-artificial-intelligence-nick-bostrom>.
- ¹⁵ A. Newell, J. C. Shaw, and H. A. Simon, “Report on a General Problem-Solving Program,” RAND P-1584, RAND Corporation, February 9, 1959, http://bitsavers.informatik.uni-stuttgart.de/pdf/rand/ipl/P-1584_Report_On_A_General_Problem-Solving_Program_Feb59.pdf. See the appendix for the sources used for all the cost-of-computation calculations in this book.
- ¹⁶ Digital Equipment Corporation, PDP-1 Handbook (Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1963), 10, http://s3data.computerhistory.org/pdp-1/DEC.pdp_1.1963.102636240.pdf.
- ¹⁷ Amin Vahdat and Mark Lohmeyer, “Enabling Next-Generation AI Workloads: Announcing TPU v5p and AI Hypercomputer,” Google Cloud, December 6, 2023, <https://cloud.google.com/blog/products/ai-machine-learning/introducing-cloud-tpu-v5p-and-ai-hypercomputer>.
- ¹⁸ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas em todos os cálculos relacionados com os custos de computação apresentados neste livro.
- ¹⁹ V. L. Yu et al., “Antimicrobial Selection by a Computer: A Blinded Evaluation by Infectious Diseases Experts,” *Journal of the American Medical Association* 242, no. 12 (September 21, 1979): 1279-82, <https://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/366606>.
- ²⁰ Bruce G. Buchanan and Edward Hance Shortliffe, eds., *Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1984); Edward Edelson, “Programmed to Think,” *MOSAIC* 11, no. 5 (September/October 1980): 22, <https://books.google.co.uk/books?id=PU79ZK2tXeAC>.
- ²¹ T. Grandon Gill, “Early Expert Systems: Where Are They Now?,” *MIS Quarterly* 19, nº 1 (March 1995): 51-81, <https://www.jstor.org/stable/249711>.
- ²² Para uma explicação breve e não técnica sobre por que o aprendizado de máquina reduz o problema do limite de complexidade, consulte Deepanker Saxena, “Machine Learning vs. Rules Based Systems,” Socure, August 6, 2018, <https://www.socure.com/blog/machine-learning-vs-rule-based-systems>.
- ²³ Cade Metz, “One Genius’ Lonely Crusade to Teach a Computer Common Sense,” *Wired*, March 24, 2016, <https://www.wired.com/2016/03/doug-lenat-artificial-intelligence-common-sense-engine>; “Frequently Asked Questions,” Cycorp, accessed November 20, 2021, <https://cyc.com/faq>.
- ²⁴ Para mais informações sobre o problema da caixa negra e a transparência na IA, consulte Will Knight, “The Dark Secret at the Heart of AI,” *MIT Technology Review*, April 11, 2017, <https://www.technologyreview.com/s/604087/the-dark-secret-at-the-heart-of-ai>; “AI Detectives Are Cracking Open the Black Box of Deep Learning,” *Science Magazine*, YouTube video, July 6, 2017, https://www.youtube.com/watch?v=gB_LabED68; Paul Voosen, “How AI Detectives Are Cracking Open the Black Box of Deep Learning,” *Science*, July 6, 2017, <https://doi.org/10.1126/science.aan7059>; Harry Shum, “Explaining AI,” al6z, YouTube video, January 16, 2020, https://www.youtube.com/watch?v=rl_L95qnVkJM; Future of Life Institute, “Neel Nanda

on What Is Going On Inside Neural Networks,” YouTube video, February 9, 2023, https://www.youtube.com/watch?v=mUhO6st6M_Q.

²⁵ Para uma excelente visão geral sobre interpretabilidade mecanicista, consulte o Future of Life Institute, “Neel Nanda on What Is Going On Inside Neural Networks.”

²⁶ Para mais informações sobre técnicas de aprendizagem automática com dados de treino imperfeitos, consulte Xander Steenbrugge, “An Introduction to Reinforcement Learning,” Arxiv Insights, YouTube video, April 2, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=JgvzyikgxFO>; Alan Joseph Bekker and Jacob Goldberger, “Training Deep Neural-Networks Based on Unreliable Labels,” *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (Shanghai, 2016), 2682-86, <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472164>; Nagarajan Natarajan et al., “Learning with Noisy Labels,” *Advances in Neural Information Processing Systems* 26 (2013), <https://papers.nips.cc/paper/5073-learning-with-noisy-labels>; David Rolnick et al., “Deep Learning Is Robust to Massive Label Noise,” arXiv:1705.10694y3 [cs.LG], February 26, 2018, <https://arxiv.org/pdf/1705.10694pdf>.

²⁷ Para obter mais informações sobre o Perceptron, as suas limitações e uma explicação mais detalhada de como certas redes neurais podem superá-las, consulte Marvin L. Minsky e Seymour A. Papert, *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990; reissue of 1988 expanded edition); Melanie Lefkowitz, “Professor’s Perceptron Paved the Way for AI — 60 Years Too Soon,” *Cornell Chronicle*, September 25, 2019, <https://news.cornell.edu/stories/2019/09/professors-perceptron-paved-way-ai-60-years-too-soon>; John Durkin, “Tools and Applications,” in *Expert Systems: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century*, ed. Cornelius T. Leondes (San Diego: Academic Press, 2002), 45, <https://books.google.co.uk/books?id=5kSamKhS560C>; “Marvin Minsky: The Problem with Perceptrons (121/151),” Web of Stories — Life Stories of Remarkable People, YouTube video, October 17, 2016, https://www.youtube.com/watch?v=QW_srPO-LrI; Heinz Mühlenbein, “Limitations of Multi-Layer Perceptron Networks: Steps Towards Genetic Neural Networks,” *Parallel Computing* 14, no. 3 (August 1990): 249-60, [https://doi-org/10.1016/0167-8191\(90\)90079-O](https://doi-org/10.1016/0167-8191(90)90079-O); Aniruddha Karajgi, “How Neural Networks Solve the XOR Problem,” *Towards Data Science*, November 4, 2020, <https://towardsdatascience.com/how-neural-networks-solve-the-xor-problem-59763136bdd7>.

²⁸ Consulte o apêndice para obter as fontes utilizadas em todos os cálculos relacionados com o custo de computação neste livro.

²⁹ Tim Fryer, “Da Vinci Drawings Brought to Life,” *Engineering & Technology* 14, no. 5 (May 21, 2019): 18, <https://eandt.theiet.org/content/articles/2019/05/da-vinci-drawings-brought-to-life>.

³⁰ Para uma linha temporal mais detalhada da vida na Terra e uma análise mais aprofundada da ciência subjacente, consulte Michael Marshall, “Timeline: The Evolution of Life,” *New Scientist*, July 14, 2009, <https://www.newscientist.com/article/dn17453>; Dyani Lewis, “Where Did We Come From? A Primer on Early Human Evolution,” *Cosmos*, June 9, 2016, <https://cosmosmagazine.com/palaeontology/where-did-we-come-from-a-primer-on-early-human-evolution>; John Hawks, “How Has the Human Brain Evolved?,” *Scientific American*, July 1, 2013, <https://www.scientificamerican.com/article/how-has-human-brain-evolved>; Laura Freberg, *Discovering Behavioral Neuroscience: An Introduction to Biological Psychology*, 4th ed. (Boston: Cengage Learning, 2018), 62-63, <https://books.google.co.uk/books?id=HhBEDwAAQBAJ>; Jon H. Kaas, Evolution of the Neocortex,” *Current Biology* 16, no. 21 (2006): R910-R914, [https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(06\)02290-1.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(06)02290-1.pdf); R. Glenn Northcutt, “Evolution of Centralized Nervous Systems: Two Schools of Evolutionary Thought,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, suppl. 1 (June 22, 2012 10626-33, <https://doi.org/10.1073/pnas.1201889109>.

³¹ Marshall, “Timeline: The Evolution of Life”; Holly C. Betts et al., “Integrated Genomic and Fossil Evidence Illuminates Life’s Early Evolution and Eukaryote Origin,” *Nature Ecology & Evolution* 2 (August 20, 2018): 1556-62, <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0644-x>; Elizabeth Pennisi, “Life May Have Originated on Earth 4 Billion Years Ago, Study of Controversial Fossils Suggests,” *Science*, December 18, 2017, <https://www.sciencemag.org/news/2017/12/life-may-have-originated-earth-4-billion-years-ago-study-controversiz-fossils-suggests>.

³² Ethan Siegel, “Ask Ethan: How Do We Know the Universe Is 13.8 Billion Years Old?,” *Big Think*, October 22, 2021, <https://bigthink.com/starts-with-a-bang/universe-13-8-billior-years>; Mike Wall, “The Big Bang: What Really Happened at Our

Universe's Birth?", Space.com, October 21, 2011, <https://www.space.com/13347-big-bang-origins-univers-birth.html>; Nola Taylor Reed, "How Old Is Earth?", Space.com, February 7, 2019, <https://www.space.com/24854-how-old-is-earth.html>.

³³ Marshall, "Timeline: The Evolution of Life."

³⁴ Marshall, "Timeline: The Evolution of Life."

³⁵ Freberg, *Discovering Behavioral Neuroscience*, 62-63; Kaas, "Evolution of the Neocortex"; R. Northcutt, "Evolution of Centralized Nervous Systems"; Frank Hirth, "On the Origin and Evolution of the Tripartite Brain," *Brain, Behavior and Evolution* 76, no. 1 (October 2010): 3-10, <https://doi.org/10.1159/000320218>.

³⁶ Kaas, "Evolution of the Neocortex."

³⁷ "Para dois explicadores cativantes sobre o funcionamento da seleção natural, consulte Hank Green, "Nature Selection; Crash Course Biology #14," CrashCourse, YouTube video, April 30, 2012, https://www.youtube.com/watch?v=alfTyFboC_M; Primer, "Simulating Natural Selection," YouTube video, November 14, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=0ZGbIKd0OXrM>.

³⁸ Suzana Herculano-Houzel, "Coordinated Scaling of Cortical and Cerebellar Numbers Neurons," *Frontiers in Neuroanatomy* 4, no. 12 (March 10, 2010), <https://doi.org/10.3389/fnana.2010.00012>.

³⁹ Para algumas explicações úteis sobre como isto funciona, consulta a Ainslie Johnstone, "The Amazing Phenomenon of Muscle Memory," *Medium*, Oxford University, December 14, 2017, <https://medium.com/oxford-university/the-amazing-phenomenon-of-muscle-memory-fblcc4c4726>; Sara Chodosh, "Muscle Memory Is Real, But It's Probably Not What You Think," *Popular Science*, January 25, 2019, <https://www.popsoci.com/what-is-muscle-memory>; Merim Bilalić, *The Neuroscience of Expertise* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017), 171-72, <https://books.google.co.uk/books?id=QILTDDQAAQBAJ>; The Brain from Top to Bottom, "The Motor Cortex," McGill University, accessed November 20, 2021, https://thebrain.mcgill.ca/flash/i/i_06/_06_ct/i_06_cr_mou/i_06_cr_mou.html.

⁴⁰ Para lições mais técnicas sobre funções base, relevantes para aprendizagem automática, consulte "Lecture 17: Basis Functions," Open Data Science Initiative, YouTube video, November 28, 2011, <https://youtu.be/OOpfU3CvUkM?t=151>; Yaser Abu-Mostafa, "Lecture 16: Radial Basis Functions," Caltech, YouTube video, May 29, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=O8CfrnOPtLe>.

⁴¹ Mayo Clinic, "Ataxia," Mayo Clinic, accessed November 20, 2021, <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/ataxia/symptoms-causes/syc-20355652>; Helen Thomson, "Woman of 24 Found to Have No Cerebellum in Her Brain," *New Scientist*, September 10, 2014, <https://institutions.newscientist.com/article/mg22329861-900-woman-of-24-found-to-have-no-cerebellum-in-her-brain>; R. N. Lemon and S. A. Edgley, "Life Without a Cerebellum," *Brain* 133, no. 3 (March 18, 2010): 652-54, <https://doi.org/10.1093/brain/awg030>.

⁴² Para mais informações sobre como o treino atlético aproveita a transição para a competência inconsciente, consulte o Bo Hanson, "Conscious Competence Learning Matrix," Athlete Assessments, accessed November 22, 2021, <https://athleteassessments.com/conscious-competence-learning-matrix>.

⁴³ Suzana Herculano-Houzel, "The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-Up Primate Brain," *Frontiers in Human Neuroscience* 3, no. 31 (November 9, 2009), <https://doi.org/10.3389/neuro.09.031.2009>.

⁴⁴ Herculano-Houzel, "Human Brain in Numbers"; Richard Apps, "Cerebellar Modules and Their Role as Operational Cerebellar Processing Units," *Cerebellum* 17, no. 5 (June 6, 2018): 654-82, <https://doi.org/10.1007/s12311-018-0952-3>; Jan Voogd, "What We Do Not Know About Cerebellar Systems Neuroscience," *Frontiers in Systems Neuroscience* 8, no. 227 (December 18, 2014), <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00227>; Rhoshel K. Lenroot and Jay N. Giedd, "The Changing Impact of Genes and Environment on Brain Development During Childhood and Adolescence: Initial Findings from a Neuroimaging Study of Pediatric Twins," *Development and Psychopathology* 20, no. 4 (Fall 2008): 1161-75, <https://doi.org/10.1017/S0954579408000552>; Salvador Martinez et al., "Cellular and Molecular Basis of Cerebellar Development," *Frontiers in Neuroanatomy* 7, no. 18 (June 26, 2013), <https://doi.org/10.3389/fnana.2013.00018>.

⁴⁵ Fumiaki Sugahara et al., “Evidence from Cyclostomes for Complex Regionalization of the Ancestral Vertebrate Brain,” *Nature* 531, no. 7592 (February 15, 2016): 97-100, <https://doi.org/10.1038/nature16518>; Leonard F. Koziol, “Consensus Paper: The Cerebellum’s Role in Movement and Cognition,” *Cerebellum* 13, no. 1 (February 2014): 151-77, <https://doi.org/10.1007/s12311-013-0511-x>; Robert A. Barton and Chris Venditti, “Rapid Evolution of the Cerebellum in Humans and Other Great Apes,” *Current Biology* 24, no. 20 (October 20, 2014): 2440-44, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.08.056>.

⁴⁶ Para informações mais detalhadas sobre esses comportamentos animais inatos, consulte Jesse N. Weber, Brant K. Peterson, and Hopi E. Hoekstra, “Discrete Genetic Modules Are Responsible for Complex Burrow Evolution in *Peromyscus* Mice,” *Nature* 493, no. 7432 (January 17, 2013): 402-5, <http://dx.doi.org/10.1038/nature11816>; Nicole L. Bedford and Hopi E. Hoekstra, “*Peromyscus* Mice as a Model for Studying Natural Variation,” *eLife* 4: e06813 (June 17, 2015), <https://doi.org/10.7554/eLife.06813>; Do-Hyoung Kim et al., “Rescheduling Behavioral Subunits of a Fixed Action Pattern by Genetic Manipulation of Peptidergic Signaling,” *PLoS Genetics* 11, no. 9: e1005513 (September 24, 2015), <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005513>.

⁴⁷ Para uma palestra interessante que explica a computação evolutiva, consulte Keith Downing, “Evolutionary Computation: Keith Downing at TEDxTrondheim,” TEDx Talks, YouTube video, November 4, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=D3zUmfDd79s>.

⁴⁸ Para mais informações sobre o desenvolvimento e função do neocórtex, consulte Kaas, “Evolution of the Neocortex”; Jeff Hawkins and Sandra Blakeslee, *On Intelligence: How a New Understanding of the Brain Will Lead to the Creation of Truly Intelligent Machines* (New York: Macmillan, 2007), 97-101, <https://books.google.co.uk/books?id=Qg2dmntfxmQC>; Clay Reid, “Lecture 3: The Structure of the Neocortex,” Allen Institute, YouTube video, September 6, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=NRmWh0dzyYY>; Joan Stiles et al., *Newral Plasticity and Cognitive Development: Insights from Children with Perinatal Brain Injury* (New York: Oxford University Press, 2012), 41-45, <https://books.google.co.uk/books?id=QiNpAgAAQBAJ>.

⁴⁹ Brian K. Hall and Benedikt Hallgrímsson, *Strickberger’s Evolution*, 4th ed. (Sudbury, MA: Jones & Bartlett Learning, 2011), 533; Kaas, “Evolution of the Neocortex”; Jon H. Kaas, “The Evolution of Brains from Early Mammals to Humans,” *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science* 4, no. 1 (November 8, 2012): 33-45, <https://doi.org/10.1002/wcs.1206>.

⁵⁰ Para mais detalhes sobre o evento de extinção Cretáceo-Paleogeno, também conhecido como extinção K-T, consulte Michael Greshko e a equipa da National Geographic, “What Are Mass Extinctions, and What Causes Them?”, National Geographic, September 26, 2019, <https://www.nationalgeographic.com/science/prehistoric-world/mass-extinction>; Victoria Jaggard “Why Did the Din Go Extinct?”, National Geographic, July 31, 2019, <https://www.nationalgeographic.com/science/prehistoric-world/dinosaur-extinction>; Emily Singer, “How Dinosaurs Shrank and Became Birds,” *Quanta*, June 2, 2015, <https://www.quantamagazine.org/how-birds-evolved-from-dinosaurs-20150602>.

⁵¹ Yasuhiro Itoh, Alexandros Pouloupoulos, and Jeffrey D. Macklis, “Unfolding the Folding Problem of the Cerebral Cortex: Movin’ and Groovin’,” *Developmental Cell* 41, no. 4 (2017): 332-34, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1534580717303933>; Jeff Hawkins, “What Intelligent Machines Need to Learn from the Neocortex,” *IEEE Spectrum*, June 2, 2017, <https://spectrum.ieee.org/computing/software/what-intelligent-machines-need-to-learn-from-the-neocortex>.

⁵² Jean-Didier Vincent and Pierre-Marie Lledo, *The Custom-Made Brain: Cerebral Plasticity, Regeneration, and Enhancement*, trans. Laurence Garey (New York: Columbia University Press, 2014), 152.

⁵³ Para um vídeo não técnico e uma palestra mais académica com mais detalhes sobre o neocórtex e as suas microcolunas, consulte Brains Explained, “The Neocortex,” YouTube video, September 16, 2017, <https://www.youtube.com/watch?vT=aJxP2VMneY>; Clay Reid, “Lecture 3; The Structure of the Neocortex.”

⁵⁴ V. B. Mountcastle, “The Columnar Organization of the Neocortex,” *Brain* 120, no. 4 (April 1997): 701-22, <https://doi.org/10.1093/brain/120.4.701>; Olaf Sporns, Giulio Tononi, and Rolf Kötter, “The Human Connectome: A Structural Description of the Human Brain,” *PLoS Computational Biology* 1, no. 4: e42 (September 30, 2005),

<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0010042>; David J. Heeger, “Theory of Cortical Function,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no. 8 (February 6, 2017): 1773-82, <https://doi.org/10.1073/pnas.1619788114>.

⁵⁵ Isto é um pouco inferior aos 300 milhões que estimei a partir de pesquisas anteriores em *Como Criar uma Mente*, mas, dado que os dados subjacentes são aproximados de forma vaga, ainda está na mesma faixa geral. Também pode haver uma variação significativa de uma pessoa para outra.

⁵⁶ Jeff Hawkins, Subutai Ahmad, and Yuwei Cui, “A Theory of How Columns in the Neocortex Enable Learning the Structure of the World,” *Frontiers in Neural Circuits* 11, no. 81 (October 25, 2017), <https://doi.org/10.3389/fncir.2017.00081>; Jeff Hawkins, *A Thousand Brains: A New Theory of Intelligence* (New York: Basic Books, 2021).

⁵⁷ Mountcastle, “Columnar Organization of the Neocortex”; Sporns, Tononi, and Kötter “The Human Connectome”; Heeger, “Theory of Cortical Function.”

⁵⁸ Malcolm W. Browne, “Who Needs Jokes? Brain Has a Ticklish Spot,” *New York Times*, March 10, 1998, <https://www.nytimes.com/1998/03/10/science/who-needs-jokes-brain-has-a-ticklish-spot.html>; Itzhak Fried et al., “Electric Current Stimulates Laughter,” *Scientific Correspondence* 391, no. 650 (February 12, 1998), <https://doi.org/10.1038/35536>.

⁵⁹ Para uma explicação acessível sobre a percepção da dor no cérebro, consulte Kristin Muench, “Pain in the Brain,” NeuWrite West, November 10, 2015, www.neuwritewest.org/blog/pain-in-the-brain.

⁶⁰ Browne, “Who Needs Jokes?”

⁶¹ Robert Wright, “Scientists Find Brain’s Irony-Detection Center!” *Atlantic*, August 5, 2012, <https://www.theatlantic.com/health/archive/2012/08/scientists-find-brains-irony-detection-center/260728>.

⁶² “Bigger Brains: Complex Brains for a Complex World,” Smithsonian Institution, January 16, 2019, <http://humanorigins.si.edu/human-characteristics/brains>; David Robson, “4 Brief History of the Brain,” *New Scientist*, September 21, 2011, <https://www.newscientist.com/article/mg21128311-800>.

⁶³ Stephanie Musgrave et al., “Tool Transfers Are a Form of Teaching Among Chimpanzees,” *Scientific Reports* 6, article 34783 (October 11, 2016), <https://doi.org/10.1038/srep34783>.

⁶⁴ Hanoch Ben-Yami, “Can Animals Acquire Language?”, *Scientific American*, March 1, 2017, <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/can-animals-acquire-language>; Klaus Zuberbühler, “Syntax and Compositionality in Animal Communication,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 375, article 20190062 (November 18, 2019), <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0062>.

⁶⁵ Para uma explicação acessível sobre a origem evolutiva e a utilidade dos nossos polegares opositores, consulte “Where Do Our Opposable Thumbs Come From?”, HHMI BioInteractive, YouTube video, April 24, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=|DSkmbT4ilUo>.

⁶⁶ Ryan V. Raut et al., “Hierarchical Dynamics as a Macroscopic Organizing Principle of the Human Brain,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 35 (August 12, 2020): 20890-97, <https://doi.org/10.1073/pnas.1201889109>.

⁶⁷ Herculano-Houzel, “Human Brain in Numbers”; Sporns, Tononi, and Kötter, “The Human Connectome”; Ji Yeoun Lee, “Normal and Disordered Formation of the Cerebral Cortex: Normal Embryology, Related Molecules, Types of Migration, Migration Disorders,” *Journal of Korean Neurosurgical Society* 62, no. 3 (May 1, 2019): 265-71, <https://doi.org/10.3340/jkns.2019.0098>; Christopher Johansson and Anders Lansner, “Towards Cortex Sized Artificial Neural Systems,” *Neural Networks* 20, no. 1 (January 2007): 48-61, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.05.029>.

⁶⁸ Para uma exploração mais aprofundada sobre o neocórtex e o entendimento em evolução da ciência sobre as bases estruturais da cognição superior, consulte Matthew Barry Jensen, “Cerebral Cortex,” Khan Academy, accessed November 20, 2021, <https://www.khanacademy.org/science/health-and-medicine/human-anatomy-and-physiology/nervous-system-introduction/v/cerebral-cortex>; Hawkins, Ahmad, and Cui, “Theory of How Columns in the Neocortex Enable Learning”; Jeff Hawkins et al., “A Framework for Intelligence and Cortical Function Based on Grid Cells in the Neocortex,” *Frontiers in Neural*

Circuits 12, no. 121 (January 11, 2019), <https://doi.org/10.3389/fncir.2018.00121>; Baoguo Shi et al., “Different Brain Structures Associated with Artistic and Scientific Creativity: A Voxel-Based Morphometry Study,” *Scientific Reports* 7, no. 42911 (February 21, 2017), <https://doi.org/10.1038/srep42911>; Barbara L. Finlay and Kexin Huang, “Developmental Duration as an Organizer of the Evolving Mammalian Brain: Scaling, Adaptations, and Exceptions,” *Evolution and Development* 22, nos. 1-2 (December 3, 2019), <https://doi.org/10.1111/ede.12329>.

⁶⁹ Para uma visão geral simples e uma palestra mais técnica sobre a natureza associativa da memória, consulte Shelly Fan, “How the Brain Makes Memories: Scientists Tap Memory’s Neural Code,” SingularityHub, July 10, 2015, <https://singularityhub.com/2015/07/10/how-the-brain-makes-memories-scientists-tap-memorys-neural-code>; Christos Papadimitriou, “Formation and Association of Symbolic Memories in the Brain,” Simons Institute, YouTube video, March 31, 2017, <https://www.youtube.com/watch?vKA=plSZTtoY>.

⁷⁰ Para mais informações sobre a transição do criacionismo para a evolução por seleção natural, consulte Phillip Sloan, “Evolutionary Thought Before Darwin,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2019), <https://plato.stanford.edu/entries/evolution-before-darwin>; Christoph Marty, “Darwin on a Godless Creation: ‘It’s Like Confessing to a Murder,’” *Scientific American*, February 12, 2009, <https://www.scientificamerican.com/article/charles-darwin-confessions>.

⁷¹ Para mais informações sobre o trabalho de Charles Lyell e a sua influência em Darwin, consulte Richard A. Fortey, “Charles Lyell and Deep Time,” *Geoscience* 21, no. 9 (October 2011), <https://www.geolsoc.org.uk/Geoscientist/Archive/October-2011/Charles-Lyell-and-deep-time>; Gary Stix, “Darwin’s Living Legacy,” *Scientific American* 300, no. 1 (January 2009): 38-43, <https://www.jstor.org/stable/26001418>; Charles Darwin, *On the Origin of Species*, 6th ed. (London: John Murray, 1859; Project Gutenberg, 2013), <https://www.gutenberg.org/files/2009/2009-h/2009-h.htm>.

⁷² Walter F. Cannon, “The Uniformitarian-Catastrophist Debate,” *Isis* 51, no. 1 (March 1960): 38-55, <https://www.jstor.org/stable/227604>; Jim Morrison, “The Blasphemous Geologist Who Rocked Our Understanding of Earth’s Age,” *Smithsonian*, August 29, 2016, <https://www.smithsonianmag.com/history/father-modern-geology-youve-never-heard-180960203>.

⁷³ Charles Darwin and James T. Costa, *The Annotated Origin: A Facsimile of the First Edition of On the Origin of Species* (Cambridge, MA, and London: Belknap Press of Harvard University Press, 2009), 95, https://www.google.com/books/edition/The_Annotated_i_Origin_i/COE03i1hSz4C.

⁷⁴ Gordon Moore, “Cramming More Components onto Integrated Circuits,” *Electronics* 38, no. 8 (April 19, 1965), <https://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2017/03/102770822-05-01-acc.pdf>; Computer History Museum, “1965: ‘Moore’s Law’ Predicts the Future of Integrated Circuits,” Computer History Museum, accessed October 12 2021, <https://www.computerhistory.org/siliconengine/moores-law-predicts-the-future-of-integrated-circuits>; Fernando J. Corbato et al., *The Compatible Time-Sharing System: A Programmer’s Guide* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), http://www.bitsavers.org/pdf/mit/ctss/CTSS_ProgrammersGuide.pdf.

⁷⁵ Ninguém pode afirmar com certeza qual será o próximo paradigma de computação, mas, para alguns estudos recentes promissores, consulte Jeff Hecht, “Nanomaterials Pave the Way for the Next Computing Generation,” *Nature* 608, S2—S3 (2022), <https://www.nature.com/articles/d41586-022-02147-3>; Peng Lin et al., “Three-Dimensional Memristor Circuits as Complex Neural Networks,” *Nature Electronics* 3, no. 4 (April 13, 2020): 225-32, <https://doi.org/10.1038/s41928-020-0397-9>; Zhihong Chen, “Gate-All-Around Nanosheet Transistors Go 2D,” *Nature Electronics* 5, no. 12 (December 12, 2022): 830-31, <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00899-4>.

⁷⁶ Em 1888, a máquina de tabulação de Hollerith representou o primeiro dispositivo praticamente implementado para realizar computação em grande escala. A tendência exponencial de relação preço-desempenho tem-se mantido extraordinariamente estável até ao presente. Consulte Emile Cheysson, *The Electric Tabulating Machine*, trans. Arthur W. Fergusson (New York: C. C. Shelley, 1892), 2, <https://books.google.com/books?id=rJgsAAAAyAAJ>; Robert Sobel, *Thomas Watson Sr.: IBM and the Computer Revolution* (Washington, DC: BeardBooks, 2000; originally published as *I.B.M., Colossus in Transition* by Times Books in 1981), 17, https://www.google.com/books/edition/Thomas_Watson_Sr/H8EFNMBGpyY4C; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 12, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIAUCSL>; Marguerite Zientara, “Herman

Hollerith: Punched Cards Come of Age,” *Computerworld* 15, no. 36 (September 7, 1981): 35, <https://books.google.com/books?id=tk74jLc6HggC&pg=PA35&lpg=PA35>; Frank da Cruz, “Hollerith 1890 Census Tabulator,” Columbia University Computing History, April 17, 2021, <http://www.columbia.edu/cu/computinghistory/census-tabulathotml>.

⁷⁷ Nick Bostrom, “Nick Bostrom The Intelligence Explosion Hypothesis eDay 2012,” eAcast55, YouTube video, August 9, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=VFE-96XA92w>.

⁷⁸ DeepMind, “AlphaGo,” DeepMind, accessed November 20, 2021, <https://deepmind.com/research/case-studies/alphago-the-story-so-far>.

⁷⁹ DeepMind, “AlphaGo.”

⁸⁰ Para um relato envolvente sobre o significado da partida entre o Deep Blue e Kasparov, consulte Mark Robert Anderson, “Twenty Years On from Deep Blue vs. Kasparov: How a Chess Match Started the Big Data Revolution,” *The Conversation*, May 11, 2017, <https://theconversation.com/twenty-years-on-from-deep-blue-vs-kasparov-how-a-chess-match-started-the-big-data-revolution-76882>.

⁸¹ DeepMind, “AlphaGo Zero: Starting from Scratch,” DeepMind, October 18, 2017, <https://deepmind.com/blog/article/alphago-zero-starting-scratch>; DeepMind, “AlphaGo”; Tom Simonite, “This More Powerful Version of AlphaGo Learns on Its Own,” *Wired*, October 18, 2017, <https://www.wired.com/story/this-more-powerful-version-of-alphago-learns-on-its-own>; David Silver et al., “Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search,” *Nature* 529, no. 7587 (January 27, 2016): 484–89, <https://doi.org/10.1038/nature16961>.

⁸² Carl Engelking, “The AI That Dominated Humans in Go Is Already Obsolete,” *Discover*, October 18, 2017, <https://www.discovermagazine.com/technology/the-ai-that-dominated-humans-in-go-is-already-obsolete>; DeepMind, “AlphaGo China,” DeepMind, accessed November 20, 2021, <https://deepmind.com/alphago-china>; DeepMind, “AlphaGo Zero: Starting from Scratch.”

⁸³ DeepMind, “AlphaGo Zero: Starting from Scratch.”

⁸⁴ David Silver et al., “AlphaZero: Shedding New Light on Chess, Shogi, and Go,” DeepMind, December 6, 2018, <https://deepmind.com/blog/article/alphazero-shedding-new-light-grand-games-chess-shogi-and-go>.

⁸⁵ Julian Schrittwiese et al., “MuZero: Mastering Go, Chess, Shogi and Atari Without Rules,” DeepMind, December 23, 2020, <https://deepmind.com/blog/article/muzero-mastering-go-chess-shogi-and-atari-without-rules>.

⁸⁶ AlphaStar Team, “AlphaStar: Mastering the Real-Time Strategy Game StarCraft II,” DeepMind, January 24, 2019, <https://deepmind.com/blog/article/alphastar-mastering-real-time-strategy-game-starcraft-ii>; Noam Brown and Tuomas Sandholm, “Superhuman AI for Heads-Up No-Limit Poker: Libratus Beats Top Professionals,” *Science* 359, no. 6374 (January 26, 2018): 418–24, <https://doi.org/10.1126/science.aao1733>; Cade Metz, “Inside Libratus, the Poker AI That Out-Bluffed the Best Humans,” *Wired*, February 1, 2017, <https://www.wired.com/2017/02/libratus>.

⁸⁷ Para mais informações sobre as dinâmicas do Diplomacy, consulte “Diplomacy: Running the Game #40, Politics #3,” Matthew Colville, YouTube video, July 15, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=HWt00AQWjhPg>; Ben Harsh, “Harsh Rules: Let’s Learn to Play Diplomacy,” Harsh Rules, YouTube video, August 9, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=BSdb-NsIS>; Blake Eskin, “World Domination: The Game,” *Washington Post*, November 14, 2004, <https://www.washingtonpost.com/archive/lifestyle/magazine/2004/11/14/world-domination-the-game/b65c9d9f-71c7-4846-961f6dcdd1891e01>; David Hill, “The Board Game of the Alpha Nerds,” *Grantland*, June 18, 2014, <https://grantland.com/features/diplomacy-the-board-game-of-the-alpha-nerds>.

⁸⁸ Matthew Hutson, “AI Learns the Art of Diplomacy,” *Science*, November 22, 2022, <https://www.science.org/content/article/ai-learns-art-diplomacy-game>; Yoram Bachrach and Janos Kramar, “AI for the Board Game Diplomacy,” DeepMind, December 6, 2022, <https://www.deepmind.com/blog/ai-for-the-board-game-diplomacy>.

-
- ⁸⁹ Ira Boudway and Joshua Brustein, “Waymo’s Long-Term Commitment to Safety Drivers in Autonomous Cars,” Bloomberg, January 13, 2020, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-13/waymo-s-long-term-commitment-to-safety-drivers-in-autonomous-cars>.
- ⁹⁰ Aaron Pressman, “Google’s Waymo Reaches 20 Million Miles of Autonomous Driving,” *Fortune*, January 7, 2020, <https://fortune.com/2020/01/07/googles-waymo-reaches-20-million-miles-of-autonomous-driving>.
- ⁹¹ Darrell Etherington, “Waymo Has Now Driven 10 Billion Autonomous Miles in Simulation,” *TechCrunch*, July 10, 2019, <https://techcrunch.com/2019/07/10/waymo-has-now-driven-10-billion-autonomous-miles-in-simulation>.
- ⁹² Gabriel Goh et al., “Multimodal Neurons in Artificial Neural Networks,” *Distill*, March 4, 2021, <https://distill.pub/2021/multimodal-neurons>.
- ⁹³ Para mais informações sobre o Codificador Universal de Frases (USE), consulte Yinfei Yang and Amin Ahmad, “Multilingual Universal Sentence Encoder for Semantic Retrieval,” Google Research, July 12, 2019, <https://ai.googleblog.com/2019/07/multilingual-universal-sentence-encoder.html>; Yinfei Yang and Chris Tat, “Advances in Semantic Textual Similarity,” *Google Research*, May 17, 2018, <https://ai.googleblog.com/2018/05/advances-in-semantic-textual-similarity.html>; Daniel Cer et al., “Universal Sentence Encoder,” arXiv:1803.11175v2 [cs.CL], April 12, 2018, <https://arxiv.org/abs/1803.11175>.
- ⁹⁴ Rachel Syme, “Gmail Smart Replies and the Ever-Growing Pressure to E-Mail Like a Machine,” *New Yorker*, November 28, 2018, <https://www.newyorker.com/tech/annals-of-technology/gmail-smart-replies-and-the-ever-growing-pressure-to-e-mail-like-a-machine>.
- ⁹⁵ Para uma explicação mais detalhada sobre como os transformers funcionam, e o artigo técnico original, consulte Giuliano Giacaglia, “How Transformers Work,” *Towards Data Science*, March 10, 2019, <https://towardsdatascience.com/transformers-141e32c69591>; Ashish Vaswani et al., “Attention Is All You Need,” arXiv:1706.03762v5 [cs.CL], December 6, 2017, <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf>.
- ⁹⁶ Irene Solaiman et al., “GPT-2: 1.5B Release,” OpenAI, November 5, 2019, <https://openai.com/blog/gpt-2-1-5b-release>.
- ⁹⁷ Tom B. Brown et al., “Language Models Are Few-Shot Learners,” arXiv:2005.14165[cs.CL], July 22, 2020, <https://arxiv.org/abs/2005.14165>.
- ⁹⁸ Jack Ray et al., “Language Modelling at Scale: Gopher, Ethical Considerations, and Retrieval,” DeepMind, December 8, 2021, <https://www.deepmind.com/blog/languums-modelling-at-scale-gopher-ethical-considerations-and-retrieval>.
- ⁹⁹ Pandu Nayak, “Understanding Searches Better Than Ever Before,” Google, October 25, 2019, <https://blog.google/products/search/search-language-understanding-bert>; William Fedus et al., “Switch Transformers: Scaling to Trillion Parameter Models with Simple and Efficient Sparsity,” arXiv:2101.03961 [cs.LG], January 11, 2021, <https://arxiv.org/abs/2101.03961>.
- ¹⁰⁰ Para informações mais detalhadas sobre o GPT-3, consulte Greg Brockman et al., “OpenAI API,” OpenAI, June 11, 2020, <https://openai.com/blog/openai-api>; Brown et al., “Language Models Are Few-Shot Learners”; Kelsey Piper, “GPT-3, Explained: This New Language AI Is Uncanny, Funny — and a Big Deal,” *Vox*, August 13, 2020, <https://www.vox.com/future-perfect/21355768/gpt-3-ai-openai-turing-test-language>; “GPT-3 Demo: New AI Algorithm Changes How We Interact with Technology,” *Disruption Theory*, YouTube video, August 28, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=8V20HkoiNtc>.
- ¹⁰¹ David Cole, “The Chinese Room Argument,” in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2020), <https://plato.stanford.edu/archives/win2020/entries/chinese-room>; Amanda Askell (@amandaaskell), “GPT-3’s completion of the Chinese room argument from Searle’s ‘Minds, Brains, and Programs’ (original text is in bold),” Twitter, July 17, 2020, <https://twitter.com/AmandaAskell/status/12841869196062515>. David J. Chalmers, *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory* (New York Oxford University Press, 1996), 327.
- ¹⁰² Cade Metz, “Meet GPT-3. It Has Learned to Code (and Blog and Argue),” *New York Times*, November 24, 2020, <https://www.nytimes.com/2020/11/24/science/artificial-intelligence-ai-gpt3.html>.

- ¹⁰³ Para mais informações sobre o LaMDA e uma demonstração de uma conversa na qual finge ser o planeta anão Plutão e, em seguida, um avião de papel, consulte Eli Collins and Zoubin Ghahramani, “LaMDA: Our Breakthrough Conversation Technology,” Google, May 18, 2021, <https://blog.google/technology/ai/lamda>; “Watch Google’s AI LaMDA Program Talk to Itself at Length (Full Conversation),” CNET Highlights, YouTube video, May 18, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=aUSSfo5nCdM>.
- ¹⁰⁴ Jeff Dean, “Google Research: Themes from 2021 and Beyond,” Google Research, January 11, 2022, <https://ai.googleblog.com/2022/01/google-research-themes-from-2021-and-beyond.html>.
- ¹⁰⁵ Para exemplos das imagens notavelmente criativas do DALL-E, consulte Aditya Ramesh et al., “Dall-E: Creating Images from Text,” OpenAI, January 5, 2021, <https://openai.com/research/dall-e>.
- ¹⁰⁶ “Dall-E 2,” OpenAI, accessed June 30, 2022, <https://openai.com/dall-e-2>.
- ¹⁰⁷ Chitwan Saharia et al., “Imagen,” Google Research, Brain Team, Google, accessed June 30, 2022, <https://imagen.research.google>.
- ¹⁰⁸ Saharia et al., “Imagen.”
- ¹⁰⁹ Scott Reed et al., “A Generalist Agent,” DeepMind, May 12, 2022, <https://www.deepmind.com/publications/a-generalist-agent>.
- ¹¹⁰ Wojciech Zaremba et al., “OpenAI Codex,” OpenAI, August 10, 2021, <https://openai.com/blog/openai-codex>.
- ¹¹¹ AlphaCode Team, “Competitive Programming with AlphaCode,” DeepMind, December 8, 2022, <https://www.deepmind.com/blog/competitive-programming-with-alphacode>; Yujia Li et al., “Competition-Level Code Generation with AlphaCode,” arXiv:2203.07814v1 [cs.PL], February 8, 2022, <https://arxiv.org/pdf/2203.07814.pdf>.
- ¹¹² Aakanksha Chowdhery, “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways,” arXiv:2204.02311v3 [cs.CL], April 19, 2022, <https://arxiv.org/pdf/2204.02311.pdf>; Sharan Narang et al., “Pathways Language Model (PaLM): Scaling to 540 Billion Parameters for Breakthrough Performance,” Google AI Blog, April 4, 2022, <https://ai.googleblog.com/2022/04/pathways-language-model-palm-scaling-to.html>.
- ¹¹³ Chowdhery, “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways.”
- ¹¹⁴ Chowdhery, “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways,”
- ¹¹⁵ Chowdhery, “PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways.”
- ¹¹⁶ OpenAI, “Introducing ChatGPT,” OpenAI, November 30, 2022, <https://openai.com/blog/chatgpt#OpenAI>.
- ¹¹⁷ Krystal Hu, “ChatGPT Sets Record for Fastest-Growing User Base — Analyst Note,” Reuters, February 2, 2023, <https://www.reuters.com/technology/chatgpt-sets-record-fastest-growing-user-base-analyst-note-2023-02-01>.
- ¹¹⁸ Kalley Huang, “Alarmed by A.I. Chatbots, Universities Start Revamping How They Teach,” New York Times, January 16, 2023, <https://www.nytimes.com/2023/01/16/technology/chatgpt-artificial-intelligence-universities.html>; Emma Bowman, “A College Student Created an App That Can Tell Whether AI Wrote an Essay,” NPR, January 9, 2023, <https://www.npr.org/2023/01/09/1147549845/gptzero-ai-chatgpt-edward-tian-plagiarism>; Patrick Wood and Mary Louise Kelly, “‘Everybody Is Cheating’: Why This Teacher Has Adopted an Open ChatGPT Policy,” NPR, January 26, 2023, <https://www.npr.org/2023/01/26/1151499213/chatgpt-ai-education-cheating-classroom-wharton-school>; Matt O’Brien and Jocelyn Gecker, “Cheaters Beware: ChatGPT Maker Releases AI Detection Tool,” Associated Press, January 31, 2023, <https://apnews.com/article/technology-education-colleges-and-universities-france-a0ab654549de387316404a7be019116b>; Geoffrey A. Fowler, “We Tested a New ChatGPT-Detector for Teachers. It Flagged an Innocent Student,” *Washington Post*, April 3, 2023, <https://www.washingtonpost.com/technology/2023/04/01/chatgpt-cheating-detection-turnitin/>.

- ¹¹⁹ OpenAI, “GP‘T-4,” OpenAI, March 14, 2023, <https://openai.com/research/gpt-4>; OpenAI, “GPT-4 Technical Report,” arXiv:2303.08774v3 [cs.CL], March 27, 2023, <https://arxiv.org/pdf/2303.08774.pdf>; OpenAI, “GPT-4 System Card,” OpenAI, March 23, 2023, <https://cdn.openai.com/papers/gpt-4-system-card.pdf>.
- ¹²⁰ OpenAI, “Introducing GPT-4,” YouTube video, March 15, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=--kHbXchTeE>.
- ¹²¹ Daniel Feldman (@d_feldman), “À esquerda está o GPT-3.5. À direita está o GPT-4. Se considerares que a resposta à esquerda indica que o GPT-3.5 não possui uma modelação do mundo... Então tens de concordar que a resposta à direita indica que o GPT-4 possui.” Twitter, March 17, 2023, https://twitter.com/d_feldman/status/1636955260680847361.
- ¹²² Danny Driess and Pete Florence, “PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model,” Google Research, March 10, 2023, <https://ai.googleblog.com/2023/03/palm-e-embodied-multimodal-language.html>; Danny Driess et al., “PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model,” arXiv:2303.03378v1 [cs.LG], March 6, 2023, <https://arxiv.org/pdf/2303.03378.pdf>.
- ¹²³ Sundar Pichai and Demis Hassabis, “Introducing Gemini: Our Largest and Most Capable AI Model,” Google, December 6, 2023, <https://blog.google/technology/ai/google-gemini-ai>; Sundar Pichai, “An Important Next Step on Our AI Journey,” Google, February 6, 2023, <https://blog.google/technology/ai/bard-google-ai-search-updates>; Sarah Fielding, “Google Bard Is Switching to a More ‘Capable’ Language Model, CEO Confirms,” *Engadget*, March 31, 2023, <https://www.engadget.com/google-bard-is-switching-to-a-more-capable-language-model-ceo-confirms-133028933.html>; Yusuf Mehdi, “Confirmed: The New Bing: Runs on OpenAI’s GPT-4,” Microsoft Bing Blogs, March 14, 2023, https://blogs.bing.com/search/march_2023/Confirmed-the-new-Bing-runs-on-OpenAI%E2%80%99s-GPT-4; Tom Warren, “Hands-on with the New Bing: Microsoft’s Step Beyond ChatGPT,” *The Verge*, February 8, 2023, <https://www.theverge.com/2023/2/8/23590873/microsoft-new-bing-chatgpt-ai-hands-on>.
- ¹²⁴ Johanna Voolich Wright, “A New Era for AI and Google Workspace,” Google, March 14, 2023, <https://workspace.google.com/blog/product-announcements/generative-ai>; Jared Spataro, “Introducing Microsoft 365 Copilot — Your Copilot for Work,” *Official Microsoft Blog*, March 16, 2023, <https://blogs.microsoft.com/blog/2023/03/16/introducing-microsoft-365-copilot-your-copilot-for-work>.
- ¹²⁵ Markus Anderljung et al., “Compute Funds and Pre-Trained Models,” Centre for the Governance of AI, April 11, 2022, <https://www.governance.ai/post/compute-funds-and-pre-trained-models>; Jaime Sevilla et al., “Compute Trends Across Three Eras of Mace Learning,” arXiv:2202.05924v2 [cs.LG], March 9, 2022, <https://arxiv.org/pdf/2202.pdf>; Dario Amodei and Danny Hernandez, “AI and Compute,” OpenAI, May 16, 2 <https://openai.com/blog/ai-and-compute>.
- ¹²⁶ Jacob Stern, “GP‘T-4 Has the Memory of a Goldfish,” *Atlantic*, March 17, 2023, <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2023/03/gpt-4-has-memory-context-window/673426>.
- ¹²⁷ Extrapolando a tendência de longo prazo, que tem mostrado um tempo de duplicação de pouco mais de 1,34 anos desde 1983. Consulte o apêndice para as fontes utilizadas em todos os cálculos de custo de computação deste livro.
- ¹²⁸ No momento em que este texto foi escrito, o progresso no benchmark MLPerf para treino de IA foi quase cinco vezes mais rápido do que seria possível apenas com o aumento da densidade de transístores. Este avanço resulta de uma combinação de melhorias algorítmicas no software e de melhorias arquitetónicas que tornam os chips mais eficientes. Consulte Samuel K. Moore, “AI Training Is Outpacing Moore’s Law,” *IEEE Spectrum*, December 2, 2021, <https://spectrum.ieee.org/ai-training-mlperf>.
- ¹²⁹ No momento em que escrevo isto, os preços da API do GPT-3.5 estão reduzidos para 1,00 dólar por 500.000 tokens, ou aproximadamente 370.000 palavras. É provável que os preços sejam ainda mais baixos quando estiver a ler isto. Consulte Bem Dickson, “OpenAI Is Reducing the Price of the GPT-3 API — Here’s Why It Matters,” *VentureBeat*, August 25, 2022, <https://venturebeat.com/ai/openai-is-reducing-the-price-of-the-gpt-3-api-heres-why-it-matters>; OpenAI, “Introducing ChatGPT and Whisper APIs,” OpenAI, March 1, 2023, <https://openai.com/blog/introducing-chatgpt-and-whisper-apis>; OpenAI, “What Are Tokens and How to Count Them?,” OpenAI, accessed April 30, 2023, <https://help.openai.com/en/articles/4936856-what-are-tokens-and-how-to-count-them>.

¹³⁰ Stephen Nellis, “Nvidia Shows New Research on Using AI to Improve Chip Designs”, Reuters, March 27, 2023, <https://www.reuters.com/technology/nvidia-shows-new-research-using-ai-improve-chip-designs-2023-03-28>.

¹³¹ Blaise Agüera y Arcas, “Do Large Language Models Understand Us?,” Medium, December 16, 2021, <https://medium.com/@blaisea/do-large-language-models-understand-us-6f881d6d8e75>.

¹³² Com algoritmos melhores, a quantidade de computação necessária para alcançar um determinado nível de desempenho diminui. Um número crescente de pesquisas sugere que, para muitas aplicações, o progresso algorítmico é aproximadamente tão importante quanto o progresso do hardware. De acordo com um estudo de 2022, algoritmos melhores reduziram pela metade os requisitos de computação para um determinado nível de desempenho a cada nove meses, entre 2012 e 2021. Consulte Ege Erdil and Tamay Besiroglu, “Algorithmic Progress in Computer Vision,” arXiv:2212.05153v4 [cs.CV] August 24, 2023, <https://arxiv.org/pdf/2212.05153.pdf>; Katja Grace, *Algorithmic Progress in Six Domains*, Machine Intelligence Research Institute technical report 2013-3, December 9, 2013, <https://intelligence.org/files/AlgorithmicProgress.pdf>.

¹³³ Anderljung et al., “Compute Funds and Pre-Trained Models.”

¹³⁴ Sevilla et al., “Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning”; Consulte o apêndice para as fontes utilizadas em todos os cálculos de custo de computação deste livro.

¹³⁵ Anderljung et al., “Compute Funds and Pre-Trained Models”; Sevilla et al., “Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning”; Amodei and Hernandez, “AI and Compute.”

¹³⁶ “Dallas Fed Energy Survey,” Federal Reserve Bank of Dallas, March 27, 2019, <https://www.dallasfed.org/research/surveys/des/2019/1901.aspx#tab-questions>.

¹³⁷ Para uma visão clara e acessível dos grandes volumes de dados, veja Rebecca Tickle, “What Is Big Data Computerphile,” YouTube video, May 15, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=H4bf_uuMC-g.

¹³⁸ Para um mergulho muito mais profundo na natureza potencial de uma explosão de inteligência, veja Nick Bostrom, “The Intelligence Explosion Hypothesis — eDay 2012,” EMERCE, YouTube video, November 19, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=g3FMpn321zs>; Luke Muehlhauser and Anna Salamon, “Intelligence Explosion: Evidence and Import,” in *Singularity Hypotheses: A Scientific and Philosophical Assessment*, ed. Amnon Eden et al. (Berlim: Springer, 2013), <https://intelligence.org/files/IE-El.pdf>; Eliezer Yudkowsky, “Recursive Self-Improvement,” LessWrong.com, December 1, 2008, <https://www.lesswrong.com/posts/JBadX7rwdcRFzGuju/recursive-self-improvement>; Eliezer Yudkowsky, “Hard ‘Takeoff,” LessWrong.com, December 2, 2008, <https://www.lesswrong.com/posts/tjH8XPxAnr6JRbh7k/hard-takeoff>; Eliezer Yudkowsky, *Intelligence Explosion Microeconomics*, Machine Intelligence Research Institute technical report 2013-1, September 13, 2013, <https://intelligence.org/files/IEM.pdf>; I. J. Good, “Speculations Concerning the First Ultraintelligent Machine,” *Advances in Computers* 6 (1966): 31-88, [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60418-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60418-0); Ephrat Livni, “The Mirror Test for Animal Self-Awareness Reflects the Limits of Human Cognition,” *Quartz*, December 19, 2018, <https://qz.com/1501318/the-mirror-test-for-animals-reflects-the-limits-of-human-cognition>; Darold A. Treffert, “The Savant Syndrome: An Extraordinary Condition. A Synopsis: Past, Present, Future,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364, no. 1522 (May 27, 2009): 1351-57, <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0326>.

¹³⁹ Robin Hanson and Eliezer Yudkowsky, The Hanson-Yudkowsky AI-Foom Debate, Machine Intelligence Research Institute, 2013, <https://intelligence.org/files/AIFoomDebate.pdf>.

¹⁴⁰ Hanson and Yudkowsky, Hanson-Yudkowsky AI-Foom Debate.

¹⁴¹ Jon Brodtkin, “1.1 Quintillion Operations per Second: US Has World’s Fastest Supercomputer,” *Ars Technica*, May 31, 2022, <https://arstechnica.com/information-technology/2022/05/1-1-quintillion-operations-per-second-us-has-worlds-fastest-supercomputer>; “November 2022,” Top500.org, accessed November 14, 2023, <https://www.top500.org/lists/top500/2022/11>.

¹⁴² Para um relatório excepcional de Joseph Carlsmith na Open Philanthropy, que explora profundamente múltiplas perspectivas sobre o tema, e um resumo da AI Impacts com diversas estimativas usando metodologias distintas, veja Joseph Carlsmith, *How Much Computational Power Does It Take to Match the Human Brain?*, Open Philanthropy, September 11, 2020, <https://www.openphilanthropy.org/brain-computation-report>; “Brain Performance in FLOPS,” AI Impacts, July 26, 2015, <https://aiimpacts.org/brain-performance-in-flops>.

¹⁴³ Herculano-Houzel, “Human Brain in Numbers”; David A. Drachman, “Do We Have Brain to Spare?”, *Neurology* 64, no. 12 (June 27, 2005), <https://doi.org/10.1212/OLWNL.0000166914.38327.BB>; Ernest L. Abel, *Behavioral Teratogenesis and Behavioral Mutagenesis: A Primer in Abnormal Development* (New York: Plenum Press, 1989), 113, <https://books.google.co.uk/books?id=gVOrBgAAQBAJ>.

¹⁴⁴ “Neuron Firing Rates in Humans,” AI Impacts, April 14, 2015, <https://aiimpacts.org/rate-of-neuron-firing>; Peter Steinmetz et al., “Firing Behavior and Network Activity of Single Neurons in Human Epileptic Hypothalamic Hamartoma,” *Frontiers in Neurology* 2, no. 210 (December 27, 2013), <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00210>.

¹⁴⁵ “Neuron Firing Rates in Humans,” AI Impacts.

¹⁴⁶ Ray Kurzweil, *A Singularidade Está Próxima* (New York: Viking, 2005), 125; Hans Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988), 59, <https://books.google.co.uk/books?id=56mb7XuSx3QC>.

¹⁴⁷ Preeti Raghavan, “Stroke Recovery Timeline,” Johns Hopkins Medicine, accessed April 27, 2023, <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/stroke/stroke-recovery-timeline>; Apoorva Mandavilli, “The Brain That Wasn’t Supposed to Heal,” *Atlantic*, April 7, 2016, <https://www.theatlantic.com/health/archive/2016/04/brain-injuries/477300>.

¹⁴⁸ No início de 2023, 1.000 dólares por hora de utilização dos sistemas TPU v5e do Google Cloud traduzem-se em cerca de 328 quadrilhões de operações por segundo, o que corresponde à ordem de 10^{17} . A ampla disponibilidade de computação em nuvem alugada reduziu efetivamente os custos para muitos utilizadores, mas note-se que isso não é totalmente comparável às estimativas anteriores de custos computacionais, que derivam principalmente de custos de aquisição de equipamentos. O tempo alugado não pode ser comparado diretamente com o tempo de uso em hardware adquirido, mas uma comparação plausível, embora aproximada (desconsiderando diversos detalhes, como os salários de pessoal de TI, eletricidade e depreciação), é o custo de 4.000 horas de trabalho. Por essa métrica, o TPU v5e apresenta uma média sustentada de mais de 130 trilhões de operações por segundo (à ordem de 10^{14}) por cada 1.000 dólares. Consulte o apêndice para as fontes utilizadas em todos os cálculos de custo de computação neste livro.

¹⁴⁹ Extrapolando a tendência de longo prazo, que tem apresentado um tempo de duplicação de pouco mais de 1,34 anos desde 1983. Consulte o apêndice para as fontes utilizadas em todos os cálculos de custo de computação neste livro.

¹⁵⁰ Anders Sandberg and Nick Bostrom, *Whole Brain Emulation: A Roadmap*, technical report 2008-3, Future of Humanity Institute, Oxford University (2008), 80-81, <https://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulation-roadmap-report.pdf>.

¹⁵¹ Sandberg and Bostrom, *Whole Brain Emulation*.

¹⁵² Mitch Kapor and Ray Kurzweil, “A Wager on the Turing Test: The Rules,” *KurzweilAI.net*, April 9, 2002, <http://www.kurzweilai.net/a-wager-on-the-turing-test-the-rules>.

¹⁵³ Edward Moore Geist, “It’s Already Too Late to Stop the AI Arms Race — We Must Manage It Instead,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 72, no. 5 (August 15, 2016): 318-21, <https://doi.org/10.1080/00963402.2016.1216672>.

¹⁵⁴ Para um exemplo representativo do escritor científico John Horgan, no *The New York Times*, veja John Horgan, “Smarter than Us? Who’s Us?”, *New York Times*, May 4, 1997, <https://www.nytimes.com/1997/05/04/opinion/smarter-than-us-who-s-us.html>.

¹⁵⁵ Veja, por exemplo, Hubert L. Dreyfus, “Why We Do Not Have to Worry About Speaking the Language of the Computer,” *Information Technology & People* 11, no. 4 (December 1998): 281-89,

<https://personal.lse.ac.uk/whitley/allpubs/heideggerspecialissue/heidegger01.pdf>; Selmer Bringsjord, “Chess Is Too Easy,” MIT Technology Review, March 1, 1998, <https://www.technologyreview.com/1998/03/01/237087/chess-is-too-easy>.

¹⁵⁶ Notavelmente, um dos estudantes de doutoramento que projetou o Proverb, a primeira IA a dominar palavras cruzadas melhor do que a maioria dos solucionadores humanos, foi Noam Shazeer. Ele continuou a trabalhar no Google, onde foi coautor principal de “Attention Is All You Need”, o artigo que inventou a arquitetura transformer para modelos de linguagem avançada, impulsionando a mais recente revolução da IA. Veja Duke University, “Duke Researchers Pit Computer Against Human Crossword Puzzle Players,” ScienceDaily, April 20, 1999, <https://www.sciencedaily.com/releases/1999/04/990420064821.htm>; Vaswani et al., “Attention Is All You Need.”

¹⁵⁷ Para um vídeo representativo dos jogos e análises do Watson e da competição, veja O'Reilly, “Jeopardy! IBM Challenge Day 3 (HD) Ken Jennings vs. WATSON vs. Brad Rutter (02-16-11)”, Vimeo video, June 19, 2017, <https://vimeo.com/222234104>; Sax Gustin, “Behind IBM’s Plan to Beat Humans at Their Own Game,” Wired, February 14, 2011, <https://www.wired.com/2011/02/watson-jeopardy>; John Markoff, “Computer Wins on ‘Jeopardy!’: Trivial, It’s Not,” *New York Times*, February 16, 2011, <https://www.nytimes.com/2011/02/17/science/17jeopardy-watson.html>.

¹⁵⁸ “Show #6088 — Wednesday, February 16, 2011,” J! Archive, accessed April 30, 2023, https://j-archive.com/showgame.php?game_id=3577.

¹⁵⁹ “Show #6088 — Wednesday, February 16, 2011,” J! Archive.

¹⁶⁰ Jeffrey Grubb, “Google Duplex: A.I. Assistant Calls Local Businesses to Make Appointments,” Jeff Grubb’s Game Mess, YouTube video, May 8, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=D5VN56jQMWM>; Georgina Torbet, “Google Duplex Begins International Rollout with a New Zealand pilot,” *Engadget*, October 22, 2019, <https://www.engadget.com/2019-10-22-google-duplex-pilot-new-zealand.html>; IBM, “Man vs. Machine: Highlights from the Debate Between IBM’s Project Debater and Harish Natarajan,” BusinessWorldTV, YouTube video, February 13, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=nJXcFry9cWY>.

¹⁶¹ Para mais informações sobre os problemas que os LLMs têm com alucinações, veja Tom Simonite, “AT Has a Hallucination Problem That’s Proving Tough to Fix,” *Wired*, March 9, 2018, <https://www.wired.com/story/ai-has-a-hallucination-problem-thats-proving-tough-to-fix>; Craig S. Smith, “Hallucinations Could Blunt ChatGPT’s Success,” [IEEE Spectrum, March 13, 2023, <https://spectrum.ieee.org/ai-hallucination>; Cade Metz, “What Makes A.I. Chatbots Go Wrong?,” *New York Times*, March 29, 2023 (updated April 4, 2023), <https://www.nytimes.com/2023/03/29/technology/ai-chatbots-hallucinations.html>; Ziwei Ji et al., “Survey of Hallucination in Natural Language Generation,” *ACM Computing Surveys* 55, no. 12, article 248 (March 3, 2023): 1-38, <https://doi.org/10.1145/3571730>.

¹⁶² Jonathan Cohen, “Right on Track: NVIDIA Open-Source Software Helps Developers Add Guardrails to AI Chatbots,” NVIDIA, April 25, 2023, <https://blogs.nvidia.com/blog/2023/04/25/ai-chatbot-guardrails-nemo>.

¹⁶³ Turing, “Computing Machinery and Intelligence.”

¹⁶⁴ Turing, “Computing Machinery and Intelligence.”

¹⁶⁵ Por exemplo, em 2014, um chatbot chamado Eugene Goostman ganhou manchetes completamente imerecidas ao ser apontado como tendo passado no teste de Turing ao imitar um rapaz ucraniano de treze anos que falava um inglês precário. Veja Doug Aamoth “Interview with Eugene Goostman, the Fake Kid Who Passed the Turing Test,” *Time*, June 9, 2014, <https://time.com/2847900/eugene-goostman-turing-test>.

¹⁶⁶ Para mais informações da nossa equipa da Google sobre o funcionamento do Talk to Books, e para a minha entrevista no podcast TED com Chris Anderson, veja Google AI, “Talk to Books,” Experiments with Google, September 2018, <https://experiments.withgoogle.com/talk-to-books>; Chris Anderson, “Ray Kurzweil on What the Future Holds Next,” in The Ted Interview podcast, December 2018, https://www.ted.com/talks/the_ted_interview_ray_kurzweil_on_what_the_future_holds_next/transcript.

- ¹⁶⁷ Para uma explicação sobre a tecnologia fMRI, veja Mark Stokes, “What Does fMRI Measure?”, *Scitable*, May 16, 2015, https://www.nature.com/scitable/blog/brain-metrics/what_does_fmri_measure.
- ¹⁶⁸ Sriranga Kashyap et al., “Resolving Laminar Activation in Human V1 Using Ultra-High Spatial Resolution [fMRI at 7T]”, *Scientific Reports* 8, article 17-63 (November 20, 2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35333-3>; Jozien Goense, Yvette Bohraus, and Nikos K. Logothetis, “fMRI at High Spatial Resolution: Implications for BOLD-Models,” *Frontiers in Computational Neuroscience* 10, no. 66 (June 28, 2016), <https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00066>.
- ¹⁶⁹ Existem técnicas que podem alcançar uma resolução temporal de 100 milissegundos, mas isso implica uma degradação significativa da resolução espacial, aproximadamente entre 5 a 6 milímetros. Veja Benjamin Zahneisen et al., “Three-Dimensional MR-Encephalography: Fast Volumetric Brain Imaging Using Rosette Trajectories,” *Magnetic Resonance in Medicine* 65, no. 5 (May 2011): 1260-68, <https://doi.org/10.1002/mrm.22711>; David A. Feinberg et al., “Multiplexed Echo Planar Imaging for Sub-Second Whole Brain fMRI and Fast Diffusion Imaging,” *PloS ONE* 5, no. 12: e15710 (December 20, 2010), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015710>.
- ¹⁷⁰ Alexandra List et al., “Pattern Classification of EEG Signals Reveals Perceptual and Attentional States,” *PLoS ONE* 12, no. 4: e0176349 (April 26, 2017), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176349>; Boris Burle et al., “Spatial and Temporal Resolutions of EEG: Is It Really Black and White? A Scalp Current Density View,” *International Journal of Psychophysiology* 97, no. 3 (September 2015): 210-20, <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.05.004>.
- ¹⁷¹ Yahya Aghakhani et al., “Co-Localization Between the BOLD Response and Epileptiform Discharges Recorded by Simultaneous Intracranial EEG-fMRI at 3 T,” *Newrolmage: Clinical* 7 (2015): 755-63, <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2015.03.002>; Brigitte Stemmer and Frank A. Rodden, “Functional Brain Imaging of Language Processes,” in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, ed. James D. Wright, 2nd ed. (Amsterdam: Elsevier Science, 2015), 476-513, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.54009-4>; Burle et al., “Spatial and Temporal Resolutions of EEG”; Claudio Babiloni et al., “Fundamentals of Electroencephalography, Magnetoencephalography, and Functional Magnetic Resonance Imaging,” in *Brain Machine Interfaces for Space Applications: Enhancing Astronaut Capabilities*, ed. Luca Rossini, Dario Izzo, and Leopold Summerer (New York: Academic Press, 2009), 73, https://books.google.co.uk/books?id=I5QIbul_ZbEC.
- ¹⁷² Para ver o vídeo do sistema BrainGate em ação, veja BrainGate Collaboration, “Thought Control of Robotic Arms Using the BrainGate System,” NIH/NINDS, YouTube video, May 16, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=QRt8QCx3BCo>.
- ¹⁷³ Tech at Meta, “Imagining a New Interface: Hands-Free Communication Without Saying a Word,” Facebook Reality Labs, March 30, 2020, <https://tech.fb.com/imagining-a-new-interface-hands-free-communication-without-saying-a-word>; Tech at Meta, “BCI Milestone: New Research from UCSF with Support from Facebook Show Potential of Brain-Computer Interfaces for Restoring Speech Communication,” *Facebook Reality Labs*, July 14, 2021, <https://tech.fb.com/ar-yr/2021/07/bci-milestone-new-research-from-ucsf-with-support-from-facebook-shows-the-potential-of-brain-computer-interfaces-for-restoring-speech-communication>; Joseph G. Makin et al., “Machine Translation of Cortical Activity to Text with an Encoder-Decoder Framework,” *Nature Neuroscience* 23, no. 4 (March 30, 2020): 575-82, <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0608-8>.
- ¹⁷⁴ Antonio Regalado, “Facebook Is Ditching Plans to Make an Interface that Reads the Brain,” *MIT Technology Review*, July 14, 2021, <https://www.technologyreview.com/2021/07/14/1028447/facebook-brain-reading-interface-stops-funding>.
- ¹⁷⁵ Para uma explicação conceptual extensa mas muito acessível sobre os objetivos do Neuralink para interfaces cérebro-computador e o artigo de trabalho que explica esta tecnologia com mais detalhe técnico, veja Tim Urban, “Neuralink and the Brain’s Magical Future (G-Rated Version),” *Wait But Why*, April 20, 2017, <https://waitbutwhy.com/2017/04/neuralink-cleanversion.html>; Elon Musk and Neuralink, “An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels,” Neuralink working paper, July 17, 2019, bioRxiv 703801, <https://doi.org/10.1101/703801>.
- ¹⁷⁶ John Markoff, “Elon Musk’s Neuralink Wants ‘Sewing Machine-Like’ Robots to Wire Brains to the Internet,” *New York Times*, July 16, 2019, <https://www.nytimes.com/2019/07/16/technology/neuralink-elon-musk.html>.

¹⁷⁷ Para ver o macaco em ação, veja “Monkey MindPong,” Neuralink, YouTube vice April 8, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=rsCullsp4hQ>.

¹⁷⁸ Kelsey Ables, “Musk’s Neuralink Implants Brain Chip in its First Human Subject,” *Washington Post*, January 30, 2024, <https://www.washingtonpost.com/business/2024/01/30/neuralink-musk-first-human-brain-chip/>; Neuralink, “Neuralink Clinical Trial,” Neural accessed February 6, 2024, <https://neuralink.com/pdfs/PRIME-Study-Brochure.pdf>; Rachael Levy and Hyunjoon Jin, “Musk Expects Brain Chip Start-up Neuralink to Implant ‘First Case’ This Year,” Reuters, June 20, 2023, <https://www.reuters.com/technology/musk-expects-brain-chip-start-up-neuralink-implant-first-case-this-year-2023-06-16/>; Rachael Levy and Marisa Taylor, “U.S. Regulators Rejected Elon Musk’s Bid to Test Brain Chips in Humans, Citing Safety Risks,” Reuters, March 2, 2023, <https://www.reuters.com/investigates/special-report/neuralink-musk-fda/>; Mary Beth Griggs, “Elon Musk Claims Neuralink Is About ‘Six Months’ Away from First Human Trial,” *The Verge*, November 30, 2022, <https://www.theverge.com/2022/11/30/23487307/neuralink-elon-musk-show-and-tell-2022>.

¹⁷⁹ Andrew Tarantola, “DARPA Is Helping Six Groups Create Neural Interfaces for Our Brains,” *Engadget*, July 10, 2017, <https://www.engadget.com/2017-07-10-darpa-taps-five-organizations-to-develop-neural-interface-tech.html>.

¹⁸⁰ “Brown to Receive up to \$19M to Engineer Next-Generation Brain-Computer Interface,” Brown University, July 10, 2017, <https://www.brown.edu/news/2017-07-10/neurograins>; Jihun Lee et al., “Wireless Ensembles of Sub-mm Microimplants Communicating as a Network near 1 GHz in a Neural Application,” *bioRxiv* 2020.09.11.293829 (preprint), September 13, 2020, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.09.11.293829v1>.

¹⁸¹ Para mais informações sobre a estrutura hierárquica do neocórtex, veja Stewart Shipp, “Structure and Function of the Cerebral Cortex,” *Current Biology* 17, no. 12 (June 19, 2007): R443—R449, [https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(07\)01148-7.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(07)01148-7.pdf); Claus C. Hilgetag and Alexandros Goulas, “‘Hierarchy’ in the Organization of Brain Networks,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, February 24, 2020, <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0319>; Jeff Hawkins et al., “A Theory of How Columns in the Neocortex Enable Learning the Structure of the World,” *Frontiers in Neural Circuits*, October 25, 2017, <https://doi.org/10.3389/fncir.2017.00081>.

¹⁸² Por “diretamente”, refiro-me aqui ao facto de os neurónios biológicos e digitais estarem em comunicação funcional direta num sentido lógico e computacional. Porém, os sinais físicos seriam provavelmente transmitidos para e da nuvem através de um número menor de unidades de transmissão implantadas no corpo e/ou usadas externamente.

¹⁸³ Para uma breve explicação sobre a diferença entre a capacidade linguística dos animais e dos humanos, veja BenYami, “Can Animals Acquire Language?”

CAPÍTULO 3

¹ Samuel Butler, *Erewhon; Or, Over the Range*, 2nd ed. (London: Trübner & Co, 1872), 190, <http://www.gutenberg.org/files/1906/1906-h/1906-h.htm>.

² Butler, *Erewhon*, vi.

³ Para mais informações sobre o que a ciência e a filosofia nos dizem acerca da consciência animal, veja Colin Allen and Michael Trestman, “Animal Consciousness,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2017), <https://plato.stanford.edu/entries/consciousness-animal/>; “Just How Smart Are Dolphins?,” BBC Earth, YouTube video, October 19, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=6M920A-5-Y>; John Green, “Non-Human Animals,” CrashCourse, YouTube video, January 16, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=y3-BX-jN-Ac>; Joe Rogan and Roger Penrose, “Are Animals Conscious Like We Are?,” JRE Clips, YouTube video, December 18, 2018, https://www.youtube.com/watch?v=T1zY_KvGSZ4.

⁴ Para mais informações sobre a consciência dos roedores, veja Alla Katnelson, “What the Rat Brain Tells Us About Yours,” *Nautilus*, April 13, 2017, <http://nautil.us/issue/47/consciousness/what-the-rat-brain-tells-us-about-yours>; Jessica Hamzelou, “Zoned-Out Rats May Give Clue to Consciousness,” *New Scientist*, October 5, 2011, <https://www.newscientist.com/article/mg21128333-700>; Cyriel Pennartz et al., “Indicators and Criteria of Consciousness in

Animals and Intelligent Machines: An Inside-Out Approach,” *Frontiers in Systems Neuroscience* 13, no. 25 (July 16, 2019), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnsys.2019.00025/full>; “Scientists Manipulate Consciousness in Rats,” National Institutes of Health, December 18, 2015, <https://www.nih.gov/news-events/news-releases/scientists-manipulate-consciousness-rats>.

⁵ Douglas Fox, “Consciousness in a Cockroach,” *Discover*, January 10, 2007, <http://discovermagazine.com/2007/jan/cockroach-consciousness-neuron-similarity>; Suzana Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-Up Primate Brain,” *Frontiers in Human Neuroscience* 3, no. 31 (August 5, 2009), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2776484>.

⁶ Colin Barras, “Smart Amoebas Reveal Origins of Primitive Intelligence,” *New Scientist*, October 29, 2008, <https://www.newscientist.com/article/dn15068>; Yuriv V. Pershin et al., “Memristive Model of Amoeba’s Learning,” *Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* 80, 021926 (July 27, 2009), <https://arxiv.org/pdf/0810.4179.pdf>.

⁷ Para mais informações sobre a consciência relativamente avançada em animais, veja Philip Low et al., “The Cambridge Declaration on Consciousness,” Francis Crick Memorial Conference 2012: Consciousness in Animals, University of Cambridge, July 7, 2012, <http://femconference.org/img/CambridgeDeclarationOnConsciousness.pdf>; Virginia Morell, “Monkeys Master a Key Sign of Self-Awareness: Recognizing Their Reflections,” *Science*, February 13, 2017, <https://www.sciencemag.org/news/2017/02/monkeys-master-key-sign-self-awareness-recognizing-their-reflections>; Melanie Boly et al., “Consciousness in Humans and Nonhuman Animals: Recent Advances and Future Directions,” *Frontiers in Psychology* 4, no. 625 (October 31, 2013), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3814086>; Marc Bekoff, “Animals Are Conscious and Should be Treated as Such,” *New Scientist*, September 19, 2012, <https://www.newscientist.com/article/mg21528836-200>; Elizabeth Pennisi, “Are Our Primate Cousins ‘Conscious’?,” *Science* 284, no. 5423 (June 25, 1999): 2073-76.

⁸ Low et al., “Cambridge Declaration on Consciousness.”

⁹ Danielle S. Bassett and Michael S. Gazzaniga, “Understanding Complexity in the Human Brain,” *Trends in Cognitive Science* 15, no. 5 (May 2011): 200-209, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3170818>; Xerxes D. Arsiwalla and Paul Verschure, “Measuring the Complexity of Consciousness,” *Frontiers in Neuroscience* 12, no. 424 (June 27, 2018), <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00424>.

¹⁰ Para um vídeo acessível e envolvente sobre qualia e um tratamento enciclopédico mais profundo e técnico, veja Michael Stevens, “Is Your Red the Same as My Red?”, Vsauce, YouTube video, February 17, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=evQsOFQju08>; Michael Tye, “Qualia,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Summer 2018), <https://plato.stanford.edu/entries/qualia>.

¹¹ Para mais informações sobre o conceito de zombies de David Chalmers e o experimento mental relacionado de John Searle, a “o quarto chinês”, que mostra por que a consciência subjetiva não pode ser provada a partir do comportamento, veja John Green, “Where Does Your Mind Reside?”, CrashCourse, YouTube video, August 1, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=3SJROTXnmus>; John Green, “Artificial Intelligence & Personhood,” CrashCourse, YouTube video, August 8, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=39EdqUbj92U>; Marcus Du Sautoy, “The Chinese Room Experiment: The Hunt for AI,” BBC Studios, YouTube video, September 17, 2015 <https://www.youtube.com/watch?v=DOMD4sRHjIM>; Robert Kirk, “Zombies,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Spring 2019), <https://plato.stanford.edu/entries/zombies>; David Cole, “The Chinese Room Argument,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Spring 2019), <https://plato.stanford.edu/entries/chinese-room>.

¹² Para uma visão mais detalhada de Chalmers sobre os problemas difíceis e fáceis da consciência, veja David Chalmers, “Hard Problem of Consciousness,” *Serious Science*, YouTube video, July 5, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=C5DfnliZPGw>; David Chalmers, “The Meta-Problem of Consciousness,” Talks at Google, YouTube video, April 2, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=WvtL=QOBs50Y>; David Chalmers, “Facing Up to the Problem of Consciousness,” *Journal of Consciousness Studies* 2, no. 3 (1995): 200-219, <http://consc.net/papers/facing.html>.

¹³ Para as opiniões detalhadas de Chalmers sobre zombies, panprotopsiquismo e zombies filosóficos, veja David J. Chalmers, “Panpsychism and Panprotopsychism,” in *Panpsychism*, ed. Godehard Bruntrup and Ludwig Jaskolla (New York: Oxford University Press, 2016), <http://consc.net/papers/panpsychism.pdf>; David Chalmers, “Panpsychism and Explaining Consciousness,” Oppositum, TED Talk, YouTube video, January 18, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=SiYfN7-gaLk>; David Chalmers, “How Does Panpsychism Fit in Between Dualism and Materialism?,” Loyola Productions Munich, YouTube video, November 8, 2011, https://www.youtube.com/watch?v=OSmfhc_8gew.

¹⁴ O físico vencedor do Prémio Nobel Sir Roger Penrose desenvolveu, juntamente com o médico Stuart Hameroff, uma teoria provocadora chamada redução objetiva orquestrada (Orch OR), que tenta explicar a consciência como surgindo de processos quânticos dentro de moléculas situadas nos neurónios, chamadas microtúbulos. Contudo, esta teoria ainda não conseguiu obter muita aceitação dentro da comunidade científica. Físicos como Max Tegmark observaram que os efeitos quânticos provavelmente se descoerem demasiado rapidamente no cérebro para influenciar estruturas em macroescala e controlar o comportamento. Embora o Orch OR seja uma possibilidade fascinante, não vi nenhuma evidência convincente de que a física quântica seja necessária para explicar a consciência funcional no cérebro. Veja Steve Paulson, “Roger Penrose on Why Consciousness Does Not Compute,” *Nautilus*, April 27, 2017, <https://nautil.us/roger-penrose-on-why-consciousness-does-not-compute-236591>; Max Tegmark, “The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes,” *Physical Review E: Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* 61 (May 2000): 4194-206, <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9907009.pdf>; Stuart Hameroff, “How Quantum Brain Biology Can Rescue Conscious Free Will,” *Frontiers in Integrative Neuroscience* 6, article 93 (October 12, 2012), <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.00093>.

¹⁵ Para uma análise mais profunda sobre o livre-arbítrio e as escolas de pensamento concorrentes sobre este tema na filosofia e na política, veja John Green, “Determinism vs. Free Will,” Crash Course, YouTube video, August 15, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=vCGtkDzELAL>; M. S., “Free Will and Politics,” *Economist*, January 12, 2012, <https://www.economist.com/democracy-in-america/2012/01/12/free-will-and-politics>; Timothy O’Connor and Christopher Franklin, “Free Will,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Summer 2019), <https://plato.stanford.edu/entries/freewill/>; Randolph Clarke and Justin Capes, “Incompatibilist (Nondeterministic) Theories of Free Will,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Spring 2017), <https://plato.stanford.edu/entries/incompatibilism-theories/>; Michael McKenna and Justin D. Coates, “Compatibilism,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2018), <https://plato.stanford.edu/entries/compatibilism/>.

¹⁶ Para uma variedade de perspetivas interessantes e não técnicas sobre o livre-arbítrio e a predeterminação, veja Shaun Nichols, “Free Will Versus the Programmed Brain,” *Scientific American*, August 19, 2008, <https://www.scientificamerican.com/article/free-will-vs-programmed-brain>; Bill Nye, “Hey Bill Nye, Do Humans Have Free Will?,” Big Think, YouTube video, January 19, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=ITdMa2bCaVe>; Michio Kaku, “Why Physics Ends the Free Will Debate,” Big Think, YouTube video, May 20, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=Jint5kjoy6l>; Stephen Cave, “There’s No Such Thing as Free Will,” *Atlantic*, June 2016, <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2016/06/theres-no-such-thing-as-free-will/480750>.

¹⁷ Simon Blackburn, *Think: A Compelling Introduction to Philosophy* (Oxford, UK: Oxford University Press, 1999), 85, <https://books.google.co.uk/books?id=yEITQSyxAMC>.

¹⁸ Para explicações mais aprofundadas e demonstrações sobre autómatos celulares, veja Daniel Shiffman, “Cellular Automata,” chap. 7 in *The Nature of Code* (Magic Book Project, 2012), <https://natureofcode.com/book/chapter-7-cellular-automata>; Devin Acker, “Elementary Cellular Automaton,” Github.io, accessed March 10, 2023, <http://devinacker.github.io/celldemo>; Francesco Berto and Jacopo Tagliabue, “Cellular Automata,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Fall 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/cellular-automata>.

¹⁹ John Conway’s Game of Life,” Bitstorm.org, accessed March 10, 2023, <https://bitstorm-org/gameoflife>; “Life in Life,” Phillip Bradbury, YouTube video, May 13, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=xP5-ileKXE8>; Amanda Ghassaei, “OTCA Metapixel — Conway’s Game of Life,” Trybotics, accessed March 10, 2023, <https://trybotics.com/project/OTCA-Metapixel-Conways-Game-of-Life-98534>.

²⁰ Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Champaign, IL: Wolfram Media, 2002), 23-41, 58-70.

²¹ Wolfram, *New Kind of Science*, 56, <https://www.wolframscience.com/nks/>.

-
- ²² Wolfram, *New Kind of Science*, 56, <https://www.wolframscience.com/nks>.
- ²³ Wolfram, *New Kind of Science*, 23-27, 31, <https://www.wolframscience.com/nks>.
- ²⁴ Wolfram, *New Kind of Science*, 23-27, 31, <https://www.wolframscience.com/nks>.
- ²⁵ Para o artigo fundamental de Wolfram sobre autómatos celulares e complexidade, veja Stephen Wolfram, "Cellular Automata as Models of Complexity," *Nature* 311, no. 5985 (October 1984), <https://www.stephenwolfram.com/publications/academic/cellular-automata-models-complexity.pdf>.
- ²⁶ Para uma explicação rápida sobre emergência, veja Emily Driscoll and Lottie Kingslake, "What Is Emergence?," *Quanta Magazine*, YouTube video, December 20, 2018, https://www.youtube.com/watch?v=TlysTnxF_6c.
- ²⁷ Wolfram, *New Kind of Science*, 31.
- ²⁸ Para explorar mais informações sobre o Projeto de Física de Wolfram, incluindo visualizações e ferramentas interativas, visite www.wolframphysics.org. Para uma explicação técnica altamente detalhada, veja Stephen Wolfram, "A Class of Models with the Potential to Represent Fundamental Physics," *Complex Systems* 29, no. 2 (April 2020): 107-536, <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.29.2.107>.
- ²⁹ A forma de determinismo à prova de previsão proposta por Wolfram também é compatível com a aparente aleatoriedade dos eventos quânticos — estes seguiriam regras determinísticas, mas não de uma maneira que pudesse revelar qualquer informação útil sobre o seu comportamento futuro. Vale a pena notar que, enquanto as propriedades da física quântica podem ser aproveitadas para gerar números que são verdadeiramente aleatórios, pelo menos para qualquer pessoa dentro do universo, estes números não possuem propriedades emergentes como os autómatos de classe 4. Por outras palavras, se soubermos que vamos obter uma distribuição aleatória e não ponderada de 1s e 0s, nada de mais complexo emergirá a partir disso. Poderão existir sequências longas, como 11111111, por exemplo, mas cada novo dígito é independente do anterior. Assim, pode-se dizer de imediato que a probabilidade de o bilionésimo dígito ser 1 é de 50%, sem necessidade de conhecer os que o precederam. Isto é consistente com o paradigma científico convencional, onde as leis por si só explicam totalmente o comportamento dos fenómenos que descrevem. Veja Xiongfeng Ma et al., "Quantum Random Number Generation," *npj Quantum Information* 2, article 16021 (June 28, 2016), <https://www.nature.com/articles/npjqi201621>.
- ³⁰ Para mais explicações sobre o Projeto Blue Brain, que descobriu as estruturas cerebrais em onze dimensões e está a trabalhar para mapear e reconstruir digitalmente cérebros de animais (e, eventualmente, de humanos), veja "Blue Brain Team Discovers a Multi-Dimensional Universe in Brain Networks," *Frontiers Science News*, June 12, 2017, <https://blog.frontiersin.org/2017/06/12/blue-brain-team-discovers-a-multi-dimensional-universe-in-brain-networks>; Michael W. Reimann et al., "Cliques of Neurons Bound into Cavities Provide a Missing Link Between Structure and Function," *Frontiers in Computational Neuroscience* 11, no. 48 (June 12, 2017) <https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00048>.
- ³¹ Veja John Green, "Compatibilism," CrashCourse, YouTube video, August 22, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=KETTtiprINU>; McKenna and Coates, "Compatibilism."
- ³² Esta é uma forma de compatibilismo, a escola filosófica de pensamento que considera o livre-arbítrio como sendo significativamente possível, mesmo num universo que segue algum tipo de regra determinista. Veja Green, "Compatibilism"; McKenna and Coates, "Compatibilism," *Stanford Encyclopedia*.
- ³³ Para mais informações sobre a relação entre os hemisférios do nosso cérebro, revelada pelas últimas décadas de investigação em neurociência, consulte "Ned Herrmann, 'Is It True That Creativity Resides in the Right Hemisphere of the Brain?'," *Scientific American*, January 26, 1998, <https://www.scientificamerican.com/article/is-it-true-that-creativity>; Dina A. Lienhard, "Roger Sperry's Split Brain Experiments (1959-1968)," *Embryo Project Encyclopedia*, December 27, 2017 <https://embryo.asu.edu/pages/roger-sperrys-split-brain-experiments-1959-1968>; David Wolman, "The Split Brain: A Tale of Two Halves," *Nature* 483, no. 7389 (March 14, 2012) 260-63, <https://www.nature.com/news/the-split-brain-a-tale-of-two-halves-1.10213>.

- ³⁴ Stella de Bode and Susan Curtiss, "Language After Hemispherectomy," *Brain and Cognition* 43, nos. 1-3 (June–August 2000): 135-205.
- ³⁵ Dana Boatman et al., "Language Recovery After Left Hemispherectomy in Children with Late-Onset Seizures," *Annals of Neurology* 46, no. 4 (April 1999): 579-86, https://www.ecaademia.edu/21485724/Language_recovery_after_left_hemispherectomy_in_children_with_late-onset_seizures.
- ³⁶ Jing Zhou et al., "Axon Position Within the Corpus Callosum Determines Contralateral Cortical Projection," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 29 (July 16 2013): E2714-E2723, <https://doi.org/10.1073/pnas.1310233110>.
- ³⁷ Benedict Carey, "Decoding the Brain's Cacophony," *New York Times*, October 31, 2011, <https://www.nytimes.com/2011/11/01/science/telling-the-story-of-the-brains-cacophony-of-competing-voices.html>; Michael Gazzaniga, "The Split Brain in Man," *Scientific American* 217, no. 2 (August 1967): 24-29, <https://doi.org/10.1038%2Fscientificamerican0867-24>; Alan Alda and David Huntley, "Pieces of Mind," *Scientific American Frontiers* (PBS, 1997), ctshad, YouTube video, <https://www.youtube.com/watch?v=lfGwsAdS9Dc>.
- ³⁸ Michael S. Gazzaniga, "Principles of Human Brain Organization Derived from Split-Brain Studies," *Neuron* 14, no. 2 (February 1995): 217-28, [https://doi.org/10.1016/0896-6273\(95\)90280-5](https://doi.org/10.1016/0896-6273(95)90280-5); Roger W. Sperry, "Consciousness, Personal Identity, and the Divided Brain," in *The Dual Brain: Hemispheric Specialization in Humans*, ed. D. F. Benson and Eran Zaidel (New York: Guilford Publications, 1985), 11-25; William Hirstein, "Self-Deception and Confabulation," *Philosophy of Science* 67, no. 3 (September 2000): S418-S429, www.jstor.org/stable/188684.
- ³⁹ Gazzaniga, "Principles of Human Brain Organization"; Sperry, "Consciousness, Personal Identity, and the Divided Brain"; Hirstein, "Self-Deception and Confabulation."
- ⁴⁰ Richard Apps et al., "Cerebellar Modules and Their Role as Operational Cerebellar Processing Units," *Cerebellum* 17, no. 5 (June 6, 2018): 654-682, <https://doi.org/10.1007/s12311-018-0952-3>; Jan Voogd, "What We Do Not Know About Cerebellar Systems Neuroscience," *Frontiers in Systems Neuroscience* 8, no. 227 (December 18, 2014), <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00227>.
- ⁴¹ Para mais informações sobre a teoria da sociedade da mente e como esta se relaciona com a neurociência atual, veja Marvin Minsky, "The Society of Mind, Theory Developed from Teaching," Web of Stories — Life Stories of Remarkable People, YouTube video, October 5, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=HU2SZEw4EWg>; Marvin Minsky, "Biological Plausibility of the Society of Mind Theory," Web of Stories — Life Stories of Remarkable People, YouTube video, October 31, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=e02WbBd0F70>; Michael N. Shadlen and Adina L. Roskies, "The Neurobiology of Decision-Making and Responsibility: Reconciling Mechanism and Mindedness," *Frontiers in Neuroscience* 6, no. 56 (April 23, 2012), <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00056>; Johannes Friedrich and Máté Lengyel, "Goal-Directed Decision Making with Spiking Neurons," *Journal of Neuroscience* 36, no. 5 (February 3, 2016): 1529-46, <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2854-15.2016>; Marvin Minsky, *The Society of Mind* (New York: Simon & Schuster, 1986).
- ⁴² Sarvi Sharifi et al., "Neuroimaging Essentials in Essential Tremor: A Systematic Review," *NeuroImage Clinical* 5 (May 2014): 217-31, <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.05.003>; Rick C. Helmich, David E. Vaillancourt, and David J. Brooks, "The Future of Brain Imaging in Parkinson's Disease," *Journal of Parkinson's Disease* 8, no. s1 (2018): S47-S51, <https://doi.org/10.3233/JPD-181482>.
- ⁴³ Para mais informações sobre a filosofia por detrás da identidade e da mudança, consulte Andre Gallois, "Identity Over Time," in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2016), <https://plato.stanford.edu/entries/identity-time>.
- ⁴⁴ Duncan Graham-Rowe, "World's First Brain Prosthesis Revealed," *New Scientist*, March 2003, <https://www.newscientist.com/article/dn3488>.
- ⁴⁵ Robert E. Hampson et al., "Developing a Hippocampal Neural Prosthetic to Facilitate Human Memory Encoding and Recall," *Journal of Neural Engineering* 15, no. 3 (March 28, 2018), <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaad7>.

- ⁴⁶ Para uma explicação menos técnica e outra mais técnica sobre a renovação mitocondrial, veja Jon Lieff, “Dynamic Relationship of Mitochondria and Neurons,” [jonlieffmd.com](https://jonlieffmd.com/tag/dynamic-of-fission-and-fusion), February 2, 2014, <https://jonlieffmd.com/tag/dynamic-of-fission-and-fusion>; Thomas Misgeld and Thomas L. Schwarz, “Mitostasis in Neurons: Maintaining Mitochondria in an Extended Cellular Architecture,” *Neuron* 96, no. 3 (November 1, 2017): 651–66, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5687842>.
- ⁴⁷ Samuel F. Bakhom and Duane A. Compton, “Kinetochores and Disease: Keeping Microtubule Dynamics in Check!”, *Current Opinion in Cell Biology* 24, no. 1 (February 2012): 64–70, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3294090/#R13>; Vincent Meininger and Stephane Binet, “Characteristics of Microtubules at the Different Stages of Neuronal Differentiation and Maturation,” *International Review of Cytology* 114 (1989): 21–79, [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(08\)60858-X](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)60858-X).
- ⁴⁸ Laurie D. Cohen et al., “Metabolic Turnover of Synaptic Proteins: Kinetics, Interdependencies and Implications for Synaptic Maintenance,” *PLoS One* 8, no. 5; e63191 (May 2, 2013), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063191>.
- ⁴⁹ K. H. Huh and R. J. Wenthold, “Turnover Analysis of Glutamate Receptors Identifies a Rapidly Degraded Pool of the N-methyl-D-aspartate Receptor Subunit, NR1, in Cultured Cerebellar Granule Cells,” *Journal of Biological Chemistry* 274, no. 1 (January 1, 1999): 151–57, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9867823>.
- ⁵⁰ Erin N. Star, David J. Kwiatkowski, and Venkatesh N. Murthy, “Rapid Turnover of Actin in Dendritic Spines and its Regulation by Activity,” *Nature Neuroscience* 5, no. 3 (March 2002): 239–46, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11850630>.
- ⁵¹ “Female Reproductive System,” Cleveland Clinic, accessed March 10, 2023, <https://my.clevelandclinic.org/health/articles/9118-female-reproductive-system>; Robert D. Martin, “The Macho Sperm Myth,” *Aeon*, August 23, 2018, <https://aeon.co/essays/the-idea-that-sperm-race-to-the-egg-is-just-another-macho-myth>.
- ⁵² Timothy G. Jenkins et al., “Sperm Epigenetics and Aging,” *Translational Andrology and Urology* 7, suppl. 3 (July 2018): S328–S335, <https://doi.org/10.21037/tau.2018.06.10>; Ida Donkin and Romain Barrès, “Sperm Epigenetics and the Influence of Environmental Factors,” *Molecular Metabolism* 14 (August 2018): 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.molmet.2018.02.006>.
- ⁵³ Holly C. Betts et al., “Integrated Genomic and Fossil Evidence Illuminates Life’s Early Evolution and Eukaryote Origin,” *Nature Ecology & Evolution* 2 (August 20, 2018): 1556–62, <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0644-x>; Elizabeth Pennisi, “Life May Have Originated on Earth 4 Billion Years Ago, Study of Controversial Fossils Suggests,” *Science*, December 18, 2017, <https://www.sciencemag.org/news/2017/12/life-may-have-originated-earth-4-billion-years-ago-study-controversial-fossils-suggests>; Michael Marshall, “Timeline: The Evolution of Life,” *New Scientist*, July 14, 2009, <https://institutions.newscientist.com/article/dn17453-timeline-the-evolution-of-life>.

⁵⁴ Sem ter em conta as probabilidades de os seus pais se terem conhecido e de terem decidido ter um filho, as probabilidades de duas células reprodutivas específicas se encontrarem, no caso de irem gerar uma criança, são de cerca de uma em dois quintilhões. O mesmo se aplica aos seus dois pais, aos seus avós, e a todos os seus antepassados, remontando até ao início da linhagem. No caso de um antepassado de há vários séculos, é provável que nem tenha herdado qualquer parte do seu material genético, mas, se qualquer elo dessa cadeia genética tivesse sido quebrado, alguns dos seus antepassados intermédios poderiam não ter nascido, poderiam ter morrido prematuramente devido a doenças hereditárias, ou poderiam ter casado com outras pessoas. Cada ramo da sua árvore genealógica repousa sobre esta lâmina afiada da contingência.

Assim, (falando de forma muito aproximada) as probabilidades genéticas e epigenéticas de toda a linhagem humana ter culminado em si são de uma em 2.000.000.000.000.000 elevada ao número total de antepassados que tem — mas não apenas os “antepassados únicos”. Os seus centésimos trisavós provavelmente viveram algures entre a época de Buda e a de Jesus. Só ao multiplicarmos o tamanho da sua árvore genealógica, percebe-se que tinha cerca de 1,3 nonilhões de centésimos trisavós, numa altura em que a população humana era inferior a 400 milhões. A resposta para este aparente paradoxo é a consanguinidade. Ao recuar na sua árvore genealógica, verificaria que os seus antepassados eram, todos eles, primos distantes uns dos outros, o que significa que uma única pessoa pode ser sua antepassada por diversas vias. Para fazer uma contagem “normal” de antepassados, consideraríamos apenas os indivíduos únicos. Mas, ao estimar o grau de improbabilidade da nossa própria ancestralidade, o que nos interessa são as relações — e, por isso, devemos contar a mesma pessoa mais de uma vez, se ela tiver desempenhado vários papéis, como por exemplo ter sido ao mesmo tempo seu oitavo e nono trisavô, pois continua a ter sido uma questão de acaso que essa pessoa ocupasse ambas as posições.

Tendo existido, aproximadamente, 10.000 gerações de *Homo sapiens*, a sua identidade precisa depende de cerca de $2^{2^{10,000}}$ eventos genealógicos — ou seja, aproximadamente $4 \times 10^{3,010}$. Assim, dois quintilhões elevados a esse número como expoente dão-nos o denominador das probabilidades totais, que corresponde a cerca de $10^{10^{3,011}}$. Este número é incomensuravelmente superior até a um googolplex, e contém mais zeros do que há átomos em todo o universo conhecido. E isto diz apenas respeito à humanidade. O biólogo de Oxford Richard Dawkins estima que existam cerca de 300 milhões de gerações desde os protóstomos — alguns dos nossos primeiros antepassados com reprodução sexual. Não existem dados rigorosos que nos levem até à aurora da vida, há quase quatro mil milhões de anos, mas as estimativas mais prováveis apontam para um total da ordem de um bilião de gerações. Basta dizer que a razão de probabilidades de toda esta genealogia se torna tão absolutamente gigantesca que é impossível compreendê-la intelectualmente. Todos nós estamos de pé no cume de uma montanha feita de acaso e boa fortuna que se estende tão profundamente no espaço e no tempo que não conseguimos sequer avistar a sua base.

Para mais informações sobre a evolução humana e os dados que sustentam estas estimativas, ver Max Ingman et al., “Mitochondrial Genome Variation and the Origin of Modern Humans,” *Nature* 408 (December 7, 2000): 713, https://www.eva.mpg.de/fileadmin/content_files/staff/paabo/pdf/Ingman_MitNat_2000.pdf; Donn Devine, “How Long Is a Generation?,” *Ancestry* ca, March 10, 2023, https://web.archive.org/web/20200111102741/https://www.ancestry.ca/learn/learningcenters/default.aspx?section=lib_Generation; Adam Rutherford, “Ant and Dec’s DNA Test Merely Tells Us That We’re All Inbred,” *Guardian*, November 12, 2019, <https://www.theguardian.com/commentisfree/2019/nov/12/ant-and-dec-dna-test-al-inbred-historical-connections>; Alva Noë, “DNA, Genealogy and the Search for Who We Are,” NPR, January 29, 2016, <https://www.npr.org/sections/13.7/2016/01/29/464805509/dna-genealogy-and-the-search-for-who-we-are>; Alison Jolly, *Lucy’s Legacy: Sex and Intelligence in Human Evolution* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1999), 55, https://books.google.co.uk/books?id=7mSMa2Zl1_YkC; Simon Conway Morris, “The Fossils of the Burgess Shale and the Cambrian ‘Explosion’: Their Implications for Evolution,” in *Killers in the Brain: Essays in Science and Technology from the Royal Institution*, ed. Peter Day (Oxford, UK: Oxford University Press, 1999), 22, <https://books.google.co.uk/books?id=v3Eo4UqbbYsC>; Richard Dawkins and Yan Wong, *The Ancestor’s Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Evolution* (New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2004), 379; John Carl Villanueva, “How Many Atoms Are in the Universe?,” *Universe Today*, July 30, 2009, <https://www.universetoday.com/36302/atoms-in-the-universe>; Tim Urban, “Meet Your Ancestors (All of Them),” *Wait But Why*, December 18, 2013, <https://waitbutwhy.com/2013/12/your-ancestor-is-jellyfish.html>.

⁵⁵ Para algumas perspectivas científicas sobre o ajustamento fino do universo, ver Leonard Susskind, “Is the Universe Fine-Tuned for Life and Mind?,” *Closer to Truth*, YouTube video, January 8, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=2cl4zZlHR3s>; Martin J. Rees, “Why Cosmic Fine-Tuning Demands Explanation,” *Closer to Truth*, YouTube video, January 23, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=XjE6f0SzGYd>; Simon Friedrich, “Fine-Tuning,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2018), <https://plato.stanford.edu/entries/fine-tuning/#FineTuneCondEUanrivl>.

⁵⁶ Segundo o Modelo Padrão, existem seis tipos de quarks, seis antiquarks, seis léptons, seis antiléptons, oito glúões, fótons, bósons W+, bósons W-, bósons Z, e o bóson de Higgs. Para mais informações sobre o que é conhecido como o “zoo de partículas” do Modelo Padrão, veja Julian Huguet, “Subatomic Particles Explained in Under 4 Minutes,” *Seeker*, YouTube video, December 18, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=eD7hXLRWqM;W> Peter Kalmus, “The Physics of Elementary Particles: Part I,” *Plus Magazine*, April 21, 2015, <https://plus.maths.org/content/physics-elementary-particles>; Guido Altarelli and James Wells, “Gauge Theories and the Standard Model,” in *Collider Physics Within the Standard Model*, vol. 937 of *Lecture Notes in Physics*, ed. James Wells (Cham, Switzerland: Springer Open, 2017), https://doi.org/10.1007/978-3-319-51920-3_1.

⁵⁷ Para explicações úteis sobre a abiogénese e o experimento de Miller-Urey de 1952, que demonstrou a sua viabilidade, veja Paul Anderson, “Abiogenesis,” *Bozeman Science*, YouTube video, June 25, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=W3ceg-uQKM;W> “What Was the Miller-Urey Experiment,” *Stated Clearly*, YouTube video, October 27, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=NNijmxsKGbe>.

⁵⁸ Friedrich, “Fine-Tuning,” *Stanford Encyclopedia*; Luke A. Barnes, “The Fine-Tuning of the Universe for Intelligent Life,” *Publications of the Astronomical Society of Australia* 29, no. 4 (2012): 529-64, doi:10.1071/AS12015.

-
- ⁵⁹ Friedrich, "Fine-Tuning," *Stanford Encyclopedia*; Lawrence J. Hall et al., "The Weak Scale from BBN," *Journal of High Energy Physics* 2014, no. 12, article 134 (2014), [http://doi.org/10.1007/JHEP12\(2014\)134](http://doi.org/10.1007/JHEP12(2014)134); Bernard J. Carr and Martin J. Rees, "The Anthropic Principle and the Structure of the Physical World," *Nature* 278 (April 12, 1979): 605-12, <https://www.nature.com/articles/278605a0>.
- ⁶⁰ Craig J. Hogan, "Why the Universe Is Just So," *Reviews of Modern Physics* 72, no. 4 (October 1, 2000): 1149-61, <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.72.1149>; Craig J. Hogan, "Quarks, Electrons, and Atoms in Closely Related Universes," in *Universe or Multiverse*, ed. Bernard Carr (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007), 221-30.
- ⁶¹ Hogan, "Why the Universe Is Just So"; Hogan, "Quarks, Electrons, and Atoms," 221-30.
- ⁶² Hogan, "Quarks, Electrons, and Atoms," 224.
- ⁶³ Hogan, "Quarks, Electrons, and Atoms," 224-25.
- ⁶⁴ Hogan, "Quarks, Electrons, and Atoms," 224-25.
- ⁶⁵ Para uma exploração mais detalhada das evidências sobre o ajuste fino das leis físicas, incluindo o ajuste fino da gravidade como necessário para a formação de elementos pesados, consulte Friedrich, "Fine-Tuning," *Stanford Encyclopedia*; Carr and Rees, "Anthropic Principle and the Structure of the Physical World," 605-12.
- ⁶⁶ Michael Brooks, "Gravity Mysteries: Why Is Gravity Fine-Tuned?", *New Scientist*, June 10, 2009, <https://www.newscientist.com/article/mg20227123-000>.
- ⁶⁷ Tim Radford, "Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe by Martin Rees — Review," *Guardian*, June 8, 2012, <https://www.theguardian.com/science/2012/jun/08/just-six-numbers-martin-rees-review>; Brooks, "Gravity Mysteries: Why Is Gravity Fine-Tuned?"
- ⁶⁸ Friedrich, "Fine-Tuning," *Stanford Encyclopedia*; Max Tegmark and Martin J. Rees, "Why Is the Cosmic Microwave Background Fluctuation Level 10^{-5} ?", *Astronomical Journal* 499, no. 2 (June 1, 1998): 526-32, <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/305673/pdf>.
- ⁶⁹ Friedrich, "Fine-Tuning," *Stanford Encyclopedia*; Tegmark and Rees, "Why Is the Cosmic Microwave Background Fluctuation Level 10^{-5} ?"
- ⁷⁰ Martin J. Rees, *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe* (New York: Weidenfeld & Nicholson, 1999), 104.
- ⁷¹ Rees, *Just Six Numbers*, 104.
- ⁷² Friedrich, "Fine-Tuning," *Stanford Encyclopedia*; Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe* (New York: Vintage, 2004), 729-30.
- ⁷³ Tony Padilla, "How Many Particles in the Universe?", Numberphile, YouTube video, July 10, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=lpjOE0aOmIU>; Villanueva, "How Many Atoms Are in the Universe?"; Jacob Aron, "Number of Ways to Arrange 128 Balls Exceeds Atoms in Universe," *New Scientist*, January 28, 2016, <https://www.newscientist.com/article/2075593>.
- ⁷⁴ Luke Barnes (L.A. Barnes), "The Fine-Tuning of the Universe for Intelligent Life," *Publications of the Astronomical Society of Australia* 29, no. 4 (June 7, 2012): 5315 [https://www.publish.csiro.au/as/pdf/A\\$12015](https://www.publish.csiro.au/as/pdf/A$12015).
- ⁷⁵ Brad Lemley, "Why Is There Life?", *Discover*, November 2000, <http://discovermagazine.com/2000/nov/cover>.
- ⁷⁶ Para mais informações sobre o princípio antrópico, incluindo uma fascinante conversa entre o biólogo ateu Richard Dawkins e o astrónomo católico Fr. George Coyne, veja Roberto Trotta, "What Is the Anthropic Principle?", *Physics World*, YouTube video, January 17, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=dWkJ8PI-818>; Richard Dawkins and George Coyne, "The

Anthropic Principle,” jlcamel, July 9, 2010, <https://youtu.be/lm9ZrYkdEQ?t=102>; Joe Rogan and Nick Bostrom, “Joe Rogan Experience #1350 — Nick Bostrom”, PowerfulJRE, September 11, 2019, <https://web.archive.org/web/20190918171740/https://www.youtube.com/watch?v=5c4cv7rVIE8>; Christopher Smeenk and George Ellis, “Philosophy of Cosmology,” in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta (Winter 2017), <https://plato.stanford.edu/entries/cosmology>.

⁷⁷ Lemley, “Why Is There Life?”

⁷⁸ Para uma explicação acessível sobre as GANs, bem como alguns artigos fascinantes sobre tecnologias emergentes que permitirão recriações em IA de pessoas falecidas, veja Robert Miles, “Generative Adversarial Networks (GANs),” Computerphile, YouTube video, October 25, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=Sw9r8CL98NO0>; Michael Kammerer, “I Trained an AI to Imitate My Own Art Style. This Is What Happened,” *Towards Data Science*, March 28, 2019, <https://towardsdatascience.com/i-trained-an-ai-to-imitate-my-own-art-style-this-is-what-happened-461785b9a5b>; Ana Santos Rutschman, “Artificial Intelligence Can Now Emulate Human Behaviors — Soon It Will Be Dangerously Good,” *The Conversation*, April 5, 2019, <https://theconversation.com/artificial-intelligence-can-now-emulate-human-behaviors-soon-it-will-be-dangerously-good-114136>; Catherine Stupp, “Fraudsters Used AI to Mimic CEO’s Voice in Unusual Cybercrime Case,” *Wall Street Journal*, August 30, 2019, <https://www.wsj.com/articles/fraudsters-use-ai-to-mimic-ceos-voice-in-unusual-cybercrime-case-11567157402>; David Nield, “New AI Generates Freakishly Realistic People Who Don’t Actually Exist,” *Science Alert*, February 19, 2019, <https://www.sciencealert.com/ai-is-getting-creepily-good-at-generating-faces-for-people-who-don-t-actually-exist>; Alec Radford et al., “Better Language Models and Their Implications,” OpenAI, February 14, 2019, <https://openai.com/blog/better-language-models>; Richard Socher, “Introducing a Conditional Transformer Language Model for Controllable Generation”, Salesforce Einstein, accessed March 10, 2023, <https://blog.einstein.ai/introducing-a-conditional-transformer-language-model-for-controllable-generation>.

⁷⁹ Jeffrey Grubb, “Google Duplex; A.I. Assistant Calls Local Businesses to Make Appointments,” Jeff Grubb’s Game Mess, YouTube video, May 8, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=D5VN56jQMWM>.

⁸⁰ Monkeypaw Productions and BuzzFeed, “You Won’t Believe What Obama Says in This Video,” BuzzFeedVideo, YouTube video, April 17, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=cQ54GDmleL0>; “Could Deepfakes Weaken Democracy?”, Economist, YouTube video, October 22, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=m2dRDQECIA>; Kristin Houser, “This ‘RoboTrump’ AI Mimics the President’s Writing Style,” *Futurism*, October 23, 2019, <https://futurism.com/robotrump-ai-text-generator-trump>.

⁸¹ “No Country for Old Actors,” Ctrl Shift Face, YouTube video, November 13, 2019, https://www.youtube.com/watch?Pv=Ow_uufCxm1A.

⁸² Casey Newton, “Speak, Memory,” *The Verge*, October 6, 2016, <https://www.theverge.com/a/luca-artificial-intelligence-memorial-roman-mazurenko-bot>.

⁸³ Para uma explicação clara e envolvente sobre a ciência por detrás do vale da estranheza, veja Michael Stevens, “Why Are Things Creepy?”, Vsauce, YouTube video, July 2, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=PHikGKDVScC>.

⁸⁴ Para mais informações sobre o desenvolvimento realista dos andróides e o paradoxo de Moravec, veja Tim Hornyak, “Insanely Humanlike Androids Have Entered the Workplace and Soon May Take Your Job,” *CNBC*, October 31, 2019, <https://www.cnbc.com/2019/10/31/human-like-androids-have-entered-the-workplace-and-may-take-your-job.html>; Jade ‘Tan-Holmes, “Moravec’s Paradox — Why Are Machines So Smart, Yet So Dumb?”, Up and Atom, YouTube video, July 8, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=kvC3=Dhpc0f>; J. C. Eccles, “Evolution of Consciousness,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89, no. 16 (August 15, 1992): 7320-24, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC49701>; Hans Moravec, *Mind Children* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988), 1-50.

⁸⁵ John Hawks, “How Has the Human Brain Evolved?”, *Scientific American Mind* 24, no. 3 (July 1, 2013): 76, <https://doi.org/10.1038/scientificamericanmind0713-76b>.

⁸⁶ “ASIMO World2001-2/3,” jnomw, YouTube video, October 28, 2006, https://www.youtube.com/watch?v=Ph_B_5hKRIE.

⁸⁷ “More Parkour Atlas,” BostonDynamics, YouTube video, September 24, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=sBBaNYex3E>.

⁸⁸ “Sophia the Robot by Hanson Robotics,” Hanson Robotics Limited, YouTube video, September 5, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=BhU9hOo5Cuc>; “Meet Little Sophia, Hanson Robotics’ Newest Robot,” Hanson Robotics Limited, YouTube video, February 11, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=7cGRPvN5430>; “Ameca Expressions with GPT3 / 4,” Engineered Arts, YouTube video, March 31, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=yUszJyS3d7A>.

⁸⁹ Anders Sandberg and Nick Bostrom, *Whole Brain Emulation: A Roadmap, technical report* 2008-3, Future of Humanity Institute, Oxford University (2008), 13, <https://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulation-roadmap-report.pdf>.

⁹⁰ Sandberg and Bostrom, *Whole Brain Emulation*, 80-81.

⁹¹ Para mais recursos relacionados com o carregamento da mente e a emulação do cérebro, consulte S. A. Graziano, “How Close Are We to Uploading Our Minds?”, TED-Ed, YouTube video, October 29, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=2DWnvx1NYUA>; Trace Dominguez, “How Close Are We to Downloading the Human Brain?”, *Seeker*, YouTube video, September 13, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=DE5e5zF6a-8>; Michio Kaku, “Could We Transport Our Consciousness Into Robots?”, *Big Think*, YouTube video, May 31, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=tT1vxEplal>; Matt O’Dowd, “Computing a Universe Simulation,” PBS Space Time, YouTube video, October 10, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=0GLgZvTCbaA>; Riken, “All-Atom Molecular Dynamics Simulation of the Bacterial Cytoplasm,” rikenchannel, YouTube video, June 6, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=5JcFgj2gHx8>; “Scientists Create First Billion-Atom Biomolecular Simulation,” Los Alamos National Lab, YouTube video, April 22, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=jmeik65RkJw>; “Matrioshka Brains,” Isaac Arthur, YouTube video, June 23, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=Ef-mxjYklw>; Simon Makin, “The Four Biggest Challenges in Brain Simulation,” *Nature* 571, S9 (July 25, 2019), <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02209-z>; Egidio D’Angelo et al., “Realistic Modeling of Neurons and Networks: Towards Brain Simulation,” *Functional Neurology* 28, no. 3 (July-September 2013): 153-66, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3812748>; Elon Musk and Neuralink, “An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels”, Neuralink working paper, July 17, 2019, <https://doi.org/10.1101/703801>; Fujitsu, “Supercomputer Used to Simulate 3,000-Atom Nano Device,” *Phys.org*, January 14, 2014, <https://phys.org/news/2014-01-supercomputer-simulate-atom-nano-device.html>; Anders Sandberg, “Ethics of Brain Emulations,” *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 26, no. 3 (April 14, 2014): 439-57, <https://doi.org/10.1080/0952813X.2014.895113>; Ray Kurzweil, *Como Criar uma Mente: O Segredo do Pensamento Humano Revelado* (New York: Viking, 2012).

⁹² Michael Merzenich, “Growing Evidence of Brain Plasticity,” TED video, February 2004, https://www.ted.com/talks/michael_merzenich_on_the_elastic_brain.

CAPÍTULO 4

¹ World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day (2017 PPP) (% of population),” World Bank, accessed March 25, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.DDAY>; World Bank, “Population, Total for World (SPPOP-TOTLWLD),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated July 4, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/SPPOPTOTLWLD>.

² UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total (% of People Ages 15 and Above),” retrieved from Worldbank.org, October 24 2022, <https://data.worldbank.org/indicator/SE.ADT.LITR.ZS>.

³ *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020: Five Years into the SDGs* (Geneva: World Health Organization and United Nations Children’s Fund, 2021), 9, <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1369501/retrieve>.

⁴ World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a day”; World Bank, “Population, Total for World (SPPOPTOTLWLD).”

⁵ UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total.”

- ⁶ *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020*, 9.
- ⁷ Ray Kurzweil, *A Era das Máquinas Espirituais: Quando os Computadores Ultrapassam a Inteligência Humana* (New York: Viking, 1999).
- ⁸ Ray Kurzweil, *A Singularidade Está Próxima* (New York: Viking, 2005).
- ⁹ Peter H. Diamandis and Steven Kotler, *Abundance: The Future Is Better Than You Think* (New York: Simon & Schuster, 2012).
- ¹⁰ Steven Pinker, *Enlightenment Now: The Case for Reason, Science, Humanism, and Progress* (New York: Penguin, 2018).
- ¹¹ Andrew Evans, “The First Thanksgiving Travel,” *National Geographic*, November 24, 2011, <https://www.nationalgeographic.com/travel/digital-nomad/2011/11/24/the-first-thanksgiving-travel>.
- ¹² Henry Fairlie, “Henry Fairlie on What Europeans Thought of Our Revolution,” *New Republic*, July 3, 2014, <https://newrepublic.com/article/118527/american-revolution-what-did-europeans-think>; Peter Stanford, “The Street of Ships in New York,” *Boating* 21, no. 1 (January 1967): 48, <https://books.google.com/books?id=VsMYj3YIKLcC>.
- ¹³ Vaclav Smil, “Crossing the Atlantic,” *IEEE Spectrum*, March 28, 2018, <https://spectrum.ieee.org/transportation/marine/crossing-the-atlantic>.
- ¹⁴ Frank W. Geels, *Technological Transitions and System Innovations: A Co-evolutionary and Socio-Technical Analysis* (Cambridge, UK: Edward Elgar, 2005), 135, <https://books.google.com/books?id=SDfrb7TNX5oC>.
- ¹⁵ Steven Ujifusa, *A Man and His Ship: America’s Greatest Naval Architect and His Quest to Build the S.S. United States* (New York: Simon & Schuster, 2012), 152, <https://books.google.com/books?id=H6KB4q7M938C>.
- ¹⁶ John C. Spychalski, “Transportation,” in *The Columbia History of the 20th Century*, ed. Richard W. Bulliet (New York: Columbia University Press, 1998), 409, <https://books.google.com/books?id=9QsqpvR0nqOC>.
- ¹⁷ Jason Paur, “Oct. 4, 1958: ‘Comets’ Debut Trans-Atlantic Jet Age,” *Wired*, October 4, 2010, <https://www.wired.com/2010/10/1004first-transatlantic-jet-service-boac>.
- ¹⁸ Howard Slutsken, “What It Was Really Like to Fly on Concorde,” *CNN*, March 2, 2019, <https://www.cnn.com/travel/article/concorde-flying-what-was-it-like/index.html>.
- ¹⁹ “London to New York Flight Duration,” *Finance.co.uk*, accessed April 14, 2023, <https://www.finance.co.uk/travel/flight-times-and-durations-calculator/london-to-new-york>.
- ²⁰ Para um ensaio útil sobre o papel do conflito na narrativa e evidências de viés de negatividade nas notícias, veja Jerry Flattum, “What Is a Story? Conflict—The Foundation of Storytelling,” *Script*, March 18, 2013, <https://scriptmag.com/features/conflict-the-foundation-of-storytelling>; Stuart Soroka, Patrick Fournier, and Lilach Nir, “Cross-National Evidence of a Negativity Bias in Psychophysiological Reactions to News,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 38 (September 17, 2019): 18888—92, <https://doi.org/10.1073/pnas.1908369116>.
- ²¹ Para saber mais sobre como os algoritmos das redes sociais enfatizam o conflito e alimentam a polarização, consulte “Jonathan Haidt: How Social Media Drives Polarization,” Amanpour and Company, YouTube video, December 4, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=G9ofYEfewNE>; Eli Pariser, “How News Feed Algorithms Supercharge Confirmation Bias,” *Big Think*, YouTube video, December 18, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=prx9bxzns3g>; Jeremy B. Merrill and Will Oremus, “Five Points for Anger, One for a ‘Like’: How Facebook’s Formula Fostered Rage and Misinformation,” *Washington Post*, October 26, 2021, <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/10/26/facebook-angry-ethoji-algorithm/>; Damon Centola, “Why Social Media Makes Us More Polarized and How to Fix It,” *Scientific American*, October 15, 2020, <https://www.scientificamerican.com/article/why-social-media-makes-us-more-polarized-and-how-to-fix-it>.
- ²² Max Roser, “Economic Growth,” *Our World in Data*, accessed October 11, 2021, <https://ourworldindata.org/economic-growth>; Ryland Thomas and Nicholas Dimsdale, “A Millennium of UK Data,” Bank of England OBRA dataset, 2017,

<https://www.bankofengland.co.uk/-/media/boe/files/statistics/research-datasets/a-millennium-of-macroeconomic-data-for-the-uk.xlsx>; “Inflation Calculator,” Bank of England, accessed April 14, 2023, <https://www.bankofengland.co.uk/monetary-policy/inflation/inflation-calculator>; Stephen Broadberry et al., *British Economic Growth, 1270-1870* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015).

²³ Roser, “Economic Growth”; Thomas and Dimsdale, “A Millennium of UK Data”; “Inflation Calculator,” Bank of England; Broadberry et al., *British Economic Growth*.

²⁴ Roser, “Economic Growth”; Thomas and Dimsdale, “A Millennium of UK Data”; “Inflation Calculator,” Bank of England; Broadberry et al., *British Economic Growth*.

²⁵ Roser, “Economic Growth”; Thomas and Dimsdale, “A Millennium of UK Data”; “Inflation Calculator,” Bank of England; Broadberry et al., *British Economic Growth*.

²⁶ Peter Nowak, “The Rise of Mean World Syndrome in Social Media,” *Globe and Mail*, November 6, 2014, <https://www.theglobeandmail.com/life/relationships/the-rise-of-mean-world-syndrome-in-social-media/article21481089>.

²⁷ Para mais informações sobre esta pesquisa, veja Paula McGrath, “Why Good Memories Are Less Likely to Fade,” BBC News, May 4, 2014, <https://www.bbc.com/news/health-27193607>; Colin Allier, “Past Perfect: Why Bad Memories Fade,” *Psychology Today*, June 3, 2003, <https://www.psychologytoday.com/us/articles/200306/past-perfect-why-bad-memories-fade>; W. Richard Walker, John J. Skowronski, and Charles P. Thompson, “Life Is Pleasant — and Memory Helps to Keep It That Way!,” *Review of General Psychology* 7, no. 2 (June 2003): 203-10, <https://www.apa.org/pubs/journals/releases/gpr-72203.pdf>.

²⁸ Walker, Skowronski, and Thompson, “Life Is Pleasant.”

²⁹ Timothy D. Ritchie et al., “A Pancultural Perspective on the Fading Affect Bias in Autobiographical Memory,” *Memory* 23, no. 2 (February 14, 2014): 278-90, <https://doi.org/10.1080/09658211.2014.884138>.

³⁰ John Tierney, “What Is Nostalgia Good For? Quite a Bit, Research Shows,” *New York Times*, July 8, 2013, <https://www.nytimes.com/2013/07/09/science/what-is-nostalgia~good-for-quite-a-bit-research-shows.html>.

³¹ Mike Mariani, “How Nostalgia Made America Great Again,” *Nautilus*, April 20, 2017 <https://nautil.us/how-nostalgia-made-america-great-again-236556>.

³² Ed O’Brien and Nadav Klein, “The Tipping Point of Perceived Change: Asymmetric Thresholds in Diagnosing Improvement Versus Decline,” *Journal of Personality and Social Psychology* 112, no. 2 (February 2017): 161-85, <https://doi.org/10.1037/pspa0000070>.

³³ Art Markman, “How Do You Decide Things Are Getting Worse?”, *Psychology Today*, February 7, 2017, <https://www.psychologytoday.com/nz/blog/ulterior-motives/201702/how-do-you-decide-things-are-getting-worse>.

³⁴ Robert P. Jones et al., *The Divide over America’s Future: 1950 or 2050? Findings from the 2016 American Values Survey*, Public Religion Research Institute, October 25, 2016, <https://www.prrri.org/wp-content/uploads/2016/10/PRRI-2016-American-Values-Survey.pdf>; Mariani, “How Nostalgia Made America Great Again.”

³⁵ Pete Etchells, “Declinism: Is the World Actually Getting Worse?”, *Guardian*, January 16, 2015, <https://www.theguardian.com/science/head-quarters/2015/jan/16/declinism-is-the-world-actually-getting-worse>.

³⁶ Martijn Lampert, Anne Blanksma Ceta, and Panos Papadongonas, *Increasing Knowledge and Activating Millennials for Making Poverty History*, Globalities global survey report, July 2018, <https://xs.motivaction.nl/fileArchive/?f=116335&O=5880&key=4444>.

³⁷ Ipsos, “Perceptions Are Not Reality,” Ipsos Perils of Perception blog, July 8, 2013, <https://www.ipsos.com/ipsos-mori/en-uk/perceptions-are-not-reality>.

³⁸ Jamiles Lartey et al., “Ahead of Midterms, Most Americans Say Crime Is Up. What Does the Data Say?”, Marshall Project, November 5, 2022, <https://www.themarshallproject.org/2022/11/05/ahead-of-midterms-most-americans-say-crime-is-up-what-does-the-dame-say>; Dara Lind, “The US Is Safer Than Ever—and Americans Don’t Have any Idea,” Vox, April 7, 2016, <https://www.vox.com/2015/5/4/8546497/crime-rate-america>.

³⁹ Julia Belluz, “You May Think the World Is Falling Apart. Steven Pinker Is Here to Tell You It Isn’t,” Vox, September 10, 2016, <https://www.vox.com/2016/8/16/12486586/2016-worst-year-ever-violence-trump-terrorism>.

⁴⁰ Para explicações em vídeo acessíveis da investigação de Kahneman-Tversky, bem como do trabalho original publicado, veja “Thinking, Fast and Slow by Daniel Kahneman: Animated Book Summary,” FightMediocrity, YouTube video, June 5, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=uqXVAo7dVRU>; “Thinking Fast and Slow by Daniel Kahneman #2—Heuristics and Biases: Animated Book Summary,” One Percent Better, YouTube video, November 12, 2016, https://www.youtube.com/watch?v=Q_wBt5aSRYY; “Kahneman and Tversky: How Heuristics Impact Our Judgment,” Intermittent Diversion, YouTube video, June 7, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=3IjIVD-KYF4>; Richard H. Thaler et al., “The Effect of Myopia and Loss Aversion on Risk Taking: An Experimental Test,” *Quarterly Journal of Economics* 112, no. 2 (May 1997): 647-61, <https://www.jstor.org/stable/2951249>; Daniel Kahneman and Amos Tversky, “The Psychology of Preferences,” *Scientific American* 246, no. 1 (January 1981): 160-73; Daniel Kahneman, Paul Slovic, and Amos Tversky, eds., *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982); Amos Tversky and Daniel Kahneman, “Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases,” *Science* 185, no. 4157 (September 27, 1974): 1124-31, <http://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>; Daniel Kahneman and Amos Tversky, “On the Study of Statistical Intuitions,” *Cognition* 11, no. 2 (March 1982): 123-41; Daniel Kahneman and Amos Tversky, “Variants of Uncertainty,” *Cognition* 11, no. 2 (March 1982): 143-57.

⁴¹ Daniel Kahneman, *Thinking, Fast and Slow* (New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011), 7; Daniel Kahneman and Amos Tversky, “On the Psychology of Prediction,” *Psychological Review* 80, no. 4 (1973): 237-51, <https://doi.org/10.1037/h0034747>.

⁴² Tversky and Kahneman, “Judgment Under Uncertainty,” 1125-26.

⁴³ Tversky and Kahneman, “Judgment Under Uncertainty,” 1127-28.

⁴⁴ Max Roser and Esteban Ortiz-Ospina, “Literacy,” *Our World in Data*, September 20, 2018, <https://ourworldindata.org/literacy>; Eltjo Buringh and Jan Luiten van Zanden, “Charting the ‘Rise of the West’: Manuscripts and Printed Books in Europe, a Long-Term Perspective from the Sixth Through Eighteenth Centuries,” *Journal of Economic History* 69, no. 2 (June 2009): 409-45, <https://doi.org/10.1017/S0022050709000837>.

⁴⁵ Franz H. Bauml, “Varieties and Consequences of Medieval Literacy and Illiteracy,” *Speculum* 55, no. 2 (April 1980): 237-65, <https://www.jstor.org/stable/2847287>; Denise E. Murray, “Changing Technologies, Changing Literacy Communities?,” *Language Learning & Technology* 4, no. 2 (September 2000): 39-53, https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/25099/1/04_02_murray.pdf.

⁴⁶ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Buringh and van Zanden, “Charting the ‘Rise of the West,’” 409-45.

⁴⁷ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Sevkett Pamuk and Jan Luiten van Zanden, “Standards of Living,” in *The Cambridge Economic History of Modern Europe: Volume 1; 1700-1870*, ed. Stephen Broadberry and Kevin H. O’Rourke (New York: Cambridge University Press, 2010), 229.

⁴⁸ Christelle Garrouste, *100 Years of Educational Reforms in Europe: A Contextual Database*, JRC Scientific and Technical Reports, European Union, 2010, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC57357/regno_jrc57357.pdf.

⁴⁹ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Jan Luiten van Zanden et al., eds., *How Was Life?: Global Well-being Since 1820* (Paris: OECD Publishing, 2014), <https://doi.org/10.1787/9789264214262-en>.

⁵⁰ Van Zanden et al., *How Was Life?*; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Literacy, 1969-1971: Progress Achieved in Literacy Throughout the World* (Paris: UNESCO, 1972),

https://unesdoc.unesco.org/in/rest/annotationsSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_c0206949~c3fl-4eac-al89-9c5bcfdac220.

⁵¹ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Roy Carr-Hill and José Pessoa, *International Literacy Statistics: A Review of Concepts, Methodology and Current Data* (Montreal: UNESCO Institute for Statistics, 2008), http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-literacy-statistics-a-review-of-concepts-methodology-and-current-data-en_0.pdf; van Zanden et al., *How Was Life?*; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Literacy, 1969-1971*; Friedrich Huebler and Weixin Lu, *Adult and Youth Literacy: National, Regional and Global Trends, 1985~2015*, UIS Information Paper (Montreal: UNESCO Institute for Statistics, 2013), http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/adult-and-youth-literacy-national-regional-and-global-trends-1985-2015-en_0.pdf.

⁵² UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total”; Central Intelligence Agency, “Field Listing—Literacy,” CIA World Factbook, accessed October 11, 2021, <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/literacy>.

⁵³ National Assessment of Adult Literacy, *A First Look at the Literacy of America’s Adults in the 21st Century* (Washington, DC: National Center for Education Statistics, 2005): 5, <https://nces.ed.gov/NAAL/PDF/2006470.PDF>.

⁵⁴ Madeline Goodman et al., *Literacy, Numeracy, and Problem Solving in Technology-Rich Environments Among U.S. Adults: Results from the Program for the International Assessment of Adult Competencies 2012: First Look* (NCES 2014-008) (Washington, DC: US Department of Education, 2013), 14, <https://nces.ed.gov/pubs2014/2014008.pdf>.

⁵⁵ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Bas van Leeuwen and Jieli van Leeuwen-Li, “Education Since 1820,” in *How Was Life?: Global Well-Being Since 1820*, ed. Jan Luiten van Zanden et al, (Paris: OKCD Publishing, 2014), <http://dx.doi.org/10.1787/9789264214262-9-en>; UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total”; Tom Snyder, ed., *120 Years of American Education: A Statistical Portrait* (Washington, DC: National Center for Education Statistics, 1993), excerpted at http://nces.ed.gov/naal/lit_history.asp.

⁵⁶ Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; van Leeuwen and van Leeuwen-Li, “Education Since 1820”; UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total”; Snyder, ed., *120 Years of American Education*; Buringh and van Zanden, “Charting the ‘Rise of the West,’” 409-45; Pamuk and van Zanden, “Standards of Living,” 229; “Illiteracy, 1870-2010, All Countries,” Montevideo-Oxford Latin American Economic History Data Base, accessed October 31, 2021, <http://moxlad.cienciassociales.edu.uy/en>; UNESCO Institute for Statistics, “Literacy Rate, Adult Total (% of People Ages 15 and Above)—Argentina, Brazil,” retrieved from Worldbank.org, September 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/SE.ADT.LITR.ZS?locations=AR-BR>.

⁵⁷ Hannah Ritchie et al., “Global Education,” *Our World in Data*, 2016, accessed October 29, 2021, <https://ourworldindata.org/global-education>; Jong-Wha Lee and Hanol Lee, “Human Capital in the Long Run,” *Journal of Development Economics* 122 (September 2016): 147-69, <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2016.05.006>, data available at http://www.barrolee.com/Lee_Lee_LRdata_dn.htm.

⁵⁸ Richie et al., “Global Education”; Lee and Lee, “Human Capital in the Long Run”; Vito Tanzi and Ludger Schuknecht, *Public Spending in the 20th Century: A Global Perspective* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000), https://www.google.com/books/edition/Public_Spending_in_the_20th_Century/kHl6xCgd3aAC?gbpv=1.

⁵⁹ Richie et al., “Global Education”; Lee and Lee, “Human Capital in the Long Run”; Robert J. Barro and Jong Wha Lee, “A New Data Set of Educational Attainment in the World, 1950-2010,” *Journal of Development Economics* 104 (September 2013): 184-98, <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2012.10.001>, data available at <http://www.barrolee.com/data/yrsch2.htm>.

⁶⁰ “Human Development Index and Its Components,” United Nations Development Programme, accessed March 19, 2023, available for download at https://hdr.undp.org/sites/default/files/2021-22_HDR/HDR21-22_Statistical_Annex_HDI_Table.xlsx.

⁶¹ “Human Development Index and Its Components,” United Nations Development Programme.

⁶² National Center for Education Statistics, “Expenditures of Educational Institutions Related to the Gross Domestic Product, by Level of Institution: Selected Years, 1929-30 Through 2020-21,” in *Digest of Education Statistics: 2021*, US Department of Education, March 2023, https://nces.ed.gov/programs/digest/d21/tables/dt21_106.10.asp; “Consumer Price Index, 1913~,” Federal Reserve Bank of Minneapolis, accessed April 28, 2023, <https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/inflation-calculator/consumer-price-index-1913->; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 12, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIAUCSL>.

⁶³ National Center for Education Statistics, “Expenditures of Educational Institutions Related to the Gross Domestic Product”; “Consumer Price Index, 1913—,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B23ORCOA052NBEA),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated January 26, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/B23ORCOA052NBEA>; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

⁶⁴ O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento publica os dados mais abrangentes e fiáveis, mas estes remontam apenas a 1990. The 1870-2017 dataset from Our World in Data draws on older sources with less consistent methodology. To preserve relative changes while maximizing commensurability across the period in question, the UNDP data for 1990-2021 is used and the prior OWD data is rescaled so that it reaches consistency with the UN data in 1990. See “Human Development Insights,” United Nations Development Programme Human Development Reports, accessed March 22, 2023, <https://hdr.undp.org/data-center/country-insights#/ranks>; Roser and Ortiz-Ospina, “Global Education”; Lee and Lee, “Human Capital in the Long Run”; Barro and Lee, “New Data Set of Educational Attainment in the World, 1950-2010.”

⁶⁵ Para mais informações sobre o papel das doenças transmitidas pela água na saúde pública ao longo da história, consulte “What Exactly Is Typhoid Fever?,” *Seeker*, YouTube video, August 20, 2019, [What Exactly Is Typhoid Fever?](https://www.youtube.com/watch?v=3lzw5d2K8wC); “The Pandemic the World Has Forgotten,” *Seeker*, YouTube video, September 8, 2020, [The Pandemic the World Has Forgotten](https://www.youtube.com/watch?v=3lzw5d2K8wC); “The Story of Cholera,” Global Health Media Project, YouTube video, December 10, 2011, [The Story of Cholera](https://www.youtube.com/watch?v=3lzw5d2K8wC); Theodore H. Tulchinsky and Elena A. Varavikova, “A History of Public Health,” *The New Public Health*, October 10, 2014, 1-42, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415766-8.00001-X>.

⁶⁶ Suzanne Spellman, “From Pakistan to Brooklyn: A Quick History of the Bathroom,” *Brownstoner*, November 28, 2016, <https://www.brownstoner.com/architecture/victorian-bathroom-history-plumbing-brooklyn-architecture-interiors>; Anthony Mitchell Sammarco, *The Great Boston Fire of 1872* (Charleston, SC: Arcadia, 1997), 30, <https://books.google.com/books?id=v3lzw5d2K8wC>; Price V. Fishback, *Soft Coal, Hard Choices: The Economic Welfare of Bituminous Coal Miners, 1890-1930* (New York: Oxford University Press, 1992), 170, https://www.google.com/books/edition/Soft_Coal_Hard_Choices/EjnnCwAAQBAJ; Stanley Lebergott, *Wealth and Want* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1975), 7, https://www.google.com/books/edition/Wealth_and_Want/Lrx9BgAAQBAJ; “Historical Census of Housing Tables: Sewage Disposal,” US Census Bureau, 1990, revised October 8, 2021, <https://www.census.gov/data/tables/time-series/dec/coh-sewage.html>; Gary M. Walton and Hugh Rockoff, *History of the American Economy*, 13th ed. (Boston: Cengage Learning, 2017), 377.

⁶⁷ Walton and Rockoff, *History of the American Economy*, 377; US Census Bureau, “Historical Census of Housing Tables: Sewage Disposal.”

⁶⁸ Veja, por exemplo, Susan Carpenter, “After Two Years of Eco-Living, What Works and What Doesn’t,” *Los Angeles Times*; March 11, 2014, <https://www.latimes.com/home/la-hm-realist-main-20101016-story.html>.

⁶⁹ Jane Otaí, “Happy #WorldToiletDay! Here’s What It’s Like To Live Without One,” NPR, November 19, 2015, <https://www.npr.org/sections/goatsandsoda/2015/11/19/456495448/happy-worldtoiletday-here-s-what-it-s-like-to-live-without-one>.

⁷⁰ WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply, Sanitation and Hygiene, “People Using Safely Managed Sanitation Services (% of Population),” retrieved from worldbank.org, accessed October 12, 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/SH.STA.SMSS.ZS>.

⁷¹ Stanley Lebergott, *Pursuing Happiness: American Consumers in the Twentieth Century* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993), 102, https://www.google.com/books/edition/Pursuing_Happiness/bD0QABAAAQBAJ; US Census Bureau, “Historical Census of Housing Tables: Sewage Disposal”; Marc Jeuland et al., “Water and Sanitation: Economic Losses from Poor Water and Sanitation—Past, Present, and Future”, in *How Much Have Global Problems Cost the World?*, ed. Bjorn Lomborg (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013), 333; David A. Raglin, “Plumbing and Kitchen Facilities in Housing Units,” 2015 American Community Survey Research and Evaluation Report Memorandum Series No. ACS15-RER-06, US Census Bureau, May 29, 2015, 3, https://www.census.gov/content/dam/Census/library/working-papers/2015/acs/2015_Raglin_Ol.pdf; Katie Meehan et al., *Plumbing Poverty in U.S. Cities: A Report on Gaps and Trends in Household Water Access, 2000 to 2017*, King’s College London, September 27, 2021, 4, https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/files/159767495/Plumbing_Poverty_in_US_Cities.pdf; US Census Bureau, “Total Households (TTLHH),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated November 21, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/TTLHH>; WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply, Sanitation, and Hygiene, “People Using at Least Basic Sanitation Services (% of Population),” retrieved from Worldbank.org, accessed April 28, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SH.STA.BASS.ZS>; WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply, Sanitation, and Hygiene, “Improved Sanitation Facilities (% of Population with Access),” retrieved from Worldbank.org, updated January 25, 2018, accessed April 28, 2023, originally available at <https://databank.worldbank.org/source/millennium-development-goals/Series/SH.STA.ACSN>; World Health Organization and United Nations Children’s Fund, *Progress on Sanitation and Drinking Water—2015 Update and MDG Assessment*, World Health Organization, 2015, 14, https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2015/12/Progress-on-Sanitation-and-Drinking-Water_234.pdf; *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020: Five Years into the SDGs* (Geneva: World Health Organization and the United Nations Children’s Fund, 2021), 7, <https://washdata.org/sites/default/files/2021-07/jmp-2021-wash-households.pdf>.

⁷² Elizabeth Nix, “How Edison, Tesla and Westinghouse Battled to Electrify America,” History.com, October 24, 2019, <https://www.history.com/news/what-was-the-war-of-the-currents>; Harold D. Wallace Jr., “Power from the People: Rural Electrification Brought More than Lights,” National Museum of American History, February 12, 2016, <https://americanhistory.si.edu/blog/rural-electrification>; Stanley Lebergott, *The American Economy: Income, Wealth and Want* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976), 334, https://www.google.com/books/edition/The_American_Economy/HYV9BgAAQBAJ.

⁷³ Para mais detalhes sobre a eletrificação rural da América, veja “On the Line—Rural Electrification Administration Film,” Russell Library Audiovisual Collections, YouTube video, June 4, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=DbAM-CwQxu0>; General Electric, “More Power to the American Farmer—1946,” miSci: Museum of Innovation and Science, YouTube video, June 13, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=aY5eFQTYkaw>; US Department of Agriculture, Rural Electrification Administration, *Rural Lines, USA: The Story of the Rural Electrification Administration’s First Twenty-five Years, 1935-1960*, US Department of Agriculture Miscellaneous Publication No. 811 (1960), https://www.google.com/books/edition/Rural_Lines_USA/IBkuAAAAYAAJ; US Census Bureau, *Historical Statistics of the United States: Colonial Times to 1970*, part 1 (Washington, DC: US Census Bureau, 1975), 827, <https://www.census.gov/history/pdf/histstats-colonial-1970.pdf>.

⁷⁴ US Census Bureau, *Historical Statistics of the United States: Colonial Times to 1970*, part 1.

⁷⁵ Lily Odarno, “Closing Sub-Saharan Africa’s Electricity Access Gap: Why Cities Must Be Part of the Solution,” World Resources Institute, August 14, 2019, <https://www.wri.org/blog/2019/08/closing-sub-saharan-africa-electricity-access-gap-why-cities-must-be-part-solution>; Giacomo Falchetta et al., “Satellite Observations Reveal Inequalities in the Progress and Effectiveness of Recent Electrification in Sub-Saharan Africa,” *One Earth* 2, no. 4 (April 24, 2020): 364-79, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.03.007>.

⁷⁶ IEA, IRENA, UNSD, World Bank, and WHO, “Access to Electricity (% of Population)”, from *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report* (Washington, DC: World Bank, 2023), <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>.

⁷⁷ Daron Acemoglu and James A. Robinson, *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty* (New York: Crown, 2012).

⁷⁸ Lebergott, *The American Economy: Income, Wealth and Want*, 334; US Census Bureau, *Historical Statistics of the United States: Colonial Times to 1970*, part 1; IEA, IRENA, UNSD, World Bank, and WHO, “Access to Electricity (% of Population)”; IEA, IRENA, UNSD, World Bank, and WHO, “Access to Electricity (% of Population)—United States,” from *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report* (Washington, DC: World Bank, 2023), <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=US>; World Bank, “Access to Electricity (% of Population),” Sustainable Energy or All (SE4ALL) database, SE4ALL Global Tracking Framework, retrieved from Worldbank.org, accessed April 28, 2023, originally available at <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>.

⁷⁹ US Census Bureau, “Selected Communications Media: 1920 to 1998,” *Statistical Abstract of the United States: 1999* (Washington, DC: US Census Bureau, 1999): 885, <https://www.census.gov/history/pdf/radioownership1920-1998.pdf>.

⁸⁰ US Census Bureau, “Selected Communications Media: 1920 to 1998.”

⁸¹ “Kathleen Hall Jamieson on Talk Radio’s History and Impact,” PBS.org, February 13, 2004, <https://web.archive.org/web/20170301204706/https://www.pbs.org/now/politics/talkradiohistory.html>; “‘Radio’ Listening Dominates Audio In-Car,” Edison Research, January 11, 2019, <https://www.edisonresearch.com/am-fm-radio-still-dominant-audio-in-car>; Aniko Bodroghkozy, ed., *A Companion to the History of American Broadcasting* (Hoboken, NJ: Wiley, 2018).

⁸² Ezra Klein, “Something Is Breaking American Politics, but It’s Not Social Media,” *Vox*, April 12, 2017, <https://www.vox.com/policy-and-politics/2017/4/12/15259438/social-media-political-polarization>; Jeffrey M. Berry and Sarah Sobieraj, “Understanding the Rise of Talk Radio,” *PS: Political Science and Politics* 44, no. 4 (October 2011): 762–67, <https://www.jstor.org/stable/41319965>.

⁸³ “Audio and Podcasting Fact Sheet,” Pew Research Center, June 29, 2021, <https://www.pewresearch.org/journalism/fact-sheet/audio-and-podcasting>.

⁸⁴ Para uma análise mais detalhada de como a televisão foi inventada e o seu desenvolvimento inicial, veja “The Invention of Television (1929),” British Pathé, YouTube video, April 13, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=nwJ2bMATIAM>; “The Origins of Television,” Nirali Pathak, YouTube video, January 2, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=uM7ZD5f9Pb8>; “Evolution of Television 1920-2020,” Captain Gizmo, YouTube video, December 18, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=PveVwQhNngB>; Albert Abramson, *The History of Television, 1880-1941* (Jefferson, NC: McFarland, 1987).

⁸⁵ Para mais informações sobre o estado da televisão em 1939 e a tecnologia que foi colocada em espera devido à Primeira Guerra Mundial, consulte “What Television Was Like in 1939,” Smithsonian Channel, YouTube video, December 30, 2013, https://www.youtube.com/watch?v=wj_Mcpfi-Ks; BBC, “Close Down of Television Service for the Duration of the War,” History of the BBC, accessed April 28, 2023, <https://www.bbc.com/historyofthebbc/anniversaries/september/closedown-of-television>; “Television Facts and Statistics—1939 to 2000,” TVhistory.tv, accessed March 31, 2022, <https://web.archive.org/web/20220331223237/http://www.tvhistory.tv/facts-stats.htm>.

⁸⁶ Cobbett S. Steinberg, *TV Facts, Facts on File* (1980), 142, available in part at “Television Facts and Statistics 1939 to 2000,” TVhistory.tv, accessed March 31, 2022, <https://web.archive.org/web/20220331223237/http://www.tvhistory.tv/facts-stats.htm>.

⁸⁷ Steinberg, *TV Facts*, 142.

⁸⁸ Steinberg, *TV Facts*, 142; US Census Bureau, “Total Households (TTLHH);” Jack W. Plunkett, *Plunkett’s Entertainment & Media Industry Almanac 2006* (Houston, TX: Plunkett Research, 2006), 35.

⁸⁹ À data da redação deste texto, em 2023, as últimas estimativas oficiais da Nielsen abrangem o primeiro semestre de 2021. Ver Plunkett, *Plunkett’s Entertainment & Media Industry Almanac 2006*, 35; “Nielsen Estimates 121 Million TV Homes in the U.S. for the 2020-2021 TV Season,” Nielsen Company, August 28, 2020, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2020/nielsen-estimates-121-million-tv-homes-in-the-u-s-for-the-2020-2021-tv-season>.

⁹⁰ Rick Porter, “TV Long View: Five Years of Network Ratings Declines in Context,” *Hollywood Reporter*, September 21, 2019, <https://www.hollywoodreporter.com/live-feed/five-years-network-ratings-declines-explained-1241524>; Sapna Maheshwari and John Koblin, “Why Traditional TV Is in Trouble,” *New York Times*, May 13, 2018, <https://www.nytimes.com/2018/05/13/business/media/television-advertising.html>.

⁹¹ Para saber mais sobre o impacto transformador do Altair 8800, consulte Jason Fitzpatrick, “The Computer That Changed Everything (Altair 8800),” Computerphile, YouTube video, May 15, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=cwEmnfy2BhI>; “The PC That Started Microsoft & Apple! (Altair 8800),” ColdFusion, YouTube video, March 18, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=X5lpOskKF9I>.

⁹² US Census Bureau, *Historical Statistics of the United States*, Colonial Times to 1957 (Washington, DC: US Government Publishing Office, 1960), 491, [https://www.google.co.uk/books/edition/Historical Statistics of the United States/hyILAAAAIAAJ](https://www.google.co.uk/books/edition/Historical+Statistics+of+the+United+States/hyILAAAAIAAJ); US Census Bureau. “Total Households (TTLHH);” Steinberg, *TV Facts*, 142; Plunkett, *Plunkett’s Entertainment & Media Industry Almanac 2006*, 35; “Nielsen: 109.6 Million TV Households in the U.S.,” HispanicAd.com, July 30, 2004, <http://hispanicad.com/blog/news-article/had/research/nielsen-1096-million-tv-households-us>; “Late News,” *AdAge*, August 29, 2005, <https://adage.com/article/late-news/late-news/104427>; TVTechnology, “Nielsen Reports Slight Increase in TV Households,” TV Tech, August 28, 2006, <https://www.tvtechnology.com/news/nielsen-reports-slight-increase-in-tv-households>; Variety Staff, “IV Nation: 112.8 Million Strong,” *Variety*, August 23, 2007, <https://variety.com/2007/tv/opinion/tvy-nation-1128-22127/?iwsourc=cl>; “Nielsen Reports Growth of 4.4% in Asian and 4.3% in Hispanic U.S. Households for 2008-2009 Television Season,” Nielsen Company, August 28, 2008, https://www.nielsen.com/wp-content/uploads/sites/3/2019/04/press_release34.pdf; “114.9 Million U.S. Television Homes Estimated for 2009-2010 Season,” Nielsen Company, August 29, 2009, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2009/1149-million-us-television-homes-estimated-for-2009-2010-season>; “Number of U.S. TV Households Climbs by One Million for 2010-11 TV Season,” Nielsen Company, August 27, 2010, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2010/number-of-u-s-tv-households-climbs-by-one-million-for-2010-11-tv-season>; Cynthia Littleton, “Nielsen Tackles Web Viewing,” *Variety*, February 25, 2013, <https://variety.com/2013/digital/news/nielsen-tackles-web-viewing-1118066529>; “Nielsen Estimates 115.6 Million TV Homes in the U.S., Up 1.2%,” Nielsen Company, May 7, 2013, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2013/nielsen-estimates-115-6-million-tv-homes-in-the-u-s-up-1-2>; “Nielsen Estimates More Than 116 Million TV Homes in the U.S.,” Nielsen Company, August 29, 2014, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2014/nielsen-estimates-more-than-116-million-tv-homes-in-the-us>; “Nielsen Estimates 116.4 Million TV Homes in the U.S. for the 2015-16 TV Season,” Nielsen Company, August 28, 2015, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2015/nielsen-estimates-116-4-million-tv-homes-in-the-us-for-the-2015-15-tv-season>; “Nielsen Estimates 118.4 Million TV Homes in the U.S. for the 2016-17 TV Season,” Nielsen Company, August 26, 2016, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2016/nielsen-estimates-118-4-million-tv-homes-in-the-us-for-the-2016-17-season>; “Nielsen Estimates 119.6 Million TV Homes in the U.S. for the 2017-18 TV Season,” Nielsen Company, August 25, 2017, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2017/nielsen-estimates-119-6-million-us-tv-homes-2017-2018-tv-season>; “Nielsen Estimates 119.9 Million TV Homes in the U.S. for the 2018-2019 TV Season,” Nielsen Company, September 7, 2018, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2018/nielsen-estimates-119-9-million-tv-homes-in-the-us-for-the-2018-19-season>; “Nielsen Estimates 120.6 Million TV Homes in the U.S. for the 2019-2020 TV Season,” Nielsen Company, August 27, 2019, <https://www.nielsen.com/us/en/insights/article/2019/nielsen-estimates-120-6-million-tv-homes-in-the-u-s-for-the-2019-202-tv-season>; “Nielsen Estimates 121 Million TV Homes in the U.S. for the 2020-2021 TV Season.”

⁹³ Para histórias mais extensas sobre a revolução do computador pessoal e o seu significado, veja Carrie Anne Philbin, “The Personal Computer Revolution: Crash Course Computer Science #25,” CrashCourse, YouTube video, August 23, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=M5BZou6C01w>; “History of Apple I and Steve Jobs’ Personal Computer,” TechCrunch, YouTube video, April 17, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=LTJPdHeibOQ>; “History of Microsoft—1975,” jonpaulmoen, YouTube video, December 18, 2010, <https://www.youtube.com/watch?v=BLaMbaVT22E>; Leo Rowe, “History of Personal Computers Part 1,” (from Triumph of the Nerds, PBS, 1996), Chasing 80, YouTube video, December 17, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=AIBr-kPgYuU>; Gerard O’Regan, *A Brief History of Computing*, 2nd ed. (London: Springer, 2008).

⁹⁴ “1984 Apple’s Macintosh Commercial,” Mac History, YouTube video, February 1, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=VtvjbmoDx-I>; “Computer and Internet Use in the United States: 1984 to 2009,” US

Census Bureau, February 2010, <https://www.census.gov/data/tables/time-series/demo/computer-internet/computer-use-1984-2009.html>.

⁹⁵ “Internet Host Count History,” Internet Systems Consortium, accessed May 18, 2012, <https://web.archive.org/web/20120518101749/http://www.isc.org/solutions/survey/history>; 3way Labs, “Internet Domain Survey, January, 2019,” Internet Systems Consortium, accessed April 28, 2023, <http://ftp.isc.org/www/survey/reports/current>.

⁹⁶ “Internet Host Count History,” Internet Systems Consortium; 3way Labs, “Internet Domain Survey, January, 2019.”

⁹⁷ Arielle Sumits, “The History and Future of Internet Traffic,” Cisco, August 28, 2015, <https://blogs.cisco.com/sp/the-history-and-future-of-internet-traffic>.

⁹⁸ “QuickFacts United States,” US Census Bureau, accessed April 28, 2023, <https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/US/HCN010217>; Michael Martin, “Computer and Internet Use in the United States: 2018,” American Community Survey Reports ACS-49, US Census Bureau, April 2021, <https://www.census.gov/newsroom/press-releases/2021/computer-internet-use.html>.

⁹⁹ Estimativa baseada principalmente em dados da União Internacional de Telecomunicações. Embora a UIT não recolha dados diretamente sobre a percentagem de agregados familiares com computador, smartphone ou tablet (que seria a métrica ideal), as suas estimativas da percentagem de agregados familiares com acesso à internet em casa são o melhor proxy disponível. Sabemos que todas estas famílias têm algum tipo de computador funcional, e esta métrica deixa de fora um pequeno número adicional de famílias com um computador, mas sem acesso à internet em qualquer dispositivo, pelo que vou utilizar aqui este número conservador. Veja “Statistics—Individuals Using the Internet,” International Telecommunication Union, January 31, 2023, <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>; “Key ICT Indicators for Developed and Developing Countries,” *ITU World Telecommunication/ICT Indicators Database*.

¹⁰⁰ Os dados incluem PCs e dispositivos que contêm computadores, como tablets e smartphones. Veja “Computer and Internet Access in the United States: 2012—Table 4: Households with a Computer and Internet Use: 1984 to 2012,” US Census Bureau, February 3, 2014, <https://www2.census.gov/programs-surveys/demo/tables/computer-internet/2012/computer-use-2012/table4.xls>; Thom File and Camille Ryan, “Computer and Internet Use in the United States: 2013,” American Community Survey Reports ACS-28, US Census Bureau, November 2014, 3, <https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2017/acs/acs-37.pdf>; Camille Ryan and Jamie M. Lewis, “Computer and Internet Use in the United States: 2015,” American Community Survey Reports ACS-37, US Census Bureau, September 2017, 4, <https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2017/acs/acs-37.pdf>; Martin, “Computer and Internet Use in the United States: 2018”; International Telecommunication Union, “Key ICT Indicators for Developed and Developing Countries, the World and Special Regions (Totals and Penetration Rates),” from *ITU World Telecommunication/ICT Indicators Database*, International Telecommunication Union, November 2020, https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ITU_regional_global_Key ICT indicator aggregates Nov 2020.xlsx; “Statistics—Individuals Using the Internet,” International Telecommunication Union; International Telecommunication Union, “Key ICT Indicators for the World and Special Regions (Totals and Penetration Rates),” *ITU World Telecommunication/ICT Indicators database*, November 2022, updated February 15, 2023, https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ITU_regional_global_Key ICT indicator aggregates Nov 2022 revised 15Feb2023.xlsx.

¹⁰¹ “Drug Discovery and Development Process,” Novartis, YouTube video, January 14, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=3GI0gAcW8rw>; Robert Gaynes, “The Discovery of Penicillin—New Insights After More than 75 Years of Clinical Use,” *Emerging Infectious Diseases* 23, no. 5 (May 2017): 849-53, <http://dx.doi.org/10.3201/eid2305.161556>; Sabrina Barr, “Penicillin Allergy: How Common Is It and What Are the Symptoms,” *Independent*, October 23, 2018, <https://www.independent.co.uk/life-style/health-and-families/penicillin-allergy-how-common-symptoms-antibiotic-drug-bacteria~a8597246.html>.

¹⁰² Dan Usher, *Political Economy* (Malden, MA: Wiley, 2003), 5, <https://books.google.com/books?id=-2210y5aPZgC>; Max Roser, Hannah Ritchie, and Bernadeta Dadonaite, “Child and Infant Mortality,” *Our World in Data*, November 2019, <https://ourworldindata.org/child-mortality>; Anthony A. Volk and Jeremy A. Atkinson, “Infant and Child Death in the Human

Environment of Evolutionary Adaptation,” *Evolution and Human Behavior* 34, no. 3 (May 2013): 182-92, <https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav.2012.11.007>Get.

¹⁰³ Mattias Lindgren, “Life Expectancy at Birth,” *Gapminder*, accessed April 28, 2023, <https://www.gapminder.org/data/documentation/gd004>.

¹⁰⁴ Toshiko Kaneda, Charlotte Greenbaum, and Carl Haub, 2021 *World Population Data Sheet*, Population Reference Bureau, August 2021, <https://www.prb.org/wp-content/uploads/2021/08/letter-booklet-2021-world-population.pdf>; Lindgren, “Life Expectancy at Birth.”

¹⁰⁵ Terry Grossman e eu descrevemos a primeira, a segunda e a terceira pontes para a extensão da vida com mais detalhe no nosso livro *Transcend* de 2009. Era um livro sobre saúde e bem-estar, por isso descrevo a quarta ponte — estender a nossa consciência aos meios digitais onde pode ser armazenada e expandida — com mais detalhe ao longo deste livro. Veja Ray Kurzweil and Terry Grossman, *Transcend: Nine Steps to Living Well Forever* (Emmaus, PA: Rodale, 2009).

¹⁰⁶ Lindgren, “Life Expectancy at Birth.”

¹⁰⁷ “Products,” Sequencing.com, accessed March 25, 2023, <https://web.archive.org/web/20230315065708/https://sequencing.com/products/purchase-kit>; Elizabeth Pennisi, “A \$100 Genome? New DNA Sequencers Could Be a ‘Game Changer’ for Biology, Medicine,” *Science*, June 15, 2022, <https://www.science.org/content/article/100-genome-new-dna-sequencers-could-be-game-changer-biology-medicine>; Kris A. Wetterstrand, “The Cost of Sequencing a Human Genome,” National Human Genome Research Institute, accessed April 28, 2023, <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Sequencing-Human-Genome-cost>; Kris A. Wetterstrand, “DNA Sequencing Costs: Data,” National Human Genome Research Institute, November 1, 2021, <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>; Andrew Carroll and Pi-Chuan Chang, “Improving the Accuracy of Genomic Analysis with DeepVariant 1.0,” Google AI Blog, Google Research, September 18, 2020, <https://ai.googleblog.com/2020/09/improving-accuracy-of-genomic-analysis.html>.

¹⁰⁸ Para mais detalhes sobre as aplicações clínicas atuais da inteligência artificial, consulte Bernard Marr, “How Is AI Used in Healthcare—5 Powerful Real-World Examples that Show the Latest Advances,” *Forbes*, July 27, 2018, <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/07/27/how-is-ai-used-in-healthcare-5-powerful-real-world-examples-that-show-the-latest-advances/#55fa6ef05d4b>; Giovanni Briganti and Olivier Le Moine, “Artificial Intelligence in Medicine: Today and Tomorrow,” *Frontiers in Medicine* 7, article 27 (February 5, 2020), <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00027>.

¹⁰⁹ Veja o capítulo 6 para uma discussão muito mais detalhada dos fatores que fazem com que a esperança de vida humana atinja atualmente os 120 anos. Como explico nesse capítulo, a investigação nas últimas décadas identificou os processos bioquímicos específicos que causam o envelhecimento e, em 2023, há investigação ativa a trabalhar para abordar todos eles. Isto não precisa de curar o envelhecimento imediatamente para permitir um prolongamento radical da vida — o ponto de viragem será quando, a cada ano, a medicina acrescenta pelo menos um ano adicional à nossa esperança de vida, permitindo que as pessoas se antecipem, por assim dizer, e atinjam a “velocidade de escape da longevidade”.

¹¹⁰ Devido às perturbações da pandemia da COVID-19, 2020 é o ano mais recente para o qual existem boas tabelas de esperança de vida projetadas no Reino Unido à data da redação deste texto, em 2023. Veja “English Life Tables,” Office for National Statistics (United Kingdom), September 1, 2015, https://www.ons.gov.uk/file?uri=%2Fpeoplepopulationandcommunity%2Fbirthsdeathsandmarriages%2Flifeexpectancies%2Fdatasets%2F2englishlifetables%2Fcurrent/eolselt1to17_tcm77-414359.xls; “National Life Tables, United Kingdom, Period Expectation of Life, Based on Data for the Years 2018–2020,” Office for National Statistics (United Kingdom), September 23, 2021, <https://www.ons.gov.uk/file?uri=%2Fpeoplepopulationandcommunity%2Fbirthsdeathsandmarriages%2Flifeexpectancies%2Fdatasets%2Fnationallifetablesunitedkingdomreferencetables%2Fcurrent/nationallifetables3yruk.xlsx>.

¹¹¹ Devido às perturbações da pandemia da COVID-19, 2020 é o ano mais recente para o qual existem boas tabelas de esperança de vida projetadas nos EUA à data da redação deste texto, em 2023. Veja United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects 2019—Special Aggregates, Online Edition*, rev. 1. (United Nations,

2019),

[https://population.un.org/wpp/Download/Files/3_Indicators%20\(Special%20Aggregates\)/EXCEL_FILES/5_Geographical/Mortality/WPP2019_SA5_MORT_F16_1_LIFE_EXPECTANCY_BY_AGE_BOTH_SEXES.XLSX](https://population.un.org/wpp/Download/Files/3_Indicators%20(Special%20Aggregates)/EXCEL_FILES/5_Geographical/Mortality/WPP2019_SA5_MORT_F16_1_LIFE_EXPECTANCY_BY_AGE_BOTH_SEXES.XLSX).

¹¹² Max Roser and Esteban Ortiz-Ospina, “Global Extreme Poverty,” Our World in Data, March 27, 2017, <https://ourworldindata.org/extreme-poverty>; François Bourguignon and Christian Morrisson, “Inequality Among World Citizens: 1820–1992,” *American Economic Review* 92, no. 4 (September 2002): 727–44, <https://doi.org/10.1257/00028280260344443>; *PovcalNet: Na Online Analysis Tool for Global Poverty Monitoring*, World Bank, March 17, 2020, <http://iresearch.worldbank.org/PovcalNet/home.aspx>.

¹¹³ Para alguns resumos e opiniões claras e convincentes do processo global de desenvolvimento e industrialização, veja Council on Foreign Relations, “Global Development Explained | World101,” CFR Education, YouTube video, June 18, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=Po0o3Gk9FPQ>; “Hans Rosling’s 200 Countries, 200 Years, 4 Minutes—the Joy of Stats—BBC Four,” BBC, YouTube video, November 26, 2010, <https://www.youtube.com/watch?v=jbkSRLYSojo>; “The History of International Development | Max Roser | EAGxOxford2016,” Centre for Effective Altruism, YouTube video, April 16, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=XbBn8OEg4k>; Max Roser, “The Short History of Global Living Conditions and Why It Matters That We Know It,” Our World in Data, accessed October 29, 2021, <https://ourworldindata.org/a-history-of-global-living-conditions-in-5-charts>; Bourguignon and Morrisson, “Inequality Among World Citizens: 1820–1992.”

¹¹⁴ Para mais detalhes sobre as rápidas (e por vezes horrivelmente mal geridas) transformações agrícolas da China e da Índia, veja Yi Wen, “China’s Rapid Rise: From Backward Agrarian Society to Industrial Powerhouse in Just 35 Years,” Federal Reserve Bank of St. Louis, April 12, 2016, <https://www.stlouisfed.org/publications/regional-economist/april-2016/chinas-rapid-rise-from-backward-agrarian-society-to-industrial-powerhouse-in-just-35-years>; Xiao-qiang Jiao, Nyamdavaa Mongol, and Fu-suo Zhang, “The Transformation of Agriculture in China: Looking Back and Looking Forward,” *Journal of Integrative Agriculture* 17, no. 4 (April 2018): 755–64, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61774-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61774-X); Amarnath Tripathi and A. R. Prasad, “Agricultural Development in India Since Independence: A Study on Progress, Performance, and Determinants,” *Journal of Emerging Knowledge on Emerging Markets* 1, no. 1 (November 2009): 63–92, <https://digitalcommons.kennesaw.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=jekem>; M. S. Swaminathan, *50 Years of Green Revolution: An Anthology of Research Papers* (Singapore: World Scientific, 2017); Francine R. Frankel, *India’s Green Revolution: Economic Gains and Political Costs* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1971).

¹¹⁵ World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day.”

¹¹⁶ World Bank, “Regional Aggregation Using 2011 PPP and \$1.9/Day Poverty Line,” PovcalNet: The On-line Tool for Poverty Measurement Developed by the Development Research Group of the World Bank, September 1, 2022, <https://web.archive.org/web/20220901035616/http://iresearch.worldbank.org/PovcalNet/povDuplicateWB.aspx>.

¹¹⁷ “Regional Aggregation Using 2011 PPP,” World Bank; Eric W. Sievers, *The Post-Soviet Decline of Central Asia: Sustainable Development and Comprehensive Capital* (London: Routledge Curzon, 2003).

¹¹⁸ David Hulme, “The Making of the Millennium Development Goals: Human Development Meets Results-Based Management in an Imperfect World,” (BWPI working paper 16, Brooks World Poverty Institute, December 2007), <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/773bwpi-wp-1607.pdf>.

¹¹⁹ Para mais informações sobre os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio e o seu impacto, consulte United Nations Department of Economic and Social Affairs, *The Millennium Development Goals Report 2015* (New York: United Nations, April 2016), [https://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](https://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf); Hannah Ritchie and Max Roser, “Now It Is Possible to Take Stock—Did the World Achieve the Millennium Development Goals?,” Our World in Data, September 20, 2018, <https://ourworldindata.org/millennium-development-goals>; Charles Kenny, “MDGs to SDGs: Have We Lost the Plot?,” Center for Global Development, May 27, 2015, <https://www.cgdev.org/publication/mdgs-sdgs-have-we-lost-plot>.

¹²⁰ World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day (2017 PPP) (% of population) — United States,” World Bank, accessed April 28, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.DDAY?locations=US>.

¹²¹ Emily A. Shrider et al., *Income and Poverty in the United States: 2020*, Current Population Reports P60–273, US Census Bureau, September 2021, 56, <https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2021/demo/p60-273.pdf>.

¹²² David R. Dickens Jr. and Christina Morales, “Income Distribution and Poverty in Nevada,” in *The Social Health of Nevada: Leading Indicators and Quality of Life in the Silver State*, ed. Dmitri N. Shalin (Las Vegas: UNLV Center for Democratic Culture Publications, 2006): 1–24, https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=social_health_nevada_reports; Shrider et al., *Income and Poverty in the United States: 2020*, 56.

¹²³ Shrider et al., *Income and Poverty in the United States: 2020*, 14, 17.

¹²⁴ Para uma análise mais detalhada de como a linha de pobreza dos EUA é determinada e atualizada, veja Institute for Research on Poverty, “What Are Poverty Thresholds and Poverty Guidelines?,” University of Wisconsin–Madison, accessed April 28, 2023, [https://www.irlp.wisc.edu/resources/what-are-poverty-thresholds-and-poverty-guidelines/#:~:text=9902](https://www.irlp.wisc.edu/resources/what-are-poverty-thresholds-and-poverty-guidelines/#:~:text=9902;); Institute for Research on Poverty, “How Is Poverty Measured?,” University of Wisconsin–Madison, accessed April 28, 2023, <https://www.irlp.wisc.edu/resources/how-is-poverty-measured>.

¹²⁵ John Creamer et al., US Census Bureau, *Poverty in the United States: 2021* (Washington, DC: US Government Publishing Office, September 2022), 25, <https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2022/demo/p60-277.pdf>.

¹²⁶ Creamer et al., *Poverty in the United States: 2021*, 25, 36.

¹²⁷ Creamer et al., *Poverty in the United States: 2021*, 25.

¹²⁸ “MIT OpenCourseWare at 20,” MIT OpenCourseWare, YouTube video, April 12, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=OaAEamhJHUI>.

¹²⁹ Creamer et al., *Poverty in the United States: 2021*, 25; World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day—United States.”

¹³⁰ Max Roser and Esteban Ortiz-Ospina, “Global Extreme Poverty—World Population Living in Extreme Poverty, World, 1820 to 2015,” Our World in Data, March 27, 2017, updated 2019, <https://ourworldindata.org/grapher/world-population-in-extreme-poverty-absolute>; Bourguignon and Morrisson, “Inequality Among World Citizens: 1820–1992”; World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day”; World Bank, “Regional Aggregation Using 2011 PPP and \$1.9/Day Poverty Line”; World Bank, Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a day (2017 PPP) (% of population)—United States.”

¹³¹ Office of the Assistant Secretary for Planning and Evaluation, “HHS Poverty Guidelines for 2023,” US Department of Health and Human Services, January 19, 2023, <https://aspe.hhs.gov/poverty-guidelines>.

¹³² US Bureau of Economic Analysis, “Personal Income per Capita (A792RCOA052NBEA),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 30, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/A792RCOA052NBEA>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹³³ US Bureau of Economic Analysis, “Personal Income Per Capita (A792RCOA052NBEA);” Peter H. Lindert and Jeffrey G. Williamson, “American Incomes 1774–1860” (working paper 18396, National Bureau of Economic Research, September 2012), 33, https://www.nber.org/system/files/working_papers/w18396/w18396.pdf; Alexander Klein, “New State-Level Estimates of Personal Income in the United States, 1880–1910,” in *Research in Economic History*, vol. 29, ed. Christopher Hanes and Susan Wolcott (Bingley, UK: Emerald Group, 2013), 220, [https://doi.org/10.1108/S0363-3268\(2013\)0000029008](https://doi.org/10.1108/S0363-3268(2013)0000029008); “Consumer Price Index, 1800–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis, accessed April 28, 2023, <https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/inflation-calculator/consumer-priceindex-1800->.

¹³⁴ Dickens and Morales, “Income Distribution and Poverty in Nevada,” 1; Creamer et al., *Poverty in the United States: 2021*, 25.

¹³⁵ Bourguignon and Morrisson, “Inequality Among World Citizens: 1820–1992”; World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day”; World Bank Development Research Group, “Poverty Headcount Ratio at \$2.15 a Day (2017 PPP) (% of population) — United States.”

¹³⁶ Jutta Bolt and Jan Luiten van Zanden, *Maddison Project Database*, version 2020, Groningen Growth and Development Centre, November 2, 2020, <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/data/mpd2020.xlsx>; Jutta Bolt and Jan Luiten van Zanden, “Maddison Style Estimates of the Evolution of the World Economy: A New 2020 Update,” (working paper WP-15, Maddison Project, October 2020), <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/publications/wp15.pdf>; US Bureau of Economic Analysis, “Real Gross Domestic Product per Capita (A939RX0Q048SBEA),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, April 27, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/A939RX0Q048SBEA>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; John J. McCusker, “Colonial Statistics,” in *Historical Statistics of the United States: Earliest Times to the Present*, ed. Susan G. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), V-671; Richard Sutch, “National Income and Product,” in *Historical Statistics of the United States: Earliest Times to the Present*, ed. Susan G. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), III-23–25; Leandro Prados de la Escosura, “Lost Decades? Economic Performance in Post-Independence Latin America,” *Journal of Latin American Studies* 41, no. 2 (May 2009): 279–307, <https://www.jstor.org/stable/27744128>; Jutta Bolt et al., “Rebasing ‘Maddison’: New Income Comparisons and the Shape of Long-Run Economic Development” (working paper 10, Maddison Project, Groningen Growth and Development Centre, 2018), https://www.rug.nl/ggdc/html_publications/memorandum/gd174.pdf.

¹³⁷ Bolt and van Zanden, *Maddison Project Database*; Bolt and van Zanden, “Maddison Style Estimates of the Evolution of the World Economy”; US Bureau of Economic Analysis, “Real Gross Domestic Product per Capita (A939RX0Q048SBEA)”; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers”; McCusker, “Colonial Statistics,” V-671; Sutch, “National Income and Product”; Prados de la Escosura, “Lost Decades?”; Bolt et al., “Rebasing ‘Maddison.’”

¹³⁸ Bolt and van Zanden, *Maddison Project Database*; Bolt and van Zanden, “Maddison Style Estimates of the Evolution of the World Economy”; US Bureau of Economic Analysis, “Real Gross Domestic Product Per Capita (A939RX0Q048SBEA)”; “Consumer Price Index, 1913,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers”; McCusker, “Colonial Statistics,” V-671; Sutch, “National Income and Product”; Prados de la Escosura, “Lost Decades?”; Bolt et al., “Rebasing ‘Maddison.’”

¹³⁹ Max Roser, “Working Hours,” Our World in Data, 2013, <https://ourworldindata.org/workinghours>; Michael Huberman and Chris Minns, “The Times They Are Not Changin’: Days and Hours of Work in Old and New Worlds, 1870–2000,” *Explorations in Economic History* 44, no. 4 (July 12, 2007): 548, https://personal.lse.ac.uk/minns/Huberman_Minns_EEH_2007.pdf; University of Groningen and University of California, Davis, “Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States (AVHWPEUSA065NRUG),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, January 21, 2021, <https://fred.stlouisfed.org/series/AVHWPEUSA065NRUG>.

¹⁴⁰ US Census Bureau, “Real Median Personal Income in the United States (MEPAINUSA672N),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated September 13, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/MEPAINUSA672N>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹⁴¹ US Bureau of Economic Analysis, “Personal Income Per Capita (A792RCOA052NBEA)”; Lindert and Williamson, “American Incomes 1774–1860”; Klein, “New State-Level Estimates of Personal Income in the United States, 1880–1910,” 220; “Consumer Price Index, 1800–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹⁴² US Bureau of Economic Analysis, “Personal Income Per Capita (A792RCOA052NBEA)”; Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548; University of Groningen and University of California, Davis, “Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis.

¹⁴³ Bolt and van Zanden, *Maddison Project Database*; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B230RCOA052NBEA)”; US Bureau of Economic Analysis, “Personal Income (PI),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated

February 24, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/PI>; US Bureau of Economic Analysis, “Hours Worked by Full-Time and Part-Time Employees (B4701COA222NBEA),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated October 12, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/B4701COA222NBEA>; Stanley Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” in *Output, Employment, and Productivity in the United States After 1800*, ed. Dorothy S. Brady (Washington, DC: National Bureau of Economic Research, 1966), 118, <https://www.nber.org/chapters/c1567.pdf>; US Census Bureau, Statistical Abstract of the United States: 1999 (Washington, DC: US Census Bureau, 1999): 879, <https://www2.census.gov/library/publications/1999/compendia/statab/119ed/tables/sec31.pdf>; Stanley Lebergott, “Labor Force, Employment, and Unemployment, 1929–39 Estimating Methods,” *Monthly Labor Review* 67, no. 1 (July 1948): 51, <https://www.bls.gov/opub/mlr/1948/article/pdf/labor-force-employment-and-unemployment-1929-39-estimating-methods.pdf>; Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548; US Bureau of Labor Statistics, “Employment Level (CE16OV),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 10, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CE16OV>; “Consumer Price Index, 1800–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹⁴⁴ Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548.

¹⁴⁵ Para algumas explicações rápidas sobre o papel do movimento operário dos EUA na redução das horas de trabalho, bem como algumas fontes contemporâneas detalhadas, veja “History of the 40-Hour Workweek,” CNBC Make It, YouTube video, May 3, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=BcRlq-Hrtc0>; “The 40 Hour Work Week,” Prosocial Progress Foundation, YouTube video, December 3, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=7KtJNYZySjU>; Shana Lebowitz and Marguerite Ward, “Most Americans Support Andrew Yang’s Call for a 4-Day Workweek—But Before Any Policy Changes, We Should Understand Why the 5-Day, 40-Hour Workweek Was So Revolutionary,” *Business Insider*, June 12, 2020, <https://www.businessinsider.com/history-of-the-40-hour-workweek-2015-10>; George E. Barnett, “Growth of Labor Organization in the United States, 1897–1914,” *Quarterly Journal of Economics* 30, no. 4 (August 1916): 780–95, <http://www.jstor.com/stable/1884242>; Leo Wolman, *The Growth of American Trade Unions, 1880–1923* (New York: National Bureau of Economic Research, 1924).

¹⁴⁶ Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548.

¹⁴⁷ Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548.

¹⁴⁸ Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548; University of Groningen and University of California, Davis, “Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States.”

¹⁴⁹ Ao longo deste capítulo, debruço-me mais sobre as tendências de prosperidade nos EUA e noutras nações da OCDE, não porque acredite que são mais importantes do que outros países, mas porque, à data em que escrevo, atingiram pontos mais acentuados ao longo destas tendências exponenciais. Além disso, os dados de alta qualidade estão geralmente menos disponíveis para os países em desenvolvimento, o que por vezes limita a capacidade dos académicos de medir as tendências de forma rigorosa em todo o mundo. Veja Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548; University of Groningen and University of California, Davis, “Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States”; Robert C. Feenstra, Robert Inklaar, and Marcel P. Timmer, *PWT 9.1: Penn World Table Version 9.1*, Groningen Growth and Development Centre, September 26, 2019, <https://www.rug.nl/ggdc/productivity/pwt>; Robert C. Feenstra, Robert Inklaar, and Marcel P. Timmer, “The Next Generation of the Penn World Table,” *American Economic Review* 105, no. 10 (October 2015): 3150–82, <http://dx.doi.org/10.1257/aer.20130954>; “Kurzarbeit: Germany’s Short-Time Work Benefit,” International Monetary Fund, June 15, 2020, <https://www.imf.org/en/News/Articles/2020/06/11/na061120-kurzarbeit-germanys-short-timework-benefit>.

¹⁵⁰ Para mais informações sobre esta mudança e os seus prováveis impactos a longo prazo, consulte Rani Molla, “Office Work Will Never Be the Same,” *Vox*, May 21, 2020, <https://www.vox.com/recode/2020/5/21/21234242/coronavirus-covid-19-remote-work-from-home-office-reopening>; Gil Press, “The Future of Work Post-Covid-19,” *Forbes*, July 15, 2020, <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2020/07/15/the-future-of-work-post-covid-19/#3c9ea15e4baf>; Nick Routley, “6 Charts That Show What Employers and Employees Really Think About Remote Working,” *World Economic Forum*, June 3, 2020, <https://www.weforum.org/agenda/2020/06/coronavirus-covid19-remote-working-officeemployees-employers>; Matthew Dey et al., “Ability to Work from Home: Evidence from Two Surveys and Implications for the Labor Market in the

COVID-19 Pandemic,” Monthly Labor Review (US Bureau of Labor Statistics), June 2020, <https://doi.org/10.21916/mlr.2020.14>.

¹⁵¹ Huberman and Minns, “The Times They Are Not Changin’,” 548; University of Groningen and University of California, Davis, “Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States”; Feenstra, Inklaar, and Timmer, “The Next Generation of the Penn World Table,” 3150–82; OECD Statistics, “Average Annual Hours Actually Worked per Worker,” Organization for Economic Co-operation and Development, retrieved October 22, 2021, <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ANHRS>.

¹⁵² International Labour Office, *Marking Progress Against Child Labour: Global Estimates and Trends 2000–2012* (Geneva, Switzerland: International Labour Organization, 2013), 16, http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_norm/@ipec/documents/publication/wcms_221513.pdf.

¹⁵³ International Labour Office, *Marking Progress Against Child Labour*, 3; International Labour Office, *Global Estimates of Child Labour: Results and Trends, 2012–2016* (Geneva, Switzerland: International Labour Organization, 2017), 9, http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/documents/publication/wcms_575499.pdf; International Labour Office and United Nations Children’s Fund, *Child Labour: Global Estimates 2020, Trends and the Road Forward* (Geneva, Switzerland: ILO and UNICEF, 2021), 23, https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---ipec/documents/publication/wcms_797515.pdf; US Department of Labor, 2021 Findings on the Worst Forms of Child Labor (Washington, DC: US Department of Labor, 2022), https://www.dol.gov/sites/dolgov/files/ILAB/child_labor_reports/tda2021/2021_TDA_Big_Book.pdf.

¹⁵⁴ International Labour Office, *Marking Progress Against Child Labour*, 3; International Labour Office, *Global Estimates of Child Labour: Results and Trends, 2012–2016*, 9; International Labour Office and United Nations Children’s Fund, *Child Labour: Global Estimates 2020, Trends and the Road Forward*, 23, 82.

¹⁵⁵ United Nations Office on Drugs and Crime, *Global Study on Homicide: Executive Summary* (Vienna: United Nations, July 2019), 26–28, <https://www.unodc.org/documents/data-and-analysis/gsh/Booklet1.pdf>.

¹⁵⁶ Em Inglaterra, em 1325, registavam-se 21,4 homicídios por cada 100.000 pessoas por ano. Em 1575, era de 5,2, em 1675, era de 3,5 e, em 1862, era de 1,6, e tem-se mantido abaixo desse valor desde então. Em Itália, era de 71,7 em 1375, 7,0 em 1862 e 0,9 em 2010. Veja Max Roser and Hannah Ritchie, “Homicides,” Our World in Data, December 2019, <https://ourworldindata.org/homicides>; Manuel Eisner, “From Swords to Words: Does Macro-Level Change in Self-Control Predict Long-Term Variation in Levels of Homicide?”, *Crime and Justice* 43, no. 1 (September 2014): 80–81, <https://doi.org/10.1086/677662>; UN Office on Drugs and Crime, “Intentional Homicides (per 100,000 People)—France, Netherlands, Sweden, Germany, Switzerland, Italy, United Kingdom, Spain,” retrieved from Worldbank.org, accessed March 25, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/VC.IHR.PSRC.P5?end=2020&locations=FR-NL-SE-DECH-IT-GB-ES&start=2020&view=bar>; “Appendix Tables: Homicide in England and Wales,” UK Office for National Statistics, February 9, 2023, <https://www.ons.gov.uk/file?uri=/peoplepopulationandcommunity/crimeandjustice/datasets/appendixtableshomicideinenglandandwales/current/homicideyemarch22appendixtables.xlsx>.

¹⁵⁷ Este gráfico é em grande parte extraído do gráfico do Our World in Data “Taxas de homicídios de longa duração na Europa Ocidental, de 1250 a 2017”. No entanto, a versão mais recente deste gráfico incorpora dados da Organização Mundial de Saúde desde 1950, compilados para fins de saúde pública, e subestima significativamente os homicídios notificados judicialmente. Portanto, os dados da OMS não são suficientemente comensuráveis com os dados de anos anteriores, que provêm em grande parte da pesquisa de arquivo de Eisner (2014). Em vez disso, para a maioria dos dados desde 1990, este gráfico baseia-se na base de dados de Estatísticas Internacionais de Homicídios do Gabinete das Nações Unidas sobre Drogas e Crime. Para os dados do Reino Unido de 2019–2021, os anos de reporte vão de abril a março, pelo que as médias ponderadas são aqui tomadas para aproximar os anos civis de janeiro a dezembro no resto dos dados. Veja Roser and Ritchie, “Homicides”; Eisner, “From Swords to Words,” 80–81; UN Office on Drugs and Crime, “Intentional Homicides (per 100,000 People)—France, Netherlands, Sweden, Germany, Switzerland, Italy, United Kingdom, Spain”; “Appendix Tables: Homicide in England and Wales,” UK Office for National Statistics.

¹⁵⁸ Alexia Cooper and Erica L. Smith, *Homicide Trends in the United States, 1980–2008* (Washington, DC: US Department of Justice, Bureau of Justice Statistics, November 2011), 2, <https://www.bjs.gov/content/pub/pdf/htus8008.pdf>; “Crime in the United States: By Volume and Rate per 100,000 Inhabitants, 1999–2018,” Federal Bureau of Investigation, accessed April 28, 2023, <https://ucr.fbi.gov/crime-in-the-u.s/2018/crime-in-the-u.s.-2018/topicpages/tables/table-1>; Federal Bureau of Investigation, “Crime Data Explorer: Expanded Homicide Offense Counts in the United States,” US Department of Justice, Federal Bureau of Investigation, accessed April 28, 2023, <https://cde.ucr.cjis.gov/LATEST/webapp/#/pages/explorer/crime/shr>; Emily J. Hanson, “Violent Crime Trends, 1990–2021,” Congressional Research Service report IF12281, December 12, 2022, <https://sgp.fas.org/crs/misc/IF12281.pdf>; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B23ORCOA052NBEA).”

¹⁵⁹ Para mais informações sobre os efeitos da Lei Seca no crime e na violência na América, consulte “How Prohibition Created the Mafia,” History, YouTube video, February 21, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=N-K60XXaPKw>; Dave Roos, “How Prohibition Put the ‘Organized’ in Organized Crime,” History.com, February 22, 2019, <https://www.history.com/news/prohibition-organized-crime-al-capone>; Bureau of Justice Statistics, “Key Facts at a Glance: Homicide Rate Trends,” US Department of Justice, accessed September 29, 2006, <https://web.archive.org/web/20060929061431/http://www.ojp.usdoj.gov/bjs/glance/tables/hmrmtab.htm>.

¹⁶⁰ Para mais explicações sobre o impacto da guerra contra a droga e a sua relação com a violência nos Estados Unidos, veja “Why The War on Drugs Is a Huge Failure,” Kurzgesagt—In a Nutshell, YouTube video, March 1, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=wJUXLqNHCal>; German Lopez, “The War on Drugs, Explained,” Vox, May 8, 2016, <https://www.vox.com/2016/5/8/18089368/war-on-drugs-marijuana-cocaine-heroin-meth>; PBS, “Thirty Years of America’s Drug War: A Chronology,” Frontline, accessed April 28, 2023, <https://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/drugs/cron>; Bureau of Justice Statistics, “Key Facts at a Glance: Homicide Rate Trends.”

¹⁶¹ Para mais informações sobre a teoria das janelas partidas e o policiamento proativo, consulte George L. Kelling and James Q. Wilson, “Broken Windows: The Police and Neighborhood Safety,” *Atlantic*, March 1982, https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1982/03/broken-windows/304465/?single_page=true; “Broken Windows Policing,” Center for Evidence-Based Crime Policy, accessed April 28, 2023, <https://cebcp.org/evidence-based-policing/what-works-inpolicing/research-evidence-review/broken-windows-policing> [inactive]; Shankar Vedantam et al., “How a Theory of Crime and Policing Was Born, and Went Terribly Wrong,” NPR, November 1, 2016, <https://www.npr.org/2016/11/01/500104506/broken-windows-policing-and-the-origins-of-stop-and-frisk-and-how-it-went-wrong>; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Proactive Policing: Effects on Crime and Communities* (Washington, DC: National Academies Press, 2018), <https://doi.org/10.17226/24928>; Kevin Strom, *Research on the Impact of Technology on Policing Strategy in the 21st Century, Final Report* (Research Triangle Park, NC: RTI International, 2017), <https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/251140.pdf>.

¹⁶² “Lead for Life—The History of Leaded Gasoline—An Excerpt,” from *Late Lessons from Early Warnings*, Jakob Gottschau, YouTube video, September 16, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=pqg9jH1xwjl>; Jennifer L. Doleac, “New Evidence That Lead Exposure Increases Crime,” Brookings Institution, June 1, 2017, <https://www.brookings.edu/blog/up-front/2017/06/01/new-evidence-that-lead-exposure-increases-crime>.

¹⁶³ Bureau of Justice Statistics, “Key Facts at a Glance: Homicide Rate Trends”; James Alan Fox and Marianne W. Zawitz, *Homicide Trends in the United States* (Washington, DC: Bureau of Justice Statistics, 2010), 9–10, <https://www.bjs.gov/content/pub/pdf/htius.pdf>; “Crime in the United States: By Volume and Rate per 100,000 Inhabitants, 1999–2018,” Federal Bureau of Investigation; Federal Bureau of Investigation, “Crime Data Explorer: Expanded Homicide Offense Counts in the United States”; Hanson, “Violent Crime Trends, 1990–2021”; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B23ORCOA052NBEA).”

¹⁶⁴ Ann L. Pastore and Kathleen Maguire, eds., *Sourcebook of Criminal Justice Statistics* (Washington, DC: US Department of Justice, Bureau of Justice Statistics, 2005), 278–79, <https://www.ojp.gov/pdffiles1/Digitization/208756NCJRS.pdf>; “Crime in the United States: By Volume and Rate per 100,000 Inhabitants, 1999–2018,” Federal Bureau of Investigation; Federal Bureau of Investigation, “Crime Data Explorer: Expanded Homicide Offense Counts in the United States”; Hanson, “Violent Crime Trends, 1990–2021”; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B23ORCOA052NBEA).”

¹⁶⁵ Steven Pinker, *The Better Angels of Our Nature: Why Violence Has Declined* (New York: Penguin, 2011), 60–91.

¹⁶⁶ Pinker, *Better Angels of Our Nature*, 60.

¹⁶⁷ Pinker, *Better Angels of Our Nature*, 49, 53, 63–64.

¹⁶⁸ Pinker, *Better Angels of Our Nature*, 52–53.

¹⁶⁹ Pinker, *Better Angels of Our Nature*, 193–98.

¹⁷⁰ Pinker, *Better Angels of Our Nature*, 175–77, 580–92; Peter Singer, *The Expanding Circle: Ethics, Evolution, and Moral Progress* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1981).

¹⁷¹ Para obter vários resumos mais detalhados das aplicações recentes de IA para a descoberta de materiais para eletricidade solar e armazenamento de energia, consulte Elizabeth Montalbano, “AI Enables Design of Spray-on Coating That Can Generate Solar Energy,” *Design News*, December 26, 2019, <https://www.designnews.com/materials-assembly/ai-enables-design-spray-coating-can-generate-solar-energy>; Shinji Nagasawa, Eman Al-Naamani, and Akinori Saeki, “Computer-Aided Screening of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell: Classification by Random Forest,” *Journal of Physical Chemistry Letters* 9, no. 10 (May 7, 2018): 2639–46, <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b00635>; Geun Ho Gu et al., “Machine Learning for Renewable Energy Materials,” *Journal of Materials Chemistry A* 7, no. 29 (April 30, 2019): 17096–117, <https://doi.org/10.1039/C9TA02356A>; Ziyi Luo et al., “A Survey of Artificial Intelligence Techniques Applied in Energy Storage Materials R&D,” *Frontiers in Energy Research* 8, no. 116 (July 3, 2020), <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00116>; An Chen, Xu Zhang, and Zhen Zhou, “Machine Learning: Accelerating Materials Development for Energy Storage and Conversion,” *InfoMat* 2, no. 3 (February 23, 2020): 553–76, <https://doi.org/10.1002/inf2.12094>; Xinyi Yang et al., “Development Status and Prospects of Artificial Intelligence in the Field of Energy Conversion Materials,” *Frontiers in Energy Research* 8, no. 167 (July 31, 2020), <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00167>; Teng Zhou, Zhen Song, and Kai Sundmacher, “Big Data Creates New Opportunities for Materials Research: A Review on Methods and Applications of Machine Learning for Materials Design,” *Engineering* 5, no. 6 (December 2019): 1017–26, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.02.011>.

¹⁷² Hannah Ritchie and Max Roser, “Renewable Energy,” *Our World in Data*, accessed April 28, 2023, <https://ourworldindata.org/renewable-energy>; International Energy Agency Statistics/OECD, “Electricity Production from Renewable Sources, Excluding Hydroelectric (% of Total),” retrieved from Worldbank.org, 2014, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.RNWX.ZS>; BP Statistical Review of World Energy 2021 (London: BP, 2021), 64–65, <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-fullreport.pdf>; BP, “Statistical Review of World Energy—All Data, 1965–2021,” from *BP Statistical Review of World Energy 2022* (London: BP, 2022), <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/xlsx/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review-2022-all-data.xlsx>.

¹⁷³ BP Statistical Review of World Energy 2022 (London: BP, 2022): 45, 51, <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>; BP Statistical Review of World Energy 2021, 64–65; BP Statistical Review of World Energy 2020 (London: BP, 2020), 52–53, 59, 61, <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-fullreport.pdf>; BP, “Statistical Review of World Energy—All Data, 1965–2021”; International Energy Agency Statistics/OECD, “Electric Power Consumption (kWh Per Capita),” retrieved from Worldbank.org, 2014, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>; United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, “Total Population—Both Sexes,” *World Population Prospects 2019*, online ed. rev. 1 (New York: United Nations, 2019), [https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20\(Standard\)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F01_1_TOTAL_POPULATION_BOTH_SEXES.xlsx](https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20(Standard)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F01_1_TOTAL_POPULATION_BOTH_SEXES.xlsx); Ritchie and Roser, “Renewable Energy.”

¹⁷⁴ “Solar (Photovoltaic) Panel Prices vs. Cumulative Capacity,” *Our World in Data*, accessed March 25, 2023, <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices-vs-cumulative-capacity>; Gregory F. Nemet, “Interim Monitoring of Cost Dynamics for Publicly Supported Energy Technologies,” *Energy Policy* 37, no. 3 (March 2009): 825–35, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.031>; J. Doyne Farmer and François Lafond, “How Predictable Is Technological Progress?,” *Research Policy* 45, no. 3 (April 2016): 647–65, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.11.001>; “IRENASTAT Online Data Query Tool,” International Renewable Energy Agency, accessed March 25, 2023, <https://www.irena.org/Data/Downloads/IRENASTAT>; IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2021* (Abu Dhabi:

International Renewable Energy Agency, 2022), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0ac7de7c73d8; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹⁷⁵ Molly Cox, “Key 2020 US Solar PV Cost Trends and a Look Ahead,” Greentech Media, December 17, 2020, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/key-2020-us-solar-pv-costtrends-and-a-look-ahead>.

¹⁷⁶ “Solar (Photovoltaic) Panel Prices vs. Cumulative Capacity,” Our World in Data; Nemet, “Interim Monitoring of Cost Dynamics for Publicly Supported Energy Technologies,” 825–35; Farmer and Lafond, “How Predictable Is Technological Progress?”; “IRENASTAT Online Data Query Tool”; IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2021*; François Lafond et al., “How Well Do Experience Curves Predict Technological Progress? A Method for Making Distributional Forecasts,” *Technological Forecasting & Social Change* 128 (March 2018): 104–17, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.001>; Sandra Enkhardt, “Global Solar Capacity Additions Hit 268 GW in 2022, Says BNEF,” PV Magazine, December 23, 2022, <https://www.pv-magazine.com/2022/12/23/global-solar-capacity-additions-hit-268-gw-in-2022-says-bnef>.

¹⁷⁷ “Solar (Photovoltaic) Panel Prices vs. Cumulative Capacity,” Our World in Data; Nemet, “Interim Monitoring of Cost Dynamics for Publicly Supported Energy Technologies,” 825–35; Farmer and Lafond, “How Predictable Is Technological Progress?”; “IRENASTAT Online Data Query Tool”; IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2021*; Lafond et al., “How Well Do Experience Curves Predict Technological Progress?”, 104–17; Enkhardt, “Global Solar Capacity Additions Hit 268 GW in 2022, Says BNEF.”

¹⁷⁸ Hannah Ritchie and Max Roser, “Renewable Energy—Renewable Energy Generation, World,” Our World in Data, accessed April 28, 2023, https://ourworldindata.org/grapher/modernrenewable-energy-consumption?country=~OWID_WRL; Ritchie and Roser, “Renewable Energy—Solar Power Generation”; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency, November 26, 2019, <https://www.iea.org/data-andstatistics/charts/world-electricity-generation-by-fuel-1971-2017>; BP *Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; BP, “Statistical Review of World Energy—All Data, 1965–2021”; “Share of Low-Carbon Sources and Coal in World Electricity Generation, 1971–2021,” International Energy Agency, April 19, 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-lowcarbon-sources-and-coal-in-world-electricity-generation-1971-2021>.

¹⁷⁹ Ryan Wiser et al., “Land-Based Wind Market Report: 2022 Edition,” US Department of Energy, August 2022, 50, <https://doi.org/10.2172/1882594>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

¹⁸⁰ Our World in Data, “Wind Power Generation,” Our World in Data, accessed March 25, 2023, <https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart>; BP *Statistical Review of World Energy 2022*; “Yearly Electricity Data,” Ember, March 28, 2023, <https://emberclimate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data>; Charles Moore, “European Electricity Review 2022,” Ember, February 1, 2022, <https://ember-climate.org/insights/research/europeanelectricity-review-2022>.

¹⁸¹ “Renewable Energy Generation, World,” Our World in Data; BP *Statistical Review of World Energy 2022*.

¹⁸² “Renewable Energy Generation, World,” Our World in Data; BP *Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency.

¹⁸³ Para uma análise mais aprofundada da história da Magna Carta e do seu efeito na fundação americana, veja “800 Years of Magna Carta,” British Library, YouTube video, March 10, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=RQ7vUkbtIQA>; Nicholas Vincent, “Consequences of Magna Carta,” British Library, March 13, 2015, <https://www.bl.uk/magnacarta/articles/consequences-of-magna-carta>; Dave Roos, “How Did Magna Carta Influence the U.S. Constitution?,” History.com, September 30, 2019, <https://www.history.com/news/magnacarta-influence-us-constitution-bill-of-rights>.

¹⁸⁴ Para mais informações sobre a imprensa de Gutenberg e o seu impacto na civilização europeia, veja Dave Roos, “7 Ways the Printing Press Changed the World,” History.com, September 3, 2019, <https://www.history.com/news/printing-press->

[renaissance](#); Jeremiah Dittmar, “Information Technology and Economic Change: The Impact of the Printing Press,” VoxEU, February 11, 2011, <https://voxeu.org/article/information-technology-and-economic-change-impact-printing-press>; Patrick McGrady, “The Medieval Invention That Changed the Course of History: The Machine That Made Us,” Timeline—World History Documentaries, YouTube video, August 25, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=uQ88yC35NjI>; Jeremiah Dittmar and Skipper Seabold, “Gutenberg’s Moving Type Propelled Europe Towards the Scientific Revolution,” *LSE Business Review*, March 19, 2019, <https://blogs.lse.ac.uk/businessreview/2019/03/19/gutenbergs-moving-type-propelled-europetowards-the-scientific-revolution>.

¹⁸⁵ Para um excelente resumo sobre as origens e a evolução inicial do Parlamento em Inglaterra, veja Gwilym Dodd, “The Birth of Parliament,” BBC, February 17, 2011, https://www.bbc.co.uk/history/british/middle_ages/birth_of_parliament_01.shtml.

¹⁸⁶ Para uma variedade de recursos adicionais sobre a Guerra Civil Inglesa e a Declaração de Direitos de Inglaterra de 1689, veja John Green, “English Civil War: Crash Course European History #14,” CrashCourse, YouTube video, August 6, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=dyk3bl_Y68Y; Avalon Project at Yale Law School, “English Bill of Rights 1689,” Lillian Goldman Law Library, accessed April 28, 2023, https://avalon.law.yale.edu/17th_century/england.asp; Geoffrey Lock, “The 1689 Bill of Rights,” *Political Studies* 37, no. 4 (December 1, 1989), <https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.1989.tb00288.x>; Peter Ackroyd, *Civil War: The History of England*, vol. 3 (New York: St. Martin’s, 2014).

¹⁸⁷ Neil Johnston, “The History of the Parliamentary Franchise” (research paper 13/14, UK House of Commons Library, March 1, 2013), <http://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/RP13-14/RP13-14.pdf>; Roser and Ortiz-Ospina, “Literacy”; Pamuk and van Zanden, “Standards of Living,” 229.

¹⁸⁸ Dalibor Rohac, “Mechanism Design in the Venetian Republic,” Cato Institute, July 17, 2013, <https://www.cato.org/publications/commentary/mechanism-design-venetian-republic>; Thomas F. Madden, *Venice: A New History* (New York: Penguin, 2012).

¹⁸⁹ Anna Grzeškowiak-Krwawicz, *Queen Liberty: The Concept of Freedom in the Polish-Lithuanian Commonwealth* (Leiden, Netherlands: Brill, 2012).

¹⁹⁰ Steve Umhoefer, “Mark Pocan Says Less than 25 Percent of Population Could Vote When Constitution Was Written,” Politifact, April 16, 2015, <https://www.politifact.com/factchecks/2015/apr/16/mark-pocan/mark-pocan-says-less-25-percent-population-could-v>.

¹⁹¹ Para mais informações sobre o sufrágio americano inicial, desde o simplificado ao mais detalhado, veja “Who Voted in Early America?,” Constitutional Rights Foundation, accessed April 28, 2023, <https://www.crf-usa.org/bill-of-rights-in-action/bria-8-1-b-who-voted-in-earlyamerica#.UW36ebWsiSo>; Donald Ratcliffe, “The Right to Vote and the Rise of Democracy, 1787–1828,” *Journal of the Early Republic* 33, no. 2 (Summer 2013): 219–54, <https://www.jstor.org/stable/24768843>.

¹⁹² Para mais detalhes sobre os movimentos liberais que floresceram e fracassaram na Europa em meados do século XIX, veja John Green, “Revolutions of 1848: Crash Course European History #26,” CrashCourse, YouTube video, November 19, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=cXTaP1BD1YY>; “Alexander II—History of Russia in 100 Minutes (Part 17 of 36),” Smart History of Russia, YouTube video, July 21, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=cqGBRn7oBEg>; “Alexander III—History of Russia in 100 Minutes (Part 18 of 36),” Smart History of Russia, YouTube video, July 21, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=XGCzmjwfSSs>; Mike Rapport, *1848: Year of Revolution* (New York: Basic Books, 2009); Paul Bushkovitch, *A Concise History of Russia* (New York: Cambridge University Press, 2011).

¹⁹³ “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data, accessed March 29, 2023, https://ourworldindata.org/grapher/people-living-in-democracies-autocracies?country=~OWID_WRL; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem (Varieties of Democracy), accessed March 25, 2023, <https://v-dem.net/data/the-v-dem-dataset>; Bastian Herre, “Scripts and Datasets on Democracy,” GitHub, accessed March 25, 2023, <https://github.com/owid/notebooks/tree/main/BastianHerre/democracy>; Anna Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues for the Comparative Study of Political Regimes,” *Politics and Governance* 6, no. 1 (March 19, 2018): 60–77, <https://doi.org/10.17645/pag.v6i1.1214>.

¹⁹⁴ “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem; Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues.”

¹⁹⁵ “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem; Herre, “Scripts and Datasets on Democracy”; Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues.”

¹⁹⁶ “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem; Herre, “Scripts and Datasets on Democracy”; Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues.”

¹⁹⁷ “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem; Herre, “Scripts and Datasets on Democracy”; Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues.”

¹⁹⁸ Bradley Honigberg, “The Existential Threat of AI-Enhanced Disinformation Operations,” Just Security, July 8, 2022, <https://www.justsecurity.org/82246/the-existential-threat-of-ai-enhanced-disinformation-operations/>; Tiffany Hsu and Stuart A. Thompson, “Disinformation Researchers Raise Alarms About A.I. Chatbots,” New York Times, February 13, 2023, <https://www.nytimes.com/2023/02/08/technology/ai-chatbots-disinformation.html>.

¹⁹⁹ Este gráfico inclui dados de dois conjuntos de dados úteis. O Nosso Mundo em Dados tem estimativas que abrangem um período muito longo, de 1800 a 2022. Baseiam-se principalmente no nível de autoritarismo numa sociedade e incluem algumas aproximações vagas, especialmente para o período anterior à Segunda Guerra Mundial. A Unidade de Inteligência Economista avalia se os países são democracias com base em informação muito mais granular sobre uma série de fatores em cada nação, como a participação política e as liberdades civis. No entanto, estes dados remontam apenas a 2006. Uma vez que os dois conjuntos de dados utilizam metodologias e critérios diferentes, e como não existe uma relação consistente entre eles nos anos em que se sobrepõem, não seria adequado uni-los num único conjunto. Em vez disso, são apresentados ambos: os dados do NMD fornecem uma visão mais ampla das tendências gerais, enquanto os dados do UIE oferecem um quadro mais preciso da democratização contemporânea. Note-se que o recuo da democracia desde 2015 é em grande parte motivado pelas erosões da democracia na Índia, que passou a ser considerada uma “autocracia eleitoral”. Veja “People Living in Democracies and Autocracies, World,” Our World in Data; “The V-Dem Dataset (v13),” V-Dem; Herre, “Scripts and Datasets on Democracy”; Lührmann et al., “Regimes of the World (RoW): Opening New Avenues”; Laza Kekic, “The World in 2007: *The Economist Intelligence Unit’s Index of Democracy*,” Economist, November 15, 2006, 6, https://www.economist.com/media/pdf/DEMOCRACY_INDEX_2007_v3.pdf; *The Economist Intelligence Unit’s Index of Democracy 2008* (London: Economist Intelligence Unit, 2008), 2, <https://graphics.eiu.com/PDF/Democracy%20Index%202008.pdf>; *Democracy Index 2010: Democracy in Retreat* (London: Economist Intelligence Unit, 2010), 1, https://graphics.eiu.com/PDF/Democracy_Index_2010_web.pdf; *Democracy Index 2011: Democracy Under Stress* (London: Economist Intelligence Unit, 2011), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2011; *Democracy Index 2012: Democracy at a Standstill* (London: Economist Intelligence Unit, 2012), 2, <https://web.archive.org/web/20170320185156/http://pages.eiu.com/rs/eiu2/images/Democracy-Index-2012.pdf>; *Democracy Index 2013: Democracy in Limbo* (London: Economist Intelligence Unit, 2013), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=Democracy0814; *Democracy Index 2014: Democracy and Its Discontents* (London: Economist Intelligence Unit, 2014), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=Democracy0115; *Democracy Index 2015: Democracy in an Age of Anxiety* (London: Economist Intelligence Unit, 2015), 1, <https://web.archive.org/web/20160305143559/http://www.yabiladi.com/img/content/EIUDemocracy-Index-2015.pdf>; *Democracy Index 2016: Revenge of the “Deplorables,”* (London: Economist Intelligence Unit, 2016), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2016; *Democracy Index 2017: Free Speech Under Attack* (London: Economist Intelligence Unit, 2017), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2017; *Democracy Index 2018: Me Too?* (London: Economist Intelligence Unit, 2018), 2, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=democracy2018; *Democracy Index 2019: A Year of Democratic Setbacks and Popular Protest* (London: Economist Intelligence Unit, 2019), 3, https://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=democracyindex2019; *Democracy Index 2020: In Sickness and in Health?* (London: Economist Intelligence Unit, 2020), 3, <https://pages.eiu.com/rs/753-RIQ-438/images/democracy-index-2020.pdf>; *Democracy Index 2021: The China Challenge* (London: Economist Intelligence Unit, 2020), 4,

<https://www.eiu.com/n/campaigns/democracyindex-2021>; *Democracy Index 2022: Frontline Democracy and the Battle for Ukraine* (London: Economist Intelligence Unit, 2020), 3, <https://www.eiu.com/n/campaigns/democracy-index-2022>.

²⁰⁰ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos históricos de custos de computação neste livro.

²⁰¹ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos históricos de custos de computação neste livro.

²⁰² Joshua Ho and Andrei Frumusanu, “Understanding Qualcomm’s Snapdragon 810: Performance Review,” Anandtech, February 12, 2015, <https://www.anandtech.com/show/8933/snapdragon-810-performance-preview/5>. Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos históricos de custos de computação neste livro.

²⁰³ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos históricos de custos de computação neste livro.

²⁰⁴ Paul E. Ceruzzi, *A History of Modern Computing*, 2nd ed. (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), 73, https://www.google.com/books/edition/A_History_of_Modern_Computing/x1YESXanrgQC; “Reference / FAQ / Products and Services,” IBM, April 28, 2023, https://www.ibm.com/ibm/history/reference/faq_0000000011.html [inactive]; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis.

²⁰⁵ Kyle Wiggers, “Apple Unveils the A16 Bionic, Its Most Powerful Mobile Chip Yet,” *TechCrunch*, September 7, 2022, <https://techcrunch.com/2022/09/07/apple-unveils-newmobile-chips-including-the-a16-bionic>; Nick Guy and Roderick Scott, “Which iPhone Should I Buy?,” *New York Times*, October 28, 2022, <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/theiphone-is-our-favorite-smartphone>.

²⁰⁶ Gordon Moore, “Cramming More Components onto Integrated Circuits,” *Electronics* 38, no. 8 (April 19, 1965), <https://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2017/03/102770822-05-01-acc.pdf>; “1965: ‘Moore’s Law’ Predicts the Future of Integrated Circuits,” Computer History Museum, accessed April 28, 2023, <https://www.computerhistory.org/siliconengine/moores-law-predicts-the-future-of-integratedcircuits>; Fernando J. Corbató et al., *The Compatible Time-Sharing System: A Programmer’s Guide* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), http://www.bitsavers.org/pdf/mit/ctss/CTSS_ProgrammersGuide.pdf.

²⁰⁷ Robert W. Keyes, “Physics of Digital Devices,” *Reviews of Modern Physics* 61, no. 2 (April 1, 1989): 279–98, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.279>.

²⁰⁸ “Wikipedia: Size Comparisons,” Wikipedia: *The Free Encyclopedia*, Wikimedia Foundation, accessed April 28, 2023, https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Size_comparisons#Wikipedia.

²⁰⁹ Descrevo com mais detalhe a conversão de muitos bens físicos em tecnologias de informação no capítulo 6.

²¹⁰ K. Eric Drexler, *Radical Abundance: How a Revolution in Nanotechnology Will Change Civilization* (New York: PublicAffairs, 2013), 168–72.

²¹¹ Para uma análise mais aprofundada da carne cultivada e do impacto atual da produção de carne, veja “The Meat of the Future: How Lab-Grown Meat Is Made,” Eater, YouTube video, October 2, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=u468xY1T8fw>; “Inside the Quest to Make Lab Grown Meat,” Wired, YouTube video, February 16, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=QO9SS1NS6MM>; Mark Post, “Cultured Beef for Food-Security and the Environment: Mark Post at TEDxMaastricht,” TEDx Talks, YouTube video, May 11, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=FITvEUSJ8TM>; Julian Huguet, “This Breakthrough in Lab-Grown Meat Could Make It Look Like Real Flesh,” Seeker, YouTube video, November 14, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=1lUuDi_s_Zo; “How Close Are We to Affordable Lab-Grown Meat?,” PBS Terra, YouTube video, August 25, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=M-weFARkGi4>; “Can Lab-Grown Steak be the Future of Meat? | Big Business | Business Insider,” Insider Business, YouTube video, July 17, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=UQejwvnogOM>; Leah Douglas, “Lab-Grown Meat Moves Closer to American Dinner Plates,” Reuters, January 23, 2023, <https://www.reuters.com/business/retail-consumer/lab-grown-meat-moves-closer-american-dinner-plates-2023-01-23>; “Yearly Number of Animals Slaughtered for Meat, World, 1961 to 2020,” Our World in Data, accessed March 25, 2023, <https://ourworldindata.org/grapher/animals-slaughtered-for-meat>; “Global Meat Production, 1961 to 2020,” Our World in

Data, accessed March 25, 2023, <https://ourworldindata.org/grapher/global-meat-production>; FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, accessed March 25, 2023, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>; Xiaoming Xu et al., “Global Greenhouse Gas Emissions from Animal-Based Foods Are Twice Those of Plant-Based Foods,” *Nature Food* 2 (September 13, 2021): 724–32, <https://www.fao.org/3/cb7033en/cb7033en.pdf>.

²¹² “GLEAM v3.0 Dashboard—Emissions—Global Emissions from Livestock in 2015,” Food and Agriculture Organization of the United Nations, accessed March 29, 2023, https://foodandagricultureorganization.shinyapps.io/GLEAMV3_Public.

²¹³ Para mais informações sobre o conceito de metaverso, consulte John Herrman and Kellen Browning, “Are We in the Metaverse Yet?”, *New York Times*, July 10, 2021, <https://www.nytimes.com/2021/07/10/style/metaverse-virtual-worlds.html>; Rabindra Ratan and Yiming Lei, “The Metaverse: From Science Fiction to Virtual Reality,” *Big Think*, August 13, 2021, <https://bigthink.com/the-future/metaverse>; Casey Newton, “Mark in the Metaverse,” *The Verge*, July 22, 2021, <https://www.theverge.com/22588022/mark-zuckerberg-facebook-ceo-metaverse-interview>.

²¹⁴ Hannah Ritchie, “Half of the World’s Habitable Land Is Used for Agriculture,” Our World in Data, November 11, 2019, <https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture>; Erle C. Ellis et al., “Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000, *Global Ecology and Biogeography* 19, no. 5 (September 2010): 589–606, <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>; “Food and Agriculture Data,” FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations, accessed April 28, 2023, <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

²¹⁵ Ritchie, “Half of the World’s Habitable Land Is Used for Agriculture”; Ellis et al., “Anthropogenic Transformation of the Biomes”; “Food and Agriculture Data,” FAOSTAT.

²¹⁶ Jackson Burke, “As Working from Home Becomes More Widespread, Many Say They Don’t Want to Go Back,” *CNBC*, April 24, 2020, <https://www.cnbc.com/2020/04/24/as-working-from-home-becomes-more-widespread-many-say-they-dont-want-to-go-back.html>.

²¹⁷ Para uma análise mais aprofundada de como os materiais com características à escala nano estão a ser utilizados para aumentar a eficiência solar fotovoltaica, consulte Maren Hunsberger, “Carbon Nanotubes Might Be the Secret Boost Solar Energy Has Been Looking For,” *Seeker*, YouTube video, September 16, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=EwiDGxkD9_c; Matt Ferrell, “How Carbon Nanotubes Might Boost Solar Energy—Explained,” *Undecided with Matt Ferrell*, YouTube video, July 7, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=lnZpaunXhGc>; David Grossman, “Carbon Nanotubes Could Increase Solar Efficiency to 80 Percent,” *Popular Mechanics*, July 25, 2019, <https://www.popularmechanics.com/science/green-tech/a28506867/carbon-nanotubes-solarefficiency>; Nasim Tavakoli and Esther Alarcon-Llado, “Combining 1D and 2D Waveguiding in an Ultrathin GaAs NW/Si Tandem Solar Cell,” *Optics Express* 27, no. 12 (June 10, 2019): A909–A923, <https://doi.org/10.1364/OE.27.00A909>.

²¹⁸ Mark Hutchins, “A Quantum Dot Solar Cell with 16.6% Efficiency,” *PV Magazine*, February 19, 2020, <https://www.pv-magazine.com/2020/02/19/a-quantum-dot-solar-cell-with-16-6-efficiency>; C. Jackson Stolle, Taylor B. Harvey, and Brian A. Korgel, “Nanocrystal Photovoltaics: A Review of Recent Progress,” *Current Opinion in Chemical Engineering* 2, no. 2 (May 2013): 160–67, <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.03.001>.

²¹⁹ Qiulin Tan et al., “Nano-Fabrication Methods and Novel Applications of Black Silicon,” *Sensors and Actuators A: Physical* 295 (August 15, 2019): 560–73, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.044>.

²²⁰ Stephen Y. Chou and Wei Ding, “Ultrathin, High-Efficiency, Broad-Band, Omni-Acceptance, Organic Solar Cells Enhanced by Plasmonic Cavity with Subwavelength Hole Array,” *Optics Express* 21, no. S1 (January 14, 2013): A60–A76, <https://doi.org/10.1364/OE.21.000A60>.

²²¹ David L. Chandler, “Solar Power Heads in a New Direction: Thinner,” *MIT News*, June 26, 2013, <http://news.mit.edu/2013/thinner-solar-panels-0626>; Marco Bernardi, Maurizia Palummo, and Jeffrey C. Grossman, “Extraordinary Sunlight Absorption and One Nanometer Thick Photovoltaics Using Two-Dimensional Monolayer Materials,” *Nano Letters* 13, no. 8 (June 10, 2013): 3664–70, <https://doi.org/10.1021/nl401544y>.

- ²²² Andy Extnance, “The Dawn of Solar Windows,” *IEEE Spectrum*, January 24, 2018, <https://spectrum.ieee.org/energy/renewables/the-dawn-of-solar-windows>; Glenn McDonald, “This Liquid Coating Turns Windows Into Solar Panels,” *Seeker*, September 1, 2017, <https://www.seeker.com/earth/energy/clear-liquid-coating-turns-windows-into-solar-panels>.
- ²²³ “Renewable Energy Generation, World,” *Our World in Data*; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency.
- ²²⁴ “Renewable Energy Generation, World,” *Our World in Data*; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency.
- ²²⁵ “Renewable Energy Generation, World,” *Our World in Data*; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency.
- ²²⁶ “Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis—Version 15.0,” Lazard, October 2021, 9, <https://www.lazard.com/media/sptlfats/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>; Mark Bolinger et al., “Levelized Cost-Based Learning Analysis of Utilityscale Wind and Solar in the United States,” *iScience* 25, no. 6 (May 2022): 4, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104378>; Jeffrey Logan et al., Electricity Generation Baseline Report (technical report NREL/TP-6A20-67645, National Renewable Energy Laboratory, January 2017), 6, <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67645.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis—Version 11.0,” Lazard, 2017, 2, 10, <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf> [inactive]; Center for Sustainable Systems, “Wind Energy Factsheet” (pub. no. CSS07-09, University of Michigan, August 2019), [http://css.umich.edu/sites/default/files/Wind%20Energy CSS07-09 e2019.pdf](http://css.umich.edu/sites/default/files/Wind%20Energy%20CSS07-09%20e2019.pdf); “Renewable Energy Generation, World,” *Our World in Data*; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency.
- ²²⁷ Alexis De Vos, “Detailed Balance Limit of the Efficiency of Tandem Solar Cells,” *Journal of Physics D: Applied Physics* 13, no. 5 (1980): 845, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/13/5/018>; “Best Research-Cell Efficiency Chart,” National Renewable Energy Laboratory, accessed April 28, 2023, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- ²²⁸ Marcelo De Lellis, “The Betz Limit Applied to Airborne Wind Energy,” *Renewable Energy* 127 (November 2018): 32–40, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.034>.
- ²²⁹ Ritchie and Roser, “Renewable Energy—Renewable Energy Generation, World”; Ritchie and Roser, “Renewable Energy—Solar Power Generation”; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; BP, “Statistical Review of World Energy—All Data, 1965–2021”; “Share of Low-Carbon Sources and Coal in World Electricity Generation, 1971–2021,” International Energy Agency.
- ²³⁰ Science on a Sphere, “Energy on a Sphere,” National Oceanic and Atmospheric Administration, accessed May 30, 2021, <http://web.archive.org/web/20210530160109/https://sos.noaa.gov/datasets/energy-on-a-sphere>.
- ²³¹ Jeff Tsao, Nate Lewis, and George Crabtree, “Solar FAQs” (working draft, US Department of Energy, April 20, 2006), 9–12, <https://web.archive.org/web/20200424084337/https://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf>.
- ²³² BP Statistical Review of World Energy 2022, 8.
- ²³³ Ritchie and Roser, “Renewable Energy—Renewable Energy Generation, World”; Ritchie and Roser, “Renewable Energy—Solar Power Generation”; “World Electricity Generation by Fuel, 1971–2017,” International Energy Agency; *BP Statistical Review of World Energy 2022*, 45, 51; BP, “Statistical Review of World Energy—All Data, 1965–2021”; “Share of Low-Carbon Sources and Coal in World Electricity Generation, 1971–2021,” International Energy Agency.
- ²³⁴ Will de Freitas, “Could the Sahara Turn Africa into a Solar Superpower?,” *World Economic Forum*, January 17, 2020, <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/solar-panels-saharadesert-renewable-energy>.

²³⁵ Para uma visão geral das tecnologias emergentes de armazenamento de energia, consulte “Fact Sheet | Energy Storage (2019),” Environmental and Energy Study Institute, February 22, 2019, <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>.

²³⁶ Andy Colthorpe, “Behind the Numbers: The Rapidly Falling LCOE of Battery Storage,” *Energy Storage News*, May 6, 2020, <https://www.energy-storage.news/behind-the-numbers-the-rapidly-falling-lcoe-of-battery-storage>; “Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022,” US Energy Information Administration, March 2022, https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.

²³⁷ Para mais detalhes sobre o rápido crescimento da capacidade de armazenamento de energia para os serviços públicos dos EUA, consulte “Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends,” US Energy Information Administration, August 16, 2021, <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage>; *Energy Storage Grand Challenge: Energy Storage Market Report*, US Department of Energy technical report DOE/GO-102020-5497 (December 2020), https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Market%20Report%202020_0.pdf.

²³⁸ “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 7.0,” Lazard, 2021, 6, <https://web.archive.org/web/20220729095608/https://www.lazard.com/media/451882/lazardslevelized-cost-of-storage-version-70-vf.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 6.0,” Lazard, 2020, 6, <https://web.archive.org/web/20221006123556/https://www.lazard.com/media/451566/lazardslevelized-cost-of-storage-version-60-vf2.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 5.0,” Lazard, 2019, 4, <https://web.archive.org/web/20221104121921/https://www.lazard.com/media/451087/lazardslevelized-cost-of-storage-version-50-vf.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 4.0,” Lazard, 2018, 11, <https://www.lazard.com/media/sckbar5m/lazards-levelizedcost-of-storage-version-40-vfinal.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 3.0,” Lazard, 2017, 12, <https://www.scribd.com/document/413797533/Lazard-Levelized-Costof-Storage-Version-30>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 2.0,” Lazard, 2016, 11, <https://web.archive.org/web/20221104121905/https://www.lazard.com/media/438042/lazardlevelized-cost-of-storage-v20.pdf>; “Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis—Version 1.0,” Lazard, 2015, 9, <https://web.archive.org/web/20221105052132/https://www.lazard.com/media/2391/lazardslevelized-cost-of-storage-analysis-10.pdf>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers.”

²³⁹ US Energy Information Administration, *Electric Power Annual 2021* (Washington, DC: US Department of Energy, November 2022), 64, <https://web.archive.org/web/20230201194905/http://www.eia.gov/electricity/annual/pdf/epa.pdf>; US Energy Information Administration, *Electric Power Annual 2020* (Washington, DC: US Department of Energy, October 2021), 64, <https://web.archive.org/web/20220301172156/http://www.eia.gov/electricity/annual/pdf/epa.pdf>.

²⁴⁰ “Key Facts from JMP 2015 Report,” World Health Organization, 2015, https://web.archive.org/web/20211209095710/https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/JMP-2015-keyfacts-en-rev.pdf.

²⁴¹ “Key Facts from JMP 2015 Report,” World Health Organization, 2015; *Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020*, 7–8.

²⁴² 2019 é o ano mais recente para o qual existem dados fiáveis disponíveis à data da redação deste texto, provavelmente devido às interrupções da COVID-19 na recolha de métricas de saúde. Veja Institute for Health Metrics and Evaluation, “GBD Results Tool,” Global Health Data Exchange, accessed April 28, 2023, <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>; World Health Organization, “Diarrhoeal Disease,” World Health Organization, May 2, 2017, <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/diarrhoeal-disease>.

²⁴³ Para mais informações sobre estas tecnologias, incluindo um divertido vídeo de Bill Gates e Jimmy Fallon a beberem água extraída de esgotos brutos pelo Janicki Omni Processor, consulte Bill Gates, “Janicki Omniprocessor,” GatesNotes, YouTube video, January 5, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=bVzppWSIFUQ>; “Bill Gates and Jimmy Drink PoopWater,” *The Tonight Show Starring Jimmy Fallon*, YouTube video, January 22, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=FHgsL0dpQ-U>; Stephen Beacham, “How the LifeStraw Is Eradicating an Ancient Disease,” CNET, April 9, 2020, <https://www.cnet.com/news/how-the-lifestraw-is-eradicating-an-ancient-disease>; “Lifestraw Challenge: Drinking Pee,

Backwash & More!,” Vat19, YouTube video, June 2, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=mkUTSGCF3I>; Rebecca Paul, “6 Water-purifying Devices for Clean Drinking Water in the Developing World,” *Inhabitat*, November 8, 2013, <https://inhabitat.com/6-water-purifying-devices-for-clean-drinking-water-in-the-developing-world>.

²⁴⁴ Veja “Roving Blue O-Pen Silver Advanced Portable Water Purification Device,” Roving Blue Inc., YouTube video, November 5, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=XeTp1iKQW28>; Laurel Wilson, “Church Volunteers Install Water Systems in Other Countries,” *Bowling Green Daily News*, December 27, 2014, https://www.bgdailynews.com/news/church-volunteers-install-water-systems-in-other-countries/article_969f45ad-7694-54af-8cb3-155e67ca54ad.html.

²⁴⁵ Aimee M. Gall et al., “Waterborne Viruses: A Barrier to Safe Drinking Water,” *PloS Pathogens* 11, no. 6, article e1004867 (June 25, 2015), <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004867>.

²⁴⁶ “Microfiber Matters,” Minnesota Pollution Control Agency, February 4, 2019, <https://www.pca.state.mn.us/featured/microfiber-matters> [inactive].

²⁴⁷ Para mais informações sobre a tecnologia Slingshot de Dean Kamen, consulte “Slingshot Water Purifier,” Atlas Initiative Group, YouTube video, February 11, 2012, https://www.youtube.com/watch?v=Uk_T9MiZKR8; Tom Foster, “Pure Genius: How Dean Kamen’s Invention Could Bring Clean Water to Millions,” *Popular Science*, June 16, 2014, <https://www.popsci.com/article/science/pure-genius-how-dean-kamens-invention-could-bring-clean-water-millions>.

²⁴⁸ Para um vídeo longo, mas claro e divertido sobre o funcionamento dos motores Stirling e porque oferecem algumas vantagens importantes, consulte “Stirling Engines—The Power of the Future?,” *Lindybeige*, YouTube video, November 28, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=vGIDsFAOWXc>.

²⁴⁹ Para mais detalhes sobre as evidências científicas sobre o nascimento da agricultura, veja Rhitu Chatterjee, “Where Did Agriculture Begin? Oh Boy, It’s Complicated,” *NPR*, July 15, 2016, <https://www.npr.org/sections/thesalt/2016/07/15/485722228/where-did-agriculture-begin-oh-boy-its-complicated>; Ainit Snir et al., “The Origin of Cultivation and Proto-Weeds, Long Before Neolithic Farming,” *PLOS One* 10, no. 7 (July 22, 2015), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131422>.

²⁵⁰ David A. Pietz, Dorothy Zeisler-Vralsted, *Water and Human Societies* (Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021), 55–57.

²⁵¹ National Agricultural Statistics Service, “Corn, Grain—Yield, Measured in Bu / Acre,” *Quick Stats*, US Department of Agriculture, accessed April 28, 2023, <https://quickstats.nass.usda.gov/results/FBDE769A-0982-37DB-BA6D-A312ABDAA2B6>; National Agricultural Statistics Service, “Corn and Soybean Production Down in 2022, USDA Reports Corn Stocks Down, Soybean Stocks Down from Year Earlier Winter Wheat Seedings Up for 2023,” US Department of Agriculture, January 12, 2023, <https://www.nass.usda.gov/Newsroom/archive/2023/01-12-2023.php>.

²⁵² Hannah Ritchie and Max Roser, “Crop Yields,” *Our World in Data*, updated September 2019, <https://ourworldindata.org/crop-yields>; Hannah Ritchie and Max Roser, “Land Use,” *Our World in Data*, September 2019, <https://ourworldindata.org/land-use>; “Food and Agriculture Data,” FAOSTAT.

²⁵³ Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” 119; Organisation for Economic Cooperation and Development, “Employment by Economic Activity: Agriculture: All Persons for the United States (LFEAAGTTUSQ647S),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 20, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/LFEAAGTTUSQ647S>; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 7, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CLF16OV>.

²⁵⁴ Para mais informações sobre a atual indústria agrícola vertical e as suas perspectivas a curto prazo, consulte “Why Vertical Farming Is the Future of Food,” *RealLifeLore2*, YouTube video, May 17, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=IBleQycVanU>; “This Farm of the Future Uses No Soil and 95% Less Water,” *Seeker Stories*, YouTube video, July 5, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=-tvJtUHNmU>; Stuart Oda, “Are Indoor Vertical Farms the Future of Agriculture?,” *TED*, YouTube video, February 7, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=z9jXW9r1xr8>; David Roberts, “This Company Wants to Build a Giant Indoor Farm Next to Every Major City in the World,” *Vox*, April 11, 2018,

<https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/11/8/16611710/vertical-farms>; Selina Wang, “This High-Tech Vertical Farm Promises Whole Foods Quality at Walmart Prices,” Bloomberg, September 6, 2017, <https://www.bloomberg.com/news/features/2017-09-06/thishigh-tech-vertical-farm-promises-whole-foods-quality-at-walmart-prices>.

²⁵⁵ Para mais explicações breves sobre as tecnologias de agricultura vertical, consulte Kyree Leary, “Crops Are Harvested Without Human Input, Teasing the Future of Agriculture,” Futurism, February 26, 2018, <https://futurism.com/automated-agriculture-uk>; “Growing Up: How Vertical Farming Works,” B1M, YouTube video, March 6, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=QT4TWbPLrN8>.

²⁵⁶ William Park, “How Far Can Vertical Farming Go?,” BBC, January 11, 2023, <https://www.bbc.com/future/article/20230106-what-if-all-our-food-was-grown-in-indoorvertical-farms>; Ian Frazier, “The Vertical Farm,” New Yorker, January 1, 2017, <https://www.newyorker.com/magazine/2017/01/09/the-vertical-farm>.

²⁵⁷ Para mais informações sobre operações agrícolas verticais com eficiência hídrica, como Gotham Greens e AeroFarms, consulte Brian Heater, “Gotham Greens Just Raised \$310M to Expand Its Greenhouses Nationwide,” *TechCrunch*, September 12, 2022, <https://techcrunch.com/2022/09/12/gothamgreens-just-raised-310m-to-expand-its-greenhouses-nationwide>; “Our Farms,” Gotham Greens, accessed March 31, 2023, <https://www.gothamgreens.com/our-farms>; “This Future Farm Uses No Soil and 95% Less Water,” FutureWise, YouTube video, June 26, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=SHkwXRMLcmE>.

²⁵⁸ Laura Reiley, “Indoor Farming Looks Like It Could Be the Answer to Feeding a Hot and Hungry Planet. It’s Not That Easy,” Washington Post, November 19, 2019, <https://www.washingtonpost.com/business/2019/11/19/indoor-farming-is-one-decades-hottesttrends-regulations-make-success-elusive>.

²⁵⁹ Ritchie, “Half of the World’s Habitable Land Is Used for Agriculture”; Ellis et al., “Anthropogenic Transformation of the Biomes”; “Food and Agriculture Data,” FAOSTAT

²⁶⁰ Para uma análise mais aprofundada da história inicial da impressão 3D, consulte Drew Turney, “History of 3D Printing: It’s Older Than You Think,” Design and Make with Autodesk, August 31, 2021, <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing>; Leo Gregurić, “History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?,” All3DP, December 10, 2018, <https://web.archive.org/web/20211227053912/https://all3dp.com/2/history-of-3d-printingwhen-was-3d-printing-invented/>.

²⁶¹ Para mais informações sobre o processo de impressão 3D propriamente dito, consulte “How Does 3D Printing Work? | The Deets,” Digital Trends, YouTube video, September 22, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=dGajFRaS834>; Rebecca Matulka and Matty Green, “How 3D Printers Work,” Department of Energy, June 19, 2014, <https://www.energy.gov/articles/how-3d-printers-work>.

²⁶² Para uma ampla amostra de opiniões de especialistas em impressão 3D sobre as tendências para a indústria e fotos que mostram a melhoria da resolução nos tamanhos das características fabricadas, consulte Michael Petch, “80 Additive Manufacturing Experts Predict the 3D Printing Trends to Watch in 2020,” 3DPrintingIndustry.com, January 15, 2020, <https://3dprintingindustry.com/news/80-additivemanufacturing-experts-predict-the-3d-printing-trends-to-watch-in-2020-167177>; Leo Gregurić, “The Smallest 3D Printed Things,” All3DP, January 30, 2019, <https://all3dp.com/2/thesmallest-3d-printed-things>.

²⁶³ “How It Works,” FitMyFoot, accessed June 29, 2022, <https://web.archive.org/web/20220629040739/https://fitmyfoot.com/pages/how-it-works>.

²⁶⁴ Para uma amostra da impressão 3D que está a ser utilizada para personalizar objetos aos corpos das pessoas, veja “IKEA Partnering with eSports Academy to Scan Bodies and 3D-Print Chairs,” NowThis, September 15, 2018, <https://nowthisnews.com/videos/future/ikea-and-esports-academy-are-making-3dprinted-chairs> [inactive]; Bianca Britton, “The 3D-Printed Wheelchair: A Revolution in Comfort?,” CNN, January 24, 2017, <https://money.cnn.com/2017/01/24/technology/3d-printedwheelchair-benjamin-hubert-layer/index.html>; Clare Scott,

“Knife Maker Points to 3D Printing as Alternative Method of Craftsmanship,” 3DPrint.com, October 16, 2018, <https://3dprint.com/227502/knife-maker-uses-3d-printing>.

²⁶⁵ Para mais informações sobre as aplicações de impressão 3D em implantes médicos, consulte “3D Printed Implants Could Help Patients with Bone Cancer,” Insider, YouTube video, November 7, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=jcp-aaa1PBk>; “3D Printed Lattices Improve Orthopaedic Implants,” Renishaw, YouTube video, November 28, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=2rm_3rUl3QE; AMFG, “Application Spotlight: 3D Printing for Medical Implants,” Autonomous Manufacturing Ltd., August 15, 2019, <https://amfg.ai/2019/08/15/applicationspotlight-3d-printing-for-medical-implants>.

²⁶⁶ The Carbon Footprint of Global Trade: Tackling Emissions from International Freight Transport (Brussels: International Transport Forum, 2016), 2, <https://www.itfoecd.org/sites/default/files/docs/cop-pdf-06.pdf>.

²⁶⁷ Dean Takahashi, “Dyndrite Launches GPU-Powered Improvements for Better 3D Printing Speed and Quality,” VentureBeat, November 18, 2019, <https://venturebeat.com/2019/11/18/dyndrite-launches-gpu-powered-improvements-for-better-3d-printing-speed-and-quality>; Agiimaa Kruchkin, “Innovation in Creation: Demand Rises While Prices Drop for 3D Printing Machines,” *Manufacturing Tomorrow*, February 16, 2016, <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2016/02/innovation-in-creation-demand-riseswhile-prices-drop-for-3d-printing-machines/7631>.

²⁶⁸ “Profiles of 15 of the World’s Major Plant and Animal Fibres,” Food and Agriculture Organization of the United Nations, accessed April 28, 2023, <http://www.fao.org/natural-fibres-2009/about/15-natural-fibres/en>.

²⁶⁹ Veja “Cytosurge FluidFM µ3Dprinter, World’s First 3D Printer at Sub-Micron Direct Metal Printing,” Charbox, YouTube video, May 21, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=n9oO6EiBt40>; Sam Davies, “Nanofabrica Announces Commercial Launch of Micro-Level Resolution Additive Manufacturing Technology,” *TCT Magazine*, March 14, 2019, <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/nanofabrica-microlevel-resolution-additive-manufacturing>.

²⁷⁰ Para mais informações sobre tecidos impressos em 3D, consulte Zachary Hay, “3D Printed Fabric: The Most Promising Projects,” All3DP, November 7, 2019, <https://all3dp.com/2/3d-printed-fabric-most-promisingproject>; Roni Jacobson, “The Shattering Truth of 3D-Printed Clothing,” *Wired*, May 12, 2017, <https://www.wired.com/2017/05/the-shattering-truth-of-3d-printed-clothing>.

²⁷¹ Danny Paez, “An Incredible New 3D Printer Is 100X Faster Than What Was Possible: Video,” *Inverse*, January 26, 2019, <https://www.inverse.com/article/52721-high-speed-3d-printingmass-production>; Mark Zastrow, “3D Printing Gets Bigger, Faster and Stronger,” *Nature* 578, no. 7793 (February 5, 2020), <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00271-6>; “Prediction 5: 3D Printing Reaches the ‘Plateau of Productivity,’” Deloitte, 2019, <https://www.deloitte.co.uk/tmtpredictions/predictions/3d-printing>.

²⁷² Para mais informações sobre o processo de impressão 3D para a geração de órgãos, consulte Amanda Deisler, “This 3D Bioprinted Organ Just Took Its First ‘Breath,’” *Seeker*, YouTube video, May 3, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=V0rIP_u1JPQ; NIH Research Matters, “3D-Printed Scaffold Engineered to Grow Complex Tissues,” National Institutes of Health, April 7, 2020, <https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/3d-printed-scaffold-engineered-growcomplex-tissues>; Luis Diaz-Gomez et al., “Fiber Engraving for Bioink Bioprinting Within 3D Printed Tissue Engineering Scaffolds,” *Bioprinting* 18, article e00076 (June 2020), <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00076>; Luke Dormehl, “Ceramic Ink Could Let Doctors 3D Print Bones Directly into a Patient’s Body,” *Digital Trends*, January 30, 2021, <https://www.digitaltrends.com/news/ceramic-ink-3d-printed-bones>.

²⁷³ Para mais informações sobre o trabalho da United Therapeutics, incluindo uma entrevista esclarecedora com a sua CEO, a minha amiga Martine Rothblatt, veja CNBC Squawk Box, “Watch CNBC’s Full Interview with United Therapeutics CEO Martine Rothblatt,” CNBC, June 25, 2019, <https://www.cnbc.com/video/2019/06/25/watch-cnbc-s-full-interview-with-united-therapeuticsceo-martine-rothblatt.html>; Antonio Regalado, “Inside the Effort to Print Lungs and Breathe Life into Them with Stem Cells,” *MIT Technology Review*, June 28, 2018, <https://www.technologyreview.com/2018/06/28/240446/inside-the-effort-to-print-lungs-andbreathe-life-into-them-with-stem-cells>.

²⁷⁴ Para mais explicações sobre o motivo pelo qual os órgãos transplantados falham frequentemente, consulte “Why Do Organ Transplants Fail So Often,” Julia Wilde, YouTube video, July 12, 2015, https://www.youtube.com/watch?v=LQ0K02m6_KM; Amy Shira Teitel, “Your Body Is Designed to Attack a New Organ, Now We Know Why,” Seeker, YouTube video, July 22, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=yfDL9PWubCs>; “Lowering Rejection Risk in Organ Transplants,” Mayo Clinic, YouTube video, March 18, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=bUz3X9ZYd5s>.

²⁷⁵ Elizabeth Ferrill and Robert Yoches, “IP Law and 3D Printing: Designers Can Work Around Lack of Cover,” Wired, September 2013, <https://www.wired.com/insights/2013/09/ip-law-and-3d-printing-designers-can-work-around-lack-of-cover>; Michael K. Henry, “How 3D Printing Challenges Existing Intellectual Property Law,” Henry Patent Law Firm, August 13, 2018, <https://henry.law/blog/3d-printing-challenges-patent-law>.

²⁷⁶ Jake Hanrahan, “3D-Printed Guns Are Back, and This Time They Are Unstoppable,” Wired, May 20, 2019, <https://www.wired.co.uk/article/3d-printed-guns-blueprints>.

²⁷⁷ Para mais informações sobre como isto funciona, consulte Innovative Manufacturing and Construction Research Centre, “Future of Construction Process: 3D Concrete Printing,” Concrete Printing, YouTube video, May 30, 2010, <https://www.youtube.com/watch?v=EfbhdZKPHro>; Nathalie Labonnote et al., “Additive Construction: State-of-the-Art, Challenges and Opportunities,” *Automation in Construction* 72, no. 3 (December 2016): 347–66, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.

²⁷⁸ Para uma visão geral útil dos avanços recentes nesta área, consulte Sriram Renganathan, “3D Printed House/Construction Materials: What Are They?,” All3DP, April 23, 2019, <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-construction-what-are-3d-printed-houses-made-of>.

²⁷⁹ Melissa Goldin, “Chinese Company Builds Houses Quickly with 3D Printing,” Mashable, April 28, 2014, <https://mashable.com/archive/3d-printing-houses-china>.

²⁸⁰ Para um vídeo impressionante em time-lapse da construção da estrutura de um edifício inteiro através de impressão 3D, consulte “The Biggest 3D Printed Building,” Apis Cor, YouTube video, October 24, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=69HrqNnrfh4>.

²⁸¹ Rick Stella, “It’s Hideous, But This 3D-Printed Villa in China Can Withstand a Major Quake,” *Digital Trends*, July 11, 2016, <https://www.digitaltrends.com/home/3d-printed-chinese-villashuashang-tenda>.

²⁸² Emma Bowman, “3D-Printed Homes Level Up with a 2-Story House in Houston,” NPR, January 16, 2023, <https://www.npr.org/2023/01/16/1148943607/3d-printed-homes-level-up-with-a-2-story-house-in-houston>; “Habitat for Humanity Home Completed,” Alquist, accessed December 6, 2022, <https://web.archive.org/web/20221206002108/https://www.alquist3d.com/habitat>; “How Concrete Homes Are Built with a 3D Printer,” Insider Art, YouTube video, June 28, 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=vL2KoMNzGT0>.

²⁸³ Wetterstrand, “The Cost of Sequencing a Human Genome”; Kris A. Wetterstrand, “DNA Sequencing Costs: Data,” National Human Genome Research Institute, November 19, 2021, <https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/DNA-Sequencing-Costs-Data>; National Research Council Committee on Mapping and Sequencing the Human Genome, *Mapping and Sequencing the Human Genome*, chap. 5 (Washington, DC: National Academies Press, 1988), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218256>; E. Y. Chan (Applied Biosystems), email to author, October 7, 2008.

²⁸⁴ Para um mergulho mais profundo na imunoterapia do cancro, consulte “How Does Cancer Immunotherapy Work?,” MD Anderson Cancer Center, YouTube video, April 20, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=CwaMZCu4kpl>; “Tumour Immunology and Immunotherapy,” Nature Video, YouTube video, September 17, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=K09xzIQ8zsg>; Alex D. Waldman, Jill M. Fritz, and Michael J. Lenardo, “A Guide to Cancer Immunotherapy: From T Cell Basic Science to Clinical Practice,” *Nature Reviews Immunology* 20 (2020): 651–68, <https://doi.org/10.1038/s41577-020-0306-5>.

²⁸⁵ Para mais explicações sobre a terapia com células CAR-T e a sua empolgante promessa para o tratamento do cancro, consulte “CAR T-Cell Therapy: How Does It Work?,” Dana-Farber Cancer Institute, YouTube video, August 31, 2017,

<https://www.youtube.com/watch?v=OadAW99s4Ik>; Carl June, “A ‘Living Drug’ That Could Change the Way We Treat Cancer,” TED, YouTube video, October 2, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=7qWvVcBZzRg>.

²⁸⁶ Para uma amostra representativa de investigação recente sobre terapias iPS, consulte Krista Conger, “Old Human Cells Rejuvenated with Stem Cell Technology,” Stanford Medicine, March 24, 2020, <https://med.stanford.edu/news/all-news/2020/03/old-human-cells-rejuvenated-with-stem-celltechnology.html>; Qiliang Zhou et al., “Trachea Engineering Using a Centrifugation Method and Mouse-Induced Pluripotent Stem Cells,” *Tissue Engineering Part C: Methods* 24, no. 9 (September 14, 2018): 524–33, <https://doi.org/10.1089/ten.TEC.2018.0115>; Kazuko Kikuchi et al., “Craniofacial Bone Regeneration Using iPS Cell-Derived Neural Crest Like Cells,” *Journal of Hard Tissue Biology* 27, no. 1 (January 1, 2018): 1–10, <https://doi.org/10.2485/jhtb.27.1>; “The World’s First Allogeneic iPS-Derived Retina Cell Transplant,” Japan Agency for Medical Research and Development, September 20, 2018, <https://www.amed.go.jp/en/seika/fy2018-05.html>; Hiroo Kimura et al., “Stem Cells Purified from Human Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Neural Crest-Like Cells Promote Peripheral Nerve Regeneration,” *Scientific Reports* 8, no. 1, article 10071 (July 3, 2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27952-7>; Suman Kanji and Hiranmoy Das, “Advances of Stem Cell Therapeutics in Cutaneous Wound Healing and Regeneration,” *Mediators of Inflammation*, article 5217967 (October 29, 2017), <https://doi.org/10.1155/2017/5217967>; David Cyranoski, “‘Reprogrammed’ Stem Cells Approved to Mend Human Hearts for the First Time,” *Nature* 557, no. 7707 (May 29, 2018): 619–20, <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05278-8>; Yue Yu et al., “Application of Induced Pluripotent Stem Cells in Liver Diseases,” *Cell Medicine* 7, no. 1 (April 22, 2014): 1–13, <https://doi.org/10.3727/215517914X680056>; Susumu Tajiri et al., “Regenerative Potential of Induced Pluripotent Stem Cells Derived from Patients Undergoing Haemodialysis in Kidney Regeneration,” *Scientific Reports* 8, no. 1, article 14919 (October 8, 2018), <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33256-7>; Sharon Begley, “Cancer-Causing DNA Is Found in Some Sem Cells Being Used in Patients,” STAT News, April 26, 2017, <https://www.statnews.com/2017/04/26/stem-cells-cancer-mutations>.

²⁸⁷ Para mais detalhes sobre outros fatores que influenciaram a evolução do sistema imunitário humano, consulte Jorge Domínguez-Andrés and Mihai G. Netea, “Impact of Historic Migrations and Evolutionary Processes on Human Immunity,” *Trends in Immunology* 40, no. 12 (November 27, 2019): P1105–P1119, <https://doi.org/10.1016/j.it.2019.10.001>.

²⁸⁸ Para uma explicação clara de como funciona a diabetes tipo 1 no organismo, consulte “Type 1 Diabetes | Nucleus Health,” Nucleus Medical Media, YouTube video, January 10, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=jxbBbmbvu7I>.

²⁸⁹ Para uma explicação não técnica sobre esta investigação e ligações para estudos importantes, consulte Todd B. Kashdan, “Why Do People Kill Themselves? New Warning Signs,” *Psychology Today*, May 15, 2014, <https://www.psychologytoday.com/us/blog/curious/201405/why-do-people-kill-themselvesnew-warning-signs>.

CAPÍTULO 5

¹ Para mais informações sobre esta rápida evolução, consulte Alex Davies, “An Oral History of the DARPA Grand Challenge, the Grueling Robot Race That Launched the Self-Driving Car,” *Wired*, August 3, 2017, <https://www.wired.com/story/darpa-grand-challenge-2004-oral-history>; Joshua Davies, “Say Hello to Stanley,” *Wired*, January 1, 2006, <https://www.wired.com/2006/01/stanley>; Ronan Glon and Stephen Edelstein, “The History of Self-Driving Cars,” *Digitaltrends*, July 31, 2020, <https://www.digitaltrends.com/cars/history-of-self-driving-cars-milestones>.

² Kristen Korosec, “Waymo’s Driverless Taxi Service Can Now Be Accessed on Google Maps,” *TechCrunch*, June 3, 2021, <https://techcrunch.com/2021/06/03/waymos-driverless-taxi-servicecan-now-be-accessed-on-google-maps>; Rebecca Bellan, “Waymo Launches Robotaxi Service in San Francisco,” *TechCrunch*, August 24, 2021, <https://techcrunch.com/2021/08/24/waymolaunches-robotaxi-service-in-san-francisco>; Jonathan M. Gitlin, “Self-Driving Waymo Trucks to Haul Loads Between Houston and Fort Worth,” *Ars Technica*, June 10, 2021, <https://arstechnica.com/cars/2021/06/self-driving-waymo-trucks-to-haul-loads-betweenhouston-and-fort-worth>; Dug Begley, “More Computer-Controlled Trucks Coming to Test-Drive I-45 Between Dallas and Houston,” *Houston Chronicle*, August 25, 2022, <https://www.houstonchronicle.com/news/houston-texas/transportation/article/More-computercontrolled-trucks-coming-to-17398269.php>.

³ “Next Stop for Waymo One: Los Angeles,” Waymo, October 19, 2022, <https://blog.waymo.com/2022/10/next-stop-for-waymo-one-los-angeles.html>.

⁴ Aaron Pressman, “Google’s Waymo Reaches 20 Million Miles of Autonomous Driving,” *Fortune*, January 7, 2020, <https://fortune.com/2020/01/07/googles-waymo-reaches-20-millionmiles-of-autonomous-driving>.

⁵ Will Knight, “Waymo’s Cars Drive 10 Million Miles a Day in a Perilous Virtual World,” *MIT Technology Review*, October 10, 2018, <https://www.technologyreview.com/s/612251/waymoscars-drive-10-million-miles-a-day-in-a-perilous-virtual-world>; Alexis C. Madrigal, “Inside Waymo’s Secret World for Training Self-Driving Cars,” *Atlantic*, August 23, 2017, <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2017/08/inside-waymos-secret-testing-and-simulation-facilities/537648>; John Krafcik, “Waymo Livestream Unveil: The Next Step in Self-Driving,” Waymo, YouTube video, March 27, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=-EBcplvPWnY>; Mario Herger, “2020 Disengagement Reports from California,” *The Last Driver License Holder*, February 9, 2021, <https://thelastdriverlicenseholder.com/2021/02/09/2020-disengagement-reports-from-california>; “Off Road, but Not Offline: How Simulation Helps Advance Our Waymo Driver,” Waymo, April 28, 2020, <https://waymo.com/blog/2020/04/offroad-but-not-offline--simulation27>; Kris Holt, “Waymo’s Autonomous Vehicles Have Clocked 20 Million Miles on Public Roads,” *Engadget*, August 19, 2021, <https://www.engadget.com/waymo-autonomous-vehicles-update-san-francisco-193934150.html>.

⁶ Tecnicamente, as redes neuronais “profundas” podem ter apenas três camadas, mas os avanços no poder de computação na última década tornaram as redes muito mais profundas práticas. Um elemento-chave do AlphaGo foi uma rede neural de treze camadas, que foi utilizada em 2015-16 para superar os melhores jogadores humanos de Go. Para que esta rede fosse útil, necessitava de grandes quantidades de dados, pelo que os investigadores treinaram-na simulando até 1.000 jogos por segundo por unidade de processamento do computador. Em 2017, o AlphaGo Zero simulou cerca de 29 milhões de jogos com uma rede de 79 camadas e venceu os jogos originais do AlphaGo 100 para 0. Alguns projetos de IA utilizam agora redes neuronais com mais de 100 camadas. Mais camadas não significam necessariamente mais inteligência, mas é útil pensar nas camadas como algo que acrescenta subtilidade e abstração. Se um assunto for suficientemente complexo e tiver dados suficientes, uma rede com mais camadas pode muitas vezes descobrir padrões ocultos que uma rede mais superficial não perceberia. Esta é uma ideia muito importante na IA de uma forma mais ampla e uma razão central pela qual tantos campos, como a assistência médica e a ciência dos materiais, estão a começar a transformar-se em tecnologias de informação. Ou seja, à medida que a computação se torna mais barata, torna-se prático utilizar redes neuronais mais profundas. À medida que a recolha e o armazenamento de dados se tornam mais baratos, torna-se prático alimentar estas redes profundas com dados suficientes para aproveitar o seu potencial em mais áreas. E à medida que a aprendizagem profunda é aplicada de forma mais ampla, estes campos beneficiam do aumento exponencial da inteligência. Veja “AlphaGo,” Google DeepMind, accessed January 30, 2023, <https://deepmind.com/research/case-studies/alphago-the-story-so-far>; “AlphaGo Zero: Starting from Scratch,” Google DeepMind, October 18, 2017, <https://deepmind.com/blog/article/alphago-zero-starting-scratch>; Tom Simonite, “This More Powerful Version of AlphaGo Learns On Its Own,” *Wired*, October 18, 2017, <https://www.wired.com/story/this-more-powerful-version-of-alphago-learns-on-its-own>; David Silver et al., “Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search,” *Nature* 529, no. 7587 (January 27, 2016): 484–89, <https://doi.org/10.1038/nature16961>; Christof Koch, “How the Computer Beat the Go Master,” *Scientific American*, March 19, 2016, <https://www.scientificamerican.com/article/how-the-computer-beat-the-go-master>; Josh Patterson and Adam Gibson, *Deep Learning: A Practitioner’s Approach* (Sebastopol, CA: O’Reilly, 2017), 6–8, <https://books.google.com/books?id=qrcuDWAAQBAJ>; Thomas Anthony, Zheng Tian, and David Barber, “Thinking Fast and Slow with Deep Learning and Tree Search,” 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), revised December 3, 2017, <https://arxiv.org/pdf/1705.08439.pdf>; Kaiming He et al., “Deep Residual Learning for Image Recognition,” 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, December 10, 2015, <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf>.

⁷ Holt, “Waymo’s Autonomous Vehicles Have Clocked 20 Million Miles on Public Roads.”

⁸ Em 2021, a força de trabalho empregada nos EUA era de cerca de 155 milhões de pessoas. Destes, estima-se que 3,49 milhões eram motoristas de pesados de todos os tipos, e outros 832.600 eram motoristas de veículos de passageiros — cerca de 2,7%. Veja US Bureau of Labor Statistics, “Employment Status of the Civilian Population by Sex and Age,” US Department of Labor, accessed April 7, 2023, <https://www.bls.gov/news.release/empsit.t01.htm>; Jennifer Cheeseman Day and Andrew W. Hait, “America Keeps On Truckin’: Number of Truckers at All-Time High,” US Census Bureau, June 6, 2019, <https://www.census.gov/library/stories/2019/06/america-keeps-ontrucking.html>; US Bureau of Labor Statistics, US Department of Labor, “30 Percent of Civilian Jobs Require Some Driving in 2016,” *The Economics Daily*, June 27, 2017, <https://www.bls.gov/opub/ted/2017/30-percent-of-civilian-jobs-require-some-driving-in-2016.htm>.

-
- ⁹ “Economics and Industry Data,” American Trucking Associations, accessed April 20, 2023, <https://www.trucking.org/economics-and-industry-data>; US Bureau of Labor Statistics, “Occupational Outlook Handbook, Passenger Vehicle Drivers—Summary,” US Department of Labor, accessed January 30, 2023, <https://www.bls.gov/ooh/transportation-and-materialmoving/passenger-vehicle-drivers.htm>.
- ¹⁰ Mark Fahey, “Driverless Cars Will Kill the Most Jobs in Select US States,” CNBC, September 2, 2016, <https://www.cnbc.com/2016/09/02/driverless-cars-will-kill-the-most-jobs-in-select-usstates.html>.
- ¹¹ Fahey, “Driverless Cars Will Kill the Most Jobs in Select US States.”
- ¹² Cheeseman Day and Hait, “America Keeps on Truckin’.”
- ¹³ Bureau of Transportation Statistics, *Transportation Economic Trends*, US Department of Transportation, accessed April 20, 2023, <https://data.bts.gov/stories/s/caxh-t8jd>.
- ¹⁴ Carl Benedikt Frey and Michael A. Osborne. “The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?” (Oxford Martin School, September 17, 2013), 2, 36–38, https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf.
- ¹⁵ Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”, 57–72.
- ¹⁶ Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”, 57–72.
- ¹⁷ Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”, 57–72.
- ¹⁸ Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”, 57–72.
- ¹⁹ Ljubica Nedelkoska and Glenda Quintini, “Automation, Skills Use and Training,” OECD Social, Employment and Migration Working Papers no. 202 (March 8, 2018), 7–8, <https://doi.org/10.1787/2e2f4eea-en>.
- ²⁰ Nedelkoska and Quintini, “Automation, Skills Use and Training,” 7–8.
- ²¹ “A New Study Finds Nearly Half of Jobs Are Vulnerable to Automation,” Economist, April 24, 2018, <https://www.economist.com/graphic-detail/2018/04/24/a-study-finds-nearly-half-of-jobsare-vulnerable-to-automation>; Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”
- ²² Alexandre Georgieff and Anna Milanez, “What Happened to Jobs at High Risk of Automation?”, OECD Social, Employment and Migration Working Papers no. 255 (OECD Publishing, May 21, 2021), <https://doi.org/10.1787/10bc97f4-en>.
- ²³ McKinsey & Company, “The Economic Potential of Generative AI: The Next Productivity Frontier,” McKinsey & Company, June 2023: 37–41, <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-economic-potential-of-generative-ai-the-next-productivity-frontier#introduction>.
- ²⁴ Richard Conniff, “What the Luddites Really Fought Against,” *Smithsonian*, March 2011, <https://www.smithsonianmag.com/history/what-the-luddites-really-fought-against-264412>.
- ²⁵ “Hidden Histories: Luddites—A Short History of One of the First Labor Movements,” WRIR.org, May 23, 2010, <https://www.wrir.org/2010/05/23/hidden-histories-luddites-a-shorthistory-of-one-of-the-first-labor-movemen>; Conniff, “What the Luddites Really Fought Against”; Bill Kovarik, *Revolutions in Communication: Media History from Gutenberg to the Digital Age* (New York: Bloomsbury, 2015), 8, <https://books.google.com/books?id=F6ugBQAAQBAJ>; Jessica Brain, “The Luddites,” Historic UK, accessed April 20, 2023, <https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/The-Luddites>.
- ²⁶ Conniff, “What the Luddites Really Fought Against”; Brain, “The Luddites.”
- ²⁷ Brain, “The Luddites”; Kevin Binfield, ed., *Writings of the Luddites* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004); Frank Peel, *The Risings of the Luddites* (Heckmondwike, UK: T. W. Senior, 1880).

²⁸ Stanley Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," in *Output, Employment, and Productivity in the United States After 1800*, ed. Dorothy S. Brady (Washington, DC: National Bureau of Economic Research, 1966), 119, <https://www.nber.org/chapters/c1567.pdf>; US Bureau of Labor Statistics, "All Employees, Manufacturing (MANEMP)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 7, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/MANEMP>; Organisation for Economic Co-operation and Development, "Employment by Economic Activity: Agriculture: All Persons for the United States (LFEAAGTTUSQ647S)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 20, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/LFEAAGTTUSQ647S>; US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 7, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CLF16OV>.

²⁹ Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 118; US Census Bureau, "Historical National Population Estimates July 1, 1900 to July 1, 1999," Population Estimates Program, Population Division, US Census Bureau, revised June 28, 2000, <https://www2.census.gov/programs-surveys/popest/tables/1900-1980/national/totals/popclockest.txt>.

³⁰ US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Bureau of Economic Analysis, "Population (B230RCOA052NBEA)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated January 26, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/B230RCOA052NBEA>.

³¹ Michael Huberman and Chris Minns, "The Times They Are Not Changin': Days and Hours of Work in Old and New Worlds, 1870–2000," *Explorations in Economic History* 44, no. 4 (July 12, 2007): 548, https://personal.lse.ac.uk/minns/Huberman_Minns_EEH_2007.pdf; University of Groningen and University of California, Davis, "Average Annual Hours Worked by Persons Engaged for United States (AVHWPEUSA065NRUG)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated January 21, 2021, <https://fred.stlouisfed.org/series/AVHWPEUSA065NRUG>; Robert C. Feenstra, Robert Inklaar, and Marcel P. Timmer, "The Next Generation of the Penn World Table," *American Economic Review* 105, no. 10 (2015): 3150–82, https://www.rug.nl/ggdc/docs/the_next_generation_of_the_penn_world_table.pdf.

³² US Bureau of Labor Statistics, "Personal Income Per Capita (A792RCOA052NBEA)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 30, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/A792RCOA052NBEA>; "CPI Inflation Calculator," US Bureau of Labor Statistics, accessed April 20, 2023, <https://data.bls.gov/cgi-bin/cpicalc.pl>; US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Bureau of Labor Statistics, "Real Median Personal Income in the United States (MEPAINUSA672N)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated September 13, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/MEPAINUSA672N>.

³³ Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 118; US Bureau of Economic Analysis, "Population (B230RCOA052NBEA)."

³⁴ US Bureau of Labor Statistics, "Personal Income Per Capita (A792RCOA052NBEA)"; US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Bureau of Economic Analysis, "Population (B230RCOA052NBEA)."

³⁵ US Bureau of Labor Statistics, "Real Median Personal Income in the United States (MEPAINUSA672N)."

³⁶ Huberman and Minns, "The Times They Are Not Changin'," 548.

³⁷ US Bureau of Labor Statistics, "Total Wages and Salaries, BLS (BA06RC1A027NBEA)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated October 12, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/BA06RC1A027NBEA>; US Bureau of Labor Statistics, "Hours Worked by Full-Time and Part-Time Employees (B4701COA222NBEA)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated October 12, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/B4701COA222NBEA>.

³⁸ US Bureau of Labor Statistics, "Personal Income (PI)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 31, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/PI>.

³⁹ Veja, por exemplo, Microeconomix, *The App Economy in the United States* (London: Deloitte, August 17, 2018), 4, <https://actonline.org/wp-content/uploads/Deloitte-The-App-Economy-in-US.pdf>.

⁴⁰ Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 119.

⁴¹ F. M. L. Thompson, "The Second Agricultural Revolution, 1815–1880," *Economic History Review* 21, no. 1 (April 1968): 62–77, <https://www.jstor.org/stable/2592204>; Norman E. Borlaug, "Contributions of Conventional Plant Breeding to Food Production," *Science* 219, no. 4585 (February 11, 1983): 689–93, <https://science.sciencemag.org/content/sci/219/4585/689.full.pdf>.

⁴² Para aprofundar a forma como a industrialização transformou a agricultura, veja "Causes of the Industrial Revolution: The Agricultural Revolution," ClickView, YouTube video, August 10, 2015, https://www.youtube.com/watch?v=6QKIts2_yJ0; John Green, "Coal, Steam, and the Industrial Revolution: Crash Course World History #32," CrashCourse, YouTube video, August 30, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=zhL5DCizj5c>; John Green, "The Industrial Economy: Crash Course US History #23," CrashCourse, YouTube video, July 25, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=r6tRp-zRUJs>; "Mechanization on the Farm in the Early 20th Century," Iowa PBS, YouTube video, April 28, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=SI9K8ZJqAwE>; "Cyrus McCormick," PBS, accessed April 20, 2023, https://www.pbs.org/wgbh/theymadeamerica/whomade/mccormick_hi.html; Mark Overton, *Agricultural Revolution in England: The Transformation of the Agrarian Economy 1500–1850* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996).

⁴³ Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 119.

⁴⁴ Hannah Ritchie and Max Roser, "Crop Yields," Our World in Data, updated 2022, <https://ourworldindata.org/crop-yields>; Sarah E. Cusick and Michael K. Georgieff, "The Role of Nutrition in Brain Development: The Golden Opportunity of the 'First 1000 Days'", *Journal of Pediatrics* 175 (August 2016): 16–21, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4981537>; Gary M. Walton and Hugh Rockoff, *History of the American Economy*, 11th ed. (Boston: Cengage Learning, 2009), 1–15.

⁴⁵ "Provisional Cereal and Oilseed Production Estimates for England 2022," Department for Environment Food & Rural Affairs (UK), December 21, 2022, <https://www.gov.uk/government/statistics/cereal-and-oilseed-rape-production/provisionalcereal-and-oilseed-production-estimates-for-england-2022>.

⁴⁶ "UK Population Estimates 1851 to 2014," Office for National Statistics (UK), July 6, 2015, <https://www.ons.gov.uk/peoplepopulationandcommunity/populationandmigration/populationestimates/adhocs/004356ukpopulationestimates1851to2014>; Central Intelligence Agency, "Explore All Countries—United Kingdom," CIA World Factbook, November 29, 2022, <https://web.archive.org/web/20221207065501/https://www.cia.gov/the-worldfactbook/countries/united-kingdom>.

⁴⁷ Organisation for Economic Co-operation and Development, "Employment by Economic Activity: Agriculture"; US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; International Labour Organization, "Employment in Agriculture (% of Total Employment) (Modeled ILO Estimate)," Worldbank.org, January 29, 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/SL.AGR.EMPL.ZS?locations=US>.

⁴⁸ Para algumas explicações interessantes sobre as tecnologias agrícolas automatizadas, consulte Kyree Leary, "Crops Are Harvested Without Human Input, Teasing the Future of Agriculture," *Futurism*, February 26, 2018, <https://futurism.com/automated-agriculture-uk>; "Growing Up: How Vertical Farming Works," B1M, YouTube video, March 6, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=QT4TWbPLrN8>; "The Future of Farming," The Daily Conversation, YouTube video, May 17, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=Qmla9NLFBvU>; Michael Larkin, "Labor Terminators: Farming Robots Are About To Take Over Our Farms," Investor's Business Daily, August 10, 2018, <https://www.investors.com/news/farming-robot-agriculture-technology>.

⁴⁹ Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 119.

⁵⁰ Benjamin T. Arrington, "Industry and Economy During the Civil War," National Park Service, August 23, 2017, <https://www.nps.gov/articles/industry-and-economy-during-the-civil-war.htm>; Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 119.

⁵¹ Para uma explicação animada sobre o desenvolvimento da linha de montagem e o seu papel na Segunda Revolução Industrial, veja John Green, "Ford, Cars, and a New Revolution: Crash Course History of Science #28," CrashCourse, YouTube video, November 12, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=UPvwpYeQJnI>.

⁵² Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” 119.

⁵³ Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” 119; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV)”; US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Manufacturing Sector: Real Output (OUTMS),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 2, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/OUTMS>.

⁵⁴ Para explicações envolventes sobre a contentorização e o seu impacto, consulte *Wall Street Journal*, “How a Steel Box Changed the World: A Brief History of Shipping,” YouTube video, January 24, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=0MUkgDIQdcM>; PolyMatter, “How Container Ships Work,” YouTube video, November 2, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=DY9VE3i-KcM>.

⁵⁵ US Bureau of Labor Statistics, “Manufacturing Sector: Real Output per Hour of All Persons (OPHMFGE),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 2, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/OPHMFGE>.

⁵⁶ US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP).”

⁵⁷ US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Manufacturing Sector: Real Output (OUTMS).”

⁵⁸ US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP).”

⁵⁹ US Bureau of Labor Statistics, “Manufacturing Sector: Real Output (OUTMS).”

⁶⁰ US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Manufacturing Sector: Real Output (OUTMS).”

⁶¹ US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV)”; Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” 119–20.

⁶² US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV).”

⁶³ Note-se que os dados disponíveis não refletem adequadamente os efeitos da Grande Depressão, que provavelmente causou um declínio mais repentino do emprego na indústria do que o apresentado neste gráfico, ou da Segunda Guerra Mundial, que causou um aumento breve, mas drástico, do emprego na indústria que não é captado pelos dados da força de trabalho total do BLS, que não se estendem a tanto tempo. Veja US Bureau of Labor Statistics, “All Employees, Manufacturing (MANEMP)”; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV)”; Lebergott, “Labor Force and Employment, 1800–1960,” 119–20.

⁶⁴ US Bureau of Labor Statistics, “Labor Force Participation Rate (CIVPART),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated September 3, 2021, <https://fred.stlouisfed.org/series/CIVPART>; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV).”

⁶⁵ International Labour Organization, “Labor Force, Female (% of Total Labor Force) — United States,” retrieved from Worldbank.org, September 2019, <https://data.worldbank.org/indicator/SL.TLF.TOTL.FE.ZS?locations=US>; US Bureau of Labor Statistics, “Labor Force Participation Rate (CIVPART)”; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Participation Rate: Women (LNS11300002),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 7, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/LNS11300002>.

⁶⁶ US Bureau of Labor Statistics, “Labor Force Participation Rate (CIVPART).”

⁶⁷ Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics, *America’s Children: Key National Indicators of Well-Being, 2021* (Washington, DC: US Government Printing Office, 2021): 81, https://web.archive.org/web/20220721170310/https://www.childstats.gov/pdf/ac2021/ac_21.pdf.

⁶⁸ Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics, *America's Children*, 81.

⁶⁹ Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics, *America's Children*, 81.

⁷⁰ US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Bureau of Labor Statistics, "Population, Total for United States (POPTOTUSA647NWDB)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated July 5, 2022, <https://fred.stlouisfed.org/series/POPTOTUSA647NWDB>.

⁷¹ US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Bureau of Labor Statistics, "Population, Total for United States (POPTOTUSA647NWDB)"; "U.S. and World Population Clock," US Census Bureau, updated April 20, 2023, <https://www.census.gov/popclock>.

⁷² US Bureau of Labor Statistics, "Civilian Labor Force Level (CLF16OV)"; US Census Bureau, *Statistical Abstract of the United States: 1999*, 879; Lebergott, "Labor Force and Employment, 1800–1960," 118; "U.S. and World Population Clock," US Census Bureau; US Bureau of Labor Statistics, "Population, Total for United States (POPTOTUSA647NWDB)"; US Census Bureau, "Resident Population of the United States," US Census Bureau, accessed April 20, 2023, <https://www2.census.gov/library/visualizations/2000/dec/2000-residentpopulation/unitedstates.pdf>.

⁷³ National Center for Education Statistics, "Enrollment in Elementary, Secondary, and Degree-Granting Postsecondary Institutions, by Level and Control of Institution: Selected Years, 1869–70 Through Fall 2030," US Department of Education, 2021, https://nces.ed.gov/programs/digest/d21/tables/dt21_105.30.asp; Tom Snyder, ed., *120 Years of American Education: A Statistical Portrait* (Washington, DC: National Center for Education Statistics, 1993), 64, <http://web20kmg.pbworks.com/w/file/fetch/66806781/120%20Years%20of%20American%20Education%20A%20Statistical%20Portrait.pdf>.

⁷⁴ National Center for Education Statistics, "Enrollment in Elementary, Secondary, and Degree-Granting Postsecondary Institutions."

⁷⁵ National Center for Education Statistics, "Total and Current Expenditures per Pupil in Public Elementary and Secondary Schools: Selected Years, 1919–20 Through 2018–19," US Department of Education, September 2021, https://nces.ed.gov/programs/digest/d21/tables/dt21_236.55.asp; "Consumer Price Index, 1913–," Federal Reserve Bank of Minneapolis, accessed April 20, 2023, <https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/inflation-calculator/consumer-price-index-1913->; US Bureau of Labor Statistics, "Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 12, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIAUCSL>.

⁷⁶ National Center for Education Statistics, "Total and Current Expenditures per Pupil in Public Elementary and Secondary Schools"; "Consumer Price Index, 1913–," Federal Reserve Bank of Minneapolis; US Bureau of Labor Statistics, "Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average."

⁷⁷ National Center for Education Statistics, *120 Years of American Education: A Statistical Portrait*, 65.

⁷⁸ Para algumas das análises recentes mais influentes sobre o porquê de a maioria das tendências globais estar a ir na direção certa, veja Max Roser, "Most of Us Are Wrong About How the World Has Changed (Especially Those Who Are Pessimistic About the Future)," *Our World in Data*, July 27, 2018, <https://ourworldindata.org/wrong-about-the-world>; "Why Are We Working on Our World in Data?," *Our World in Data*, July 20, 2017, <https://ourworldindata.org/motivation>; Steven Pinker, "Is the World Getting Better or Worse? A Look at the Numbers," TED video, April 2018, https://www.ted.com/talks/steven_pinker_is_the_world_getting_better_or_worse_a_look_at_the_numbers.

⁷⁹ Para mais detalhes sobre as opiniões de Erik Brynjolfsson, veja Erik Brynjolfsson, "The Key to Growth? Race with the Machines," TED, February 2013, https://www.ted.com/talks/erik_brynjolfsson_the_key_to_growth_race_with_the_machines; Erik Brynjolfsson et al., *Mind vs Machine: Implications for Productivity, Wages and Employment from AI*, The Artificial Intelligence Channel, YouTube video, November 20, 2017, https://www.youtube.com/watch?v=roemLDPy_Ww; Erik Brynjolfsson and Andrew McAfee, *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies* (New York: W.W. Norton, 2014).

- ⁸⁰ Para uma explicação acessível e baseada em dados sobre as tendências de desqualificação desde a década de 1950, veja David Kunst, “Deskilling Among Manufacturing Production Workers,” VoxEU, August 9, 2019, <https://voxeu.org/article/deskilling-among-manufacturing-production-workers>.
- ⁸¹ Para mais informações sobre a qualificação e o processo de fabrico de calçado FitMyFoot, consulte Pablo Illanes et al., “Retraining and Reskilling Workers in the Age of Automation,” McKinsey Global Institute, January 2018, <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/retraining-andreskilling-workers-in-the-age-of-automation>; “The Science and Technology of FitMyFoot,” FitMyFoot, accessed April 20, 2023, <https://fitmyfoot.com/pages/science>.
- ⁸² Jack Kelly, “Wells Fargo Predicts That Robots Will Steal 200,000 Banking Jobs Within the Next 10 Years,” Forbes, October 8, 2019, <https://www.forbes.com/sites/jackkelly/2019/10/08/wells-fargo-predicts-that-robots-will-steal-200000-banking-jobs-within-the-next-10-years/#237ecaba68d7>; James Bessen, “How Computer Automation Affects Occupations: Technology, Jobs, and Skills,” Boston University School of Law (Law & Economics working paper no. 15–49, November 13, 2015), 5, <https://www.bu.edu/law/files/2015/11/NewTech-2.pdf>.
- ⁸³ G. M. Filisko, “Paralegals and Legal Assistants Are Taking on Expanded Duties,” ABA Journal, November 1, 2014, http://www.abajournal.com/magazine/article/techno_change_o_paralegal_legal_assistant_duties_expand; Jean O’Grady, “Analytics, AI and Insights: 5 Innovations That Redefined Legal Research Since 2010,” Above the Law, January 2, 2020, <https://abovethelaw.com/2020/01/analytics-ai-and-insights-5-innovations-that-redefined-legalresearch-since-2010>.
- ⁸⁴ Kevin Roose, “A.I.-Generated Art Is Already Transforming Creative Work,” New York Times, October 21, 2022, <https://www.nytimes.com/2022/10/21/technology/ai-generated-art-jobs-dalle-2.html>.
- ⁸⁵ Para explicações rápidas e acessíveis sobre as diferenças entre capital e trabalho, consulte BBC, “Methods of Production: Labour and Capital,” BBC Bitesize, accessed January 30, 2023, <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zth78mn/revision/5>; Sal Khan, “What Is Capital?,” Khan Academy, accessed April 20, 2023, <https://www.khanacademy.org/economics-finance-domain/macroeconomics/macro-economics-income-inequality/piketty-capital/v/what-is-capital>; Catherine Rampell, “Companies Spend on Equipment, Not Workers,” New York Times, June 9, 2011, <https://www.nytimes.com/2011/06/10/business/10capital.html>; Tim Harford, “What Really Powers Innovation: High Wages,” Financial Times, January 11, 2013, <https://www.ft.com/content/b7ad1c68-59fb-11e2-b728-00144feab49a>.
- ⁸⁶ US Bureau of Labor Statistics, “Nonfarm Business Sector: Real Output per Hour of All Persons (OPHNFB),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 2, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/OPHNFB>.
- ⁸⁷ US Bureau of Labor Statistics, “Nonfarm Business Sector: Real Output per Hour of All Persons (OPHNFB).”
- ⁸⁸ Soon-Yong Choi and Andrew B. Whinston, “The IT Revolution in the USA: The Current Situation and the Problems,” in *The Internet Revolution: A Global Perspective*, ed. Emanuele Giovannetti, Mitsuhiro Kagami, and Masatsugu Tsuji (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003), 219, <https://books.google.com/books?id=1f6wD7gezP4C>.
- ⁸⁹ US Bureau of Labor Statistics, “Nonfarm Business Sector: Real Output per Hour of All Persons (OPHNFB).”
- ⁹⁰ “Descriptions of General Purpose Digital Computers,” *Computers and Automation* 4, no. 6 (June 1965): 76, <https://web.archive.org/web/20190723025854/http://www.bitsavers.org/pdf/computersAndAutomation/196506.pdf>.
- ⁹¹ Brynjolfsson and McAfee, *The Second Machine Age*; Tim Worstall, “Trying to Understand Why Marc Andreessen and Larry Summers Disagree Using Facebook,” Forbes, January 15, 2015, <https://www.forbes.com/sites/timworstall/2015/01/15/trying-to-understand-why-marcandreessen-and-larry-summers-disagree-using-facebook/#1ec456d05b4e>.
- ⁹² Para mais informações sobre o PIB e o custo marginal, consulte Tim Callen, “Gross Domestic Product: An Economy’s All,” International Monetary Fund, December 18, 2018, <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/basics/gdp.htm>; Alicia Tuovila, “Marginal Cost of Production,” Investopedia, September 20, 2019, <https://www.investopedia.com/terms/m/marginalcostofproduction.asp>; Sal Khan, “Marginal Revenue and Marginal Cost,” Khan Academy, accessed April 20, 2023, <https://www.khanacademy.org/economics-finance-domain/ap->

[microeconomics/production-costand-the-perfect-competition-model-temporary/short-run-production-costs/v/marginal-revenueand-marginal-cost](#); Jeremy Rifkin, *The Zero Marginal Cost Society: The Internet of Things, the Collaborative Commons, and the Eclipse of Capitalism* (New York: St. Martin's, 2014).

⁹³ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos de custos de computação neste livro.

⁹⁴ "Introducing the AMD Radeon RX 7900 XT," AMD, accessed January 30, 2023, <https://www.amd.com/en/products/graphics/amd-radeon-rx-7900xt>; Michael Justin Allen Sexton, "AMD Radeon RX 7900 XT Review," *PC Magazine*, December 17, 2022, <https://www.pcmag.com/reviews/amd-radeon-rx-7900-xt>.

⁹⁵ Consulte o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos de custos de computação neste livro.

⁹⁶ US Bureau of Labor Statistics, "A Review of Hedonic Price Adjustment Techniques for Products Experiencing Rapid and Complex Quality Change," US Bureau of Labor Statistics, September 15, 2022, <https://www.bls.gov/cpi/quality-adjustment/hedonic-price-adjustmenttechniques.htm>; Dave Wasshausen and Brent R. Moulton, "The Role of Hedonic Methods in Measuring Real GDP in the United States," Bureau of Economic Analysis, October 2006, https://www.bea.gov/system/files/papers/P2006-6_0.pdf.

⁹⁷ Erik Brynjolfsson, Avinash Collis, and Felix Eggers, "Using Massive Online Choice Experiments to Measure Changes in Well-Being," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 15 (April 9, 2019): 7250–55, <https://doi.org/10.1073/pnas.1815663116>.

⁹⁸ Tim Worstall, "Is Facebook Worth \$8 Billion, \$100 Billion or \$800 Billion to the US Economy?," *Forbes*, January 23, 2015, <https://www.forbes.com/sites/timworstall/2015/01/23/is-facebook-worth-8-billion-100-billionor-800-billion-to-the-us-economy/?sh=6a50df5a16ce>; Worstall, "Trying to Understand Why Marc Andreessen and Larry Summers Disagree Using Facebook."

⁹⁹ Worstall, "Is Facebook Worth \$8 Billion."

¹⁰⁰ Jasmine Enberg, "Social Media Update Q1 2021," eMarketer, March 30, 2021, <https://www.emarketer.com/content/social-media-update-q1-2021>.

¹⁰¹ "Social Media Fact Sheet," Pew Research Center, April 7, 2021, <https://www.pewresearch.org/internet/fact-sheet/social-media>; Stella U. Ogunwole et al., "Population Under Age 18 Declined Last Decade" US Census Bureau, August 12, 2021, <https://www.census.gov/library/stories/2021/08/united-states-adult-population-grew-fasterthan-nations-total-population-from-2010-to-2020.html>; "Minimum Wage," US Department of Labor, accessed April 20, 2023, <https://www.dol.gov/general/topic/wages/minimumwage>; John Gramlich, "10 Facts About Americans and Facebook," Pew Research Center, June 1, 2021, <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2021/06/01/facts-about-americans-and-facebook>.

¹⁰² Simon Kemp, "Digital 2020: 3.8 Billion People Use Social Media," *We Are Social*, January 30, 2020, <https://web.archive.org/web/20210808051917/https://wearesocial.com/blog/2020/01/digital-2020-3-8-billion-people-use-social-media>; Paige Cooper, "43 Social Media Advertising Statistics That Matter to Marketers in 2020," *Hootsuite*, April 23, 2020, <https://web.archive.org/web/20200729070657/https://blog.hootsuite.com/social-mediaadvertising-stats>.

¹⁰³ US Bureau of Labor Statistics, "Consumer Price Index for All Urban Consumers: Medical Care in U.S. City Average (CPIMEDSL)," retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 12, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/CPIMEDSL#0>; US Bureau of Labor Statistics, "Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL)"; Xavier Jaravel, "The Unequal Gains from Product Innovations: Evidence from the U.S. Retail Sector," *Quarterly Journal of Economics* 134, no. 2 (May 2019): 715–83, <https://doi.org/10.1093/qje/qjy031>; Peter H. Diamandis and Steven Kotler, *Abundance: The Future Is Better Than You Think* (New York: Simon & Schuster, 2012).

¹⁰⁴ US Bureau of Labor Statistics, "Labor Force Participation Rate (CIVPART)."

¹⁰⁵ Para uma explicação rápida sobre estas definições e os dados subjacentes, consulte Clay Halton, "Civilian Labor Force," *Investopedia*, July 23, 2019, <https://www.investopedia.com/terms/c/civilianlabor-force.asp>; US Census Bureau, "Growth in

U.S. Population Shows Early Indication of Recovery amid COVID-19 Pandemic,” US Census Bureau press release CB22-214, December 22, 2022, <https://www.census.gov/newsroom/press-releases/2022/2022-populationestimates.html>; “Population, Total—United States,” World Bank, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=US>; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV).”

¹⁰⁶ US Census Bureau, “Growth in U.S. Population Shows Early Indication of Recovery amid COVID-19 Pandemic”; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Level (CLF16OV).”

¹⁰⁷ Lauren Bauer et al., “All School and No Work Becoming the Norm for American Teens,” Brookings Institution, July 2, 2019, <https://www.brookings.edu/blog/up-front/2019/07/02/all-school-and-no-work-becoming-the-norm-for-american-teens>; Mitra Toossi, “Labor Force Projections to 2022: The Labor Force Participation Rate Continues to Fall,” Monthly Labor Review, US Bureau of Labor Statistics, December 2013, <https://www.bls.gov/opub/mlr/2013/article/labor-force-projections-to-2022-the-labor-forceparticipation-rate-continues-to-fall.htm>.

¹⁰⁸ Jonnelle Marte, “Aging Boomers Explain Shrinking Labor Force, NY Fed Study Says,” Bloomberg, March 30, 2023, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-03-30/agingboomers-explain-shrinking-labor-force-ny-fed-study-says>; Richard Fry, “The Pace of Boomer Retirements Has Accelerated in the Past Year,” Pew Research Center, November 9, 2020, <https://www.pewresearch.org/short-reads/2020/11/09/the-pace-of-boomer-retirements-hasaccelerated-in-the-past-year>.

¹⁰⁹ US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Participation Rate: 25 to 54 years (LNU01300060),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 7, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/LNU01300060>.

¹¹⁰ Organisation for Economic Co-operation and Development, “Working Age Population: Aged 25–54: All Persons for the United States (LFWA25TTUSM647N),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated April 20, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/LFWA25TTUSM647N>.

¹¹¹ US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Participation Rate: 25 to 54 years (LNU01300060).”

¹¹² Note-se que, embora a participação na força de trabalho entre os americanos com cinquenta e cinco anos ou mais tenha aumentado, o efeito líquido é uma menor participação geral na força de trabalho porque o grupo demográfico com mais de cinquenta e cinco anos tem uma taxa de participação geral muito mais baixa do que os adultos mais jovens e porque o tamanho deste grupo demográfico está a crescer devido aos baby boomers serem um grupo muito maior do que a geração que estão a substituir. Veja US Census Bureau, “65 and Older Population Grows Rapidly as Baby Boomers Age,” US Census Bureau press release CB20-99, June 25, 2020, <https://www.census.gov/newsroom/press-releases/2020/65-older-population-grows.html>; William E. Gibson, “Age 65+ Adults Are Projected to Outnumber Children by 2030,” AARP, March 14, 2018, <https://www.aarp.org/home-family/friends-family/info-2018/census-babyboomers-fd.html>; US Bureau of Labor Statistics, “Civilian Labor Force Participation Rate by Age, Sex, Race, and Ethnicity,” US Bureau of Labor Statistics, updated September 8, 2022, <https://www.bls.gov/emp/tables/civilian-labor-force-participation-rate.htm>.

¹¹³ “Life Expectancy at Birth, Total (Years)—United States,” World Bank, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN?locations=US>.

¹¹⁴ Para mais informações sobre a evolução da demografia laboral nos EUA, consulte Audrey Breitwieser, Ryan Nunn, and Jay Shambaugh, “The Recent Rebound in Prime-Age Labor Force Participation,” Brookings Institution, August 2, 2018, <https://www.brookings.edu/blog/up-front/2018/08/02/the-recentrebound-in-prime-age-labor-force-participation>; Jo Harper, “Automation Is Coming: Older Workers Are Most at Risk,” Deutsche Welle, July 24, 2018, <https://www.dw.com/en/automation-is-coming-older-workers-are-most-at-risk/a-44749804>; Peter Gosselin, “If You’re Over 50, Chances Are the Decision to Leave a Job Won’t Be Yours,” ProPublica, December 28, 2018, <https://www.propublica.org/article/older-workers-unitedstates-pushed-out-of-work-forced-retirement>; Karen Harris, Austin Kimson, and Andrew Schwedel, “Labor 2030: The Collision of Demographics, Automation and Inequality,” Bain & Co., February 7, 2018, <https://www.bain.com/insights/labor-2030-the-collision-ofdemographics-automation-and-inequality>; Alana Semuels, “This Is What Life Without Retirement Savings Looks Like,” Atlantic, February 22, 2018, <https://www.theatlantic.com/business/archive/2018/02/pensions-safety-net-california/553970>.

-
- ¹¹⁵ “Top 100 Cryptocurrencies by Market Capitalization,” CoinMarketCap, accessed April 20, 2023, <https://coinmarketcap.com>.
- ¹¹⁶ “USD Exchange Trade Volume,” Blockchain.com, accessed July 31, 2023, <https://www.blockchain.com/charts/trade-volume?timespan=all>.
- ¹¹⁷ “USD Exchange Trade Volume,” Blockchain.com.
- ¹¹⁸ Bank for International Settlements, *BIS Quarterly Review: International Banking and Financial Market Developments* (Bank for International Settlements, December 2022), 16, https://www.bis.org/publ/qtrpdf/r_qt2212.pdf.
- ¹¹⁹ “Top 100 Cryptocurrencies by Market Capitalization,” CoinMarketCap; “Bitcoin Price,” Coinbase, accessed April 20, 2023, <https://www.coinbase.com/price/bitcoin>.
- ¹²⁰ “Bitcoin Price,” Coinbase.
- ¹²¹ “Bitcoin Price,” Coinbase.
- ¹²² “Bitcoin Price,” Coinbase.
- ¹²³ Para mais informações sobre o crescente papel económico dos influenciadores, consulte “How Big Is the Influencer Economy?”, TechCrunch, YouTube video, November 13, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=RJBn2JDfDSQ>.
- ¹²⁴ Sarah Perez, “iOS App Store Has Seen Over 170B Downloads, Over \$130B in Revenue Since July 2010,” TechCrunch, May 31, 2018, <https://techcrunch.com/2018/05/31/ios-app-store-has-seen-over-170b-downloads-over-130b-in-revenue-since-july-2010>.
- ¹²⁵ “Number of Available Applications in the Google Play Store from December 2009 to September 2022,” Statista, updated March 2023, <https://www.statista.com/statistics/266210/number-of-available-applications-in-the-googleplay-store>.
- ¹²⁶ “Number of Available Applications in the Google Play Store,” Statista.
- ¹²⁷ Trevor Mogg, “App Economy Creates Nearly Half a Million US Jobs,” Digital Trends, February 7, 2012, <https://web.archive.org/web/20170422014624/https://www.digitaltrends.com/android/appeconomy-creates-nearly-half-a-million-us-jobs>.
- ¹²⁸ Microeconomix, App Economy in the United States, 4.
- ¹²⁹ ACT: The App Association, *State of the U.S. App Economy: 2020*, 7th ed. (Washington, DC: ACT: The App Association, 2021), 4, <https://actonline.org/wp-content/uploads/2020-AppEconomy-Report.pdf>.
- ¹³⁰ Frey and Osborne, “Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?”
- ¹³¹ Dusty Stowe, “Why Star Trek: The Original Series Was Cancelled After Season 3,” *Screen Rant*, May 21, 2019, <https://screenrant.com/star-trek-original-series-cancelled-season-3-reasonwhy>.
- ¹³² Kayla Cobb, “From ‘South Park’ to ‘BoJack Horseman,’ Tracking the Rise of Continuity in Adult Animation,” *Decider*, December 16, 2015, <https://decider.com/2015/12/16/tracking-the-rise-of-continuity-in-animated-comedies>; Gus Lubin, “‘BoJack Horseman’ Creators Explain Why Netflix Is So Much Better Than TV,” *Business Insider*, October 3, 2014, <https://www.businessinsider.com/why-bojack-horseman-went-to-netflix-2014-9>.
- ¹³³ International Telecommunication Union, “Key ICT Indicators for Developed and Developing Countries.”
- ¹³⁴ Para mais informações sobre a introdução da Segurança Social nos Estados Unidos e os objetivos do programa, consulte Craig Benzine, “Social Policy: Crash Course Government and Politics #49,” *CrashCourse*, YouTube video, February 27, 2016, https://www.youtube.com/watch?v=mlxLX8Fto_A; “Here’s How the Great Depression Brought on Social Security,” *History*,

YouTube video, April 26, 2018, https://www.youtube.com/watch?v=cdE_EV3wnXM; “Historical Background and Development of Social Security,” Social Security Administration, accessed April 20, 2023, <https://www.ssa.gov/history/briefhistory3.html>.

¹³⁵ Devido às interrupções da pandemia da COVID-19, 2019 é o ano mais recente para o qual existem boas estatísticas de rede de segurança social disponíveis no momento em que este artigo foi escrito. Os dados mais recentes são menos comensuráveis entre os países porque as categorias orçamentais para o alívio económico relacionado com a pandemia variam. Veja Organisation for Economic Co-operation and Development, “Social Expenditure Database (SOCX),” OECD.org, January 2023, <https://www.oecd.org/social/expenditure.htm>.

¹³⁶ Organisation for Economic Co-operation and Development, “Social Expenditure Database.”

¹³⁷ Organisation for Economic Co-operation and Development, “Social Expenditure Database.”

¹³⁸ “GDP (Current US\$) — United Kingdom,” World Bank, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=GB>; “Population, Total — United Kingdom,” World Bank, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=GB>.

¹³⁹ Organisation for Economic Co-operation and Development, “Social Expenditure Database”; “GDP (Current US\$) — United States,” World Bank, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=US>.

¹⁴⁰ “Population, Total—United States,” World Bank.

¹⁴¹ Noah Smith, “The U.S. Social Safety Net Has Improved a Lot,” Bloomberg, May 16, 2018, <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2018-05-16/the-u-s-social-safety-net-hasimproved-a-lot>.

¹⁴² Os gastos públicos nos Estados Unidos são notoriamente difíceis de medir com precisão nos níveis local, estadual e federal, e os dados provenientes do início do século XX não são diretamente comparáveis aos mais recentes. Por conseguinte, as melhores estimativas disponíveis implicam um certo grau de especulação e exigem decisões metodológicas para as quais não existe uma única opção claramente superior. Isto é particularmente relevante no que respeita à medição das despesas associadas à rede de proteção social. Deste modo, os dados sobre os gastos nesta área apresentados neste capítulo não devem ser considerados definitivos, mas sim aproximações indicativas. Acresce ainda que, devido a divergências metodológicas entre as fontes utilizadas, os dados anuais referentes à “rede de segurança social” nos EUA não estão perfeitamente alinhados com os números mais recentes sobre “despesa social” tal como quantificada pela Base de Dados de Despesas Sociais da OCDE. Não obstante, a tendência global — no sentido de uma expansão contínua da rede de proteção social independentemente do partido no poder — revela-se inequívoca.

¹⁴³ US Census Bureau, “Historical National Population Estimates, July 1, 1900 to July 1, 1999”; US Bureau of Economic Analysis, “Population (B230RC0A052NBEA);” “U.S. and World Population Clock—July 1, 2021,” US Census Bureau, updated January 30, 2023, <https://www.census.gov/popclock>; US Bureau of Economic Analysis, “Gross Domestic Product (GDP),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 30, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/GDP>; “Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis; Christopher Chantrill, “Government Spending Chart,” [usgovernmentspending.com](https://www.usgovernmentspending.com), accessed April 20, 2023, https://www.usgovernmentspending.com/spending_chart_1900_2021USk_22s2li011mcny_10t40t00t; “CPI Inflation Calculator” for July 2012–July 2021, US Bureau of Labor Statistics, accessed April 20, 2023, https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm; Christopher Chantrill, “Government Spending Chart,” [usgovernmentspending.com](https://www.usgovernmentspending.com), accessed April 20, 2023, https://www.usgovernmentspending.com/spending_chart_1900_2021USk_22s2li011mcny_F0t; Jutta Bolt and Jan Luiten van Zanden, Maddison Project Database, version 2020, Groningen Growth and Development Centre, November 2, 2020, <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2020>; Jutta Bolt and Jan Luiten van Zanden, “Maddison Style Estimates of the Evolution of the World Economy. A New 2020 Update” (working paper WP-15, *Maddison Project*, October 2020), <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/publications/wp15.pdf>; John J. McCusker, “Colonial Statistics,” in *Historical Statistics of the United States: Earliest Times to the Present*, ed. Susan G. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), V-671; Richard Sutch, “National Income and Product,” in *Historical Statistics of the United States*:

Earliest Times to the Present, ed. Susan G. Carter et al. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), III-23–25; Leandro Prados de la Escosura, “Lost Decades? Economic Performance in Post-Independence Latin America,” *Journal of Latin American Studies* 41, no. 2 (May 2009): 279–307, <https://www.jstor.org/stable/27744128>; “CPI Inflation Calculator” for July 2011–July 2021, US Bureau of Labor Statistics, accessed January 30, 2023, https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm; US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL)”;

US Bureau of Economic Analysis, “Real Gross Domestic Product per Capita (A939RX0Q048SBEA),” retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis, updated March 30, 2023, <https://fred.stlouisfed.org/series/A939RX0Q048SBEA>.

¹⁴⁴ Para as fontes utilizadas neste gráfico, veja a nota 145 acima.

¹⁴⁵ Para as fontes utilizadas neste gráfico, veja a nota 145 acima.

¹⁴⁶ Para as fontes utilizadas neste gráfico, veja a nota 145 acima.

¹⁴⁷ Para assistir à nossa troca, veja Ray Kurzweil and Chris Anderson, “Ray Kurzweil on What the Future Holds Next,” *The TED Interview* podcast, December 2018, https://www.ted.com/talks/the_ted_interview_ray_kurzweil_on_what_the_future_holds_next.

¹⁴⁸ Para mais informações sobre o crescente movimento para estabelecer um rendimento básico universal (ou um conceito relacionado denominado “serviços básicos universais”) e as provas que moldam estas propostas, consulte Will Bedingfield, “Universal Basic Income, Explained,” *Wired*, August 25, 2019, <https://www.wired.co.uk/article/universal-basic-income-explained>; Karen Yuan, “A Moral Case for Giving People Money,” *Atlantic*, August 22, 2018, <https://www.theatlantic.com/membership/archive/2018/08/a-moral-case-for-giving-peoplemoney/568207>; Annie Lowrey, “Stockton’s Basic-Income Experiment Pays Off,” *Atlantic*, March 3, 2021, <https://www.theatlantic.com/ideas/archive/2021/03/stocktons-basic-incomeexperiment-pays-off/618174>; Dylan Matthews, “Basic Income: The World’s Simplest Plan to End Poverty, Explained,” *Vox*, April 25, 2016, <https://www.vox.com/2014/9/8/6003359/basicincome-negative-income-tax-questions-explain>; Sigal Samuel, “Everywhere Basic Income Has Been Tried, in One Map,” *Vox*, October 20, 2020, <https://www.vox.com/futureperfect/2020/2/19/21112570/universal-basic-income-ubi-map>; Ian Gough, “Move the Debate from Universal Basic Income to Universal Basic Services,” UNESCO Inclusive Poverty Lab, January 19, 2021, <https://en.unesco.org/inclusivepolicylab/analytics/move-debate-universalbasic-income-universal-basic-services>.

¹⁴⁹ Derek Thompson, “A World Without Work,” *Atlantic*, July/August 2015, <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2015/07/world-without-work/395294>.

¹⁵⁰ Veja o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos de custos de computação neste livro; Jaravel, “The Unequal Gains from Product Innovations,” 715–83; Diamandis and Kotler, *Abundance*.

¹⁵¹ US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: Medical Care in U.S. City Average (CPIMEDSL)”;

US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL)”;

“Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis;

US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL).”

¹⁵² US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: Medical Care in U.S. City Average (CPIMEDSL)”;

US Bureau of Labor Statistics, “Consumer Price Index for All Urban Consumers: All Items in U.S. City Average (CPIAUCSL)”;

“Consumer Price Index, 1913–,” Federal Reserve Bank of Minneapolis.

¹⁵³ Para um livro altamente informativo sobre a relação entre governação e prosperidade, veja Daron Acemoglu and James A. Robinson, *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty* (New York: Crown, 2012).

¹⁵⁴ Para uma explicação útil e vívida da hierarquia de Maslow e do seu significado, veja “Why Maslow’s Hierarchy of Needs Matters,” The School of Life, YouTube video, April 10, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=L0PKWTta7IU>.

¹⁵⁵ Sandra L. Colby and Jennifer M. Ortman, *Projections of the Size and Composition of the U.S. Population: 2014 to 2060*, Current Populations Reports, P25-1143, US Census Bureau, March 2015, 6,

<https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2015/demo/p25-1143.pdf>; US Census Bureau, “American Fact Finder, Table B24010—Sex by Occupation for the Civilian Employed Population 16 Years and Over,” 2017 American Community Survey 1-Year Estimates, <https://data.census.gov/table/ACSDT1Y2017.B24010?q=B24010:%20SEX%20BY%20OCCUPATION%20FOR%20THE%20CIVILIAN%20EMPLOYED%20POPULATION%2016%20YEARS%20AND%20OVER&g=010XX00US>.

¹⁵⁶ Skip Descant, “Autonomous Vehicles to Have Huge Impact on Economy, Tech Sector,” *Government Technology*, June 27, 2018, <https://www.govtech.com/fs/automation/Autonomous-Vehicles-to-Have-Huge-Impact-on-Economy-Tech-Sector.html>; Kirsten Korosec, “Intel Predicts a \$7 Trillion Self-Driving Future,” *The Verge*, June 1, 2017, <https://www.theverge.com/2017/6/1/15725516/intel-7-trillion-dollar-self-driving-autonomouscars>; Adam Ozimek, “The Massive Economic Benefits of Self-Driving Cars,” *Forbes*, November 8, 2014, <https://www.forbes.com/sites/modeledbehavior/2014/11/08/the-massiveeconomic-benefits-of-self-driving-cars/#723609f53273>.

¹⁵⁷ Estima-se que 42.915 pessoas tenham morrido em acidentes de viação nas estradas dos EUA em 2021. Embora haja um debate em curso sobre quanto disto deve ser atribuído ao erro humano, é evidente que a esmagadora maioria dos acidentes tem o erro humano como componente-chave — provavelmente entre 90 e 99 por cento. Veículos autônomos controlados por IA suficientemente capaz poderiam eliminar quase tudo isto. Veja Bryant Walker Smith, “Human Error as a Cause of Vehicle Crashes,” Center for Internet and Society, Stanford Law School, December 18, 2013, <https://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/human-error-cause-vehicle-crashes>; David Zipper, “The Deadly Myth That Human Error Causes Most Car Crashes,” *Atlantic*, November 26, 2021, <https://www.theatlantic.com/ideas/archive/2021/11/deadly-myth-human-error-causesmost-car-crashes/620808>; National Highway Traffic Safety Administration, “Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey,” NHTSA National Center for Statistics and Analysis report DOT HS 812 115, US Department of Transportation, February 2015, <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812115>; National Highway Traffic Safety Administration, “Early Estimates of Motor Vehicle Traffic Fatalities and Fatality Rate by Sub-Categories in 2021,” NHTSA National Center for Statistics and Analysis report DOT HS 813 298, US Department of Transportation, May 2022, <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813298>.

¹⁵⁸ Carl Benedikt Frey et al., “Political Machinery: Did Robots Swing the 2016 US Presidential Election?”, *Oxford Review of Economic Policy* 34, no. 3 (2018): 418–42, https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/Political_Machinery_July_2018.pdf.

¹⁵⁹ Para mais informações sobre o declínio a longo prazo da violência em todo o mundo, consulte Max Roser and Hannah Ritchie, “Homicides,” *Our World in Data*, December 2019, <https://ourworldindata.org/homicides>; Manuel Eisner, “From Swords to Words: Does Macro-Level Change in Self-Control Predict Long-Term Variation in Levels of Homicide?”, *Crime and Justice* 43, no. 1 (September 2014): 80–81; UN Office on Drugs and Crime, “Intentional Homicides (Per 100,000 People) — France, Netherlands, Sweden, Germany, Switzerland, Italy, United Kingdom, Spain,” retrieved from Worldbank.org, accessed April 20, 2023, <https://data.worldbank.org/indicator/VC.IHR.PSRC.P5?end=2020&locations=FR-NL-SE-DECH-IT-GB-ES&start=2020&view=bar>; “Appendix Tables: Homicide in England and Wales,” UK Office for National Statistics, February 9, 2023, <https://www.ons.gov.uk/file?uri=/peoplepopulationandcommunity/crimeandjustice/datasets/appendixtableshomicideinenglandandwales/current/homicideyemarch22appendixtables.xlsx>; European Commission, *Investing in Europe’s Future: Fifth Report on Economic, Social and Territorial Cohesion* (Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010), https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/cohesion5/pdf/5scr_part1_en.pdf; *Global Study on Homicide*, United Nations Office on Drugs and Crime, 2019, <https://www.unodc.org/documents/data-and-analysis/gsh/Booklet1.pdf>; *Global Study on Homicide*, United Nations Office on Drugs and Crime, 2011, http://www.unodc.org/documents/data-andanalysis/statistics/Homicide/Globa_study_on_homicide_2011_web.pdf; Steven Pinker, *The Better Angels of Our Nature: Why Violence Has Declined* (New York: Penguin, 2011).

¹⁶⁰ Para uma palestra aprofundada de Pinker a expandir esta visão, veja “Steven Pinker: Better Angels of Our Nature,” Talks at Google, YouTube video, November 1, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=gGf7fXM3jQ>.

¹⁶¹ Fiz a maioria destas previsões no meu livro de 1990, *A Era das Máquinas Inteligentes*. Veja Raymond Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines* (Cambridge, MA: MIT Press, 1990), 429–34.

¹⁶² Kurzweil, *Age of Intelligent Machines*, 432–34.

¹⁶³ Alex Shashkevich, “Meeting Online Has Become the Most Popular Way U.S. Couples Connect, Stanford Sociologist Finds,” *Stanford News*, August 21, 2019, <https://news.stanford.edu/2019/08/21/online-dating-popular-way-u-s-couples-meet/>; Michael J. Rosenfeld, Reuben J. Thomas, and Sonia Hausen, “Disintermediating Your Friends: How Online Dating in the United States Displaces Other Ways of Meeting,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, no. 36 (September 3, 2019): 17753–58, <https://doi.org/10.1073/pnas.1908630116>.

¹⁶⁴ Mesmo que um smartphone de 2024 não tivesse acesso ao serviço de telemóvel de 2024, poderia ainda armazenar todo o texto da Wikipédia em inglês na sua memória nativa. Dependendo de como se mede, a Wikipédia ocupa provavelmente cerca de 150 gigabytes para descarregar, enquanto os iPhones mais recentes oferecem até 1 terabyte de armazenamento. Veja Nick Lewis and Matt Klein, “How to Download Wikipedia for Offline, At-Your-Fingertips Reading,” *How-To Geek*, March 25, 2022, <https://www.howtogeek.com/260023/how-to-download-wikipedia-for-offline-at-yourfingertips-reading/>; “Buy iPhone 14 Pro,” Apple, accessed April 20, 2023, <https://www.apple.com/shop/buy-iphone/iphone-14-pro/6.7-inch-display-1tb-space-blackunlocked>.

¹⁶⁵ Para que fique claro, refiro-me aqui à fase em que os humanos e a IA se tornam cada vez mais simbióticos e a abundância material é alcançada. Entretanto, como descrito anteriormente neste capítulo, haverá certamente interrupções e competição, à medida que a IA substitui os humanos em muitas tarefas e empregos que existem no paradigma económico atual.

CAPÍTULO 6

¹ Uma das principais empresas de bio-simulação do mundo, a Insilico Medicine, desenvolveu uma plataforma de IA chamada Pharma.AI, que foi utilizada para criar o INS018_055, um medicamento de pequena molécula atualmente em testes de fase II para tratar uma doença pulmonar rara chamada fibrose pulmonar idiopática. Pela primeira vez no mundo, a IA não só melhorou os investigadores humanos, como também concebeu o medicamento de ponta a ponta, o que significa que identificou um novo alvo biomolecular para tratar a doença e uma molécula que poderá atuar sobre esse alvo. Para uma visão fascinante do trabalho de Insilico, veja “How AI Is Accelerating Drug Discovery,” YouTube video, April 3, 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=mqBvixD05M>; Hayden Field, “The First Fully A.I.-Generated Drug Enters Clinical Trials in Human Patients,” *CNBC*, June 29, 2023, <https://www.cnn.com/2023/06/29/ai-generated-drug-begins-clinical-trials-in-humanpatients.html>.

² Para mais recursos sobre a descoberta de medicamentos orientada por IA, consulte Vanessa Bates Ramirez, “Drug Discovery AI Can Do in a Day What Currently Takes Months,” *SingularityHub*, May 7, 2017, <https://singularityhub.com/2017/05/07/drug-discovery-ai-can-do-in-a-day-what-currentlytakes-months/>; “MIT Quest for Intelligence Launch: AI-Driven Drug Discovery,” *Massachusetts Institute of Technology*, YouTube video, March 9, 2018, https://www.youtube.com/watch?v=aqMRrRS_OJY; “Developer Spotlight: Opening a New Era of Drug Discovery with Amber,” *NVIDIA Developer*, YouTube video, July 29, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=FqnPGHdh7iM>; “We’re Teaching Robots and AI to Design New Drugs,” *SciShow*, YouTube video, September 30, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=eRXqD-7FANG>; Francesca Properzi et al., “Intelligent Drug Discovery: Powered by AI” (Deloitte Centre for Health Solutions, 2019), https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/32961_intelligent-drugdiscovery/DI_Intelligent-Drug-Discovery.pdf; Nic Fleming, “How Artificial Intelligence Is Changing Drug Discovery,” *Nature* 557, no. 7707 (May 31, 2018): S55–S57, <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05267-x>; David H. Feedman, “Hunting for New Drugs with AI,” *Nature* 576, no. 7787 (December 18, 2019): S49–S53, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03846-0>.

³ Abhimanyu S. Ahuja, Vineet Pasam Reddy, and Oge Marques, “Artificial Intelligence and COVID-19: A Multidisciplinary Approach,” *Integrative Medicine Research* 9, no. 3, article 100434 (May 27, 2020), <https://doi.org/10.1016/j.imr.2020.100434>; Jared Sagoff, “Argonne’s Researchers and Facilities Playing a Key Role in the Fight Against COVID-19,” *Argonne National Laboratory*, April 27, 2020, <https://www.anl.gov/article/argonnes-researchers-andfacilities-playing-a-key-role-in-the-fight-against-covid19>.

-
- ⁴ Jean-Louis Reymond and Mahendra Awale, “Exploring Chemical Space for Drug Discovery Using the Chemical Universe Database,” *ACS Chemical Neuroscience* 3, no. 9 (April 25, 2012): 649–57, <https://doi.org/10.1021/cn3000422>.
- ⁵ Chi Heem Wong, Kien Wei Siah, and Andrew W. Lo, “Estimation of Clinical Trial Success Rates and Related Parameters,” *Biostatistics* 20, no. 2 (January 31, 2018): 273–86, <https://doi.org/10.1093/biostatistics/kxx069>.
- ⁶ “The Drug Development Process: Step 3: Clinical Research,” US Food and Drug Administration, accessed October 20, 2022, <https://www.fda.gov/patients/drug-developmentprocess/step-3-clinical-research>; Stuart A. Thompson, “How Long Will a Vaccine Really Take?”, *New York Times*, April 30, 2020, <https://www.nytimes.com/interactive/2020/04/30/opinion/coronavirus-covid-vaccine.html>; Institute of Medicine Forum on Drug Discovery, Development, and Translation, “The State of Clinical Research in the United States: An Overview,” in *Transforming Clinical Research in the United States* (Washington, DC: National Academies Press, 2010), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK50886>; Thomas J. Moore et al., “Estimated Costs of Pivotal Trials for Novel Therapeutic Agents Approved by the US Food and Drug Administration, 2015–2016,” *JAMA Internal Medicine* 178, no. 11 (November 2018): 1451–57, <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2018.3931>; Olivier J. Wouters, Martin McKee, Jeroen Luyten, “Estimated Research and Development Investment Needed to Bring a New Medicine to Market, 2009–2018,” *Journal of the American Medical Association* 323, no. 9 (March 3, 2020): 844–53, <https://doi.org/10.1001/jama.2020.1166>; Biopharmaceutical Research & Development: The Process Behind New Medicines, PHRMA, accessed October 20, 2022, https://web.archive.org/web/20230306041340/http://phrmadocs.phrma.org/sites/default/files/pdf/rd_brochure_022307.pdf.
- ⁷ David Sparkes and Rhett Burnie, “AI Invents More Effective Flu Vaccine in World First, Adelaide Researchers Say,” Australian Broadcasting Corporation, July 2, 2019, <https://www.abc.net.au/news/2019-07-02/computer-invents-flu-vaccine-in-worldfirst/11271170>; Andrew Tarantola, “How AI Is Stopping the Next Great Flu Before It Starts,” *Engadget*, February 14, 2020, <https://www.engadget.com/2020/02/14/how-ai-is-helping-haltthe-flu-of-the-future>.
- ⁸ Tarantola, “How AI is Stopping the Next Great Flu Before It Starts.”
- ⁹ Ian Sample, “Powerful Antibiotic Discovered Using Machine Learning for First Time,” *Guardian*, February 20, 2020, <https://www.theguardian.com/society/2020/feb/20/antibioticthat-kills-drug-resistant-bacteria-discovered-through-ai>.
- ¹⁰ Sample, “Powerful Antibiotic Discovered Using Machine Learning for First Time.”
- ¹¹ “Moderna’s Work on a Potential Vaccine Against COVID-19,” Moderna, 2020, <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1682852/000119312520074867/d884510dex991.htm>.
- ¹² Para mais detalhes sobre a utilização de IA pela Moderna no desenvolvimento de vacinas, consulte “AI and the COVID-19 Vaccine: Moderna’s Dave Johnson,” *Me, Myself, and AI podcast*, ep. 209 (July 13, 2021), <https://sloanreview.mit.edu/audio/ai-and-the-covid-19-vaccine-modernas-dave-johnson>; “Moderna on AWS,” Amazon Web Services, accessed October 20, 2022, <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/innovators/moderna>; Bryce Elder, “Will Big Tobacco Save Us from the Coronavirus?,” *Financial Times*, April 1, 2020, <https://www.ft.com/content/f909fb16-f514-47da-97dc-c03e752dd2e1>.
- ¹³ Gary Polakovic, “Artificial Intelligence Aims to Outsmart the Mutating Coronavirus,” USC News, February 5, 2021, <https://news.usc.edu/181226/artificial-intelligence-ai-coronavirusvaccines-mutations-usc-research>; Zikun Yang et al., “An *In Silico* Deep Learning Approach to Multi-Epitope Vaccine Design: A SARS-CoV-2 Case Study,” *Scientific Reports* 11, article 3238 (February 5, 2021), <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81749-9>.
- ¹⁴ Para uma análise mais aprofundada do problema do enovelamento das proteínas, incluindo vídeos com visualizações úteis, consulte “The Protein Folding Revolution,” *Science Magazine*, YouTube video, July 21, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=cAJQbSLlonI>; “Protein Structure,” Professor Dave Explains, YouTube video, August 27, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=EweuU2fEgiw>; Ken Dill, “The Protein Folding Problem: A Major Conundrum of Science: Ken Dill at TEDxSBU,” TEDx Talks, YouTube video, October 22, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=zm-3kovWpNQ>; Ken A. Dill et al., “The Protein Folding Problem,” *Annual Review of Biophysics* 37 (June 9, 2008): 289–316, <https://doi.org/10.1146/annurev.biophys.37.092707.153558>; Andrew W. Senior et al., “Improved Protein Structure

Prediction Using Potentials from Deep Learning,” *Nature* 577, no. 7792 (January 15, 2020), <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1923-7>.

¹⁵ Para mais detalhes sobre como o AlphaFold original alcançou um grande progresso no enovelamento de proteínas, veja Andrew W. Senior et al., “AlphaFold: Using AI for Scientific Discovery,” DeepMind, January 15, 2020, <https://deepmind.com/blog/article/AlphaFold-Using-AI-for-scientific-discovery>; Andrew Senior, “AlphaFold: Improved Protein Structure Prediction Using Potentials from Deep Learning,” Institute for Protein Design, YouTube video, August 23, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=uQ1uVbrlv-Q>; Greg Williams, “Inside DeepMind’s Epic Mission to Solve Science’s Trickiest Problem,” *Wired*, August 6, 2019, <https://www.wired.co.uk/article/deepmind-protein-folding>; Senior et al., “Improved Protein Structure Prediction Using Potentials from Deep Learning,” 706–10.

¹⁶ Ian Sample, “Google’s DeepMind Predicts 3D Shapes of Proteins,” *Guardian*, December 2, 2018, <https://www.theguardian.com/science/2018/dec/02/google-deepminds-ai-programalphafold-predicts-3d-shapes-of-proteins>; Matt Reynolds, “DeepMind’s AI Is Getting Closer to Its First Big Real-World Application,” *Wired*, January 15, 2020, <https://www.wired.co.uk/article/deepmind-protein-folding-alphafold>.

¹⁷ Para explicações mais detalhadas do AlphaFold 2 e do artigo científico que o descreve, consulte “AlphaFold: The Making of a Scientific Breakthrough,” DeepMind, YouTube video, November 30, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=gg7WjuFs8F4>; “DeepMind Solves Protein Folding | AlphaFold 2,” Lex Fridman, YouTube video, December 2, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=W7wJDJ56c88>; Ewen Callaway, “‘It Will Change Everything’: DeepMind’s AI Makes Gigantic Leap in Solving Protein Structures,” *Nature* 588, no. 7837 (November 30, 2020): 203–4, <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03348-4>; Demis Hassabis, “Putting the Power of AlphaFold into the World’s Hands,” DeepMind, July 22, 2022, <https://deepmind.com/blog/article/putting-the-power-of-alphafold-into-the-worlds-hands>; John Jumper et al., “Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold,” *Nature* 596, no. 7873 (July 15, 2021): 583–89, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>.

¹⁸ Mohammed AlQuraishi, “Protein-Structure Prediction Revolutionized,” *Nature* 596, no. 7873 (August 23, 2021): 487–88, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02265-4>.

¹⁹ Hassabis, “Putting the Power of AlphaFold into the World’s Hands”; Jumper et al., “Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold.”

²⁰ Para explicações relativamente simples destes métodos, veja National Cancer Institute, “CAR T Cells: Engineering Patients’ Immune Cells to Treat Their Cancers,” National Institutes of Health, March 10, 2022, <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/research/car-t-cells>; “BiTE: The Engager,” Amgen, 2022, <https://www.amgenoncology.com/resources/BiTE-the-Engager.pdf>; “Immune Checkpoint Inhibitor Cancer Treatment,” Memorial Sloan Kettering Cancer Center, accessed October 20, 2022, <https://www.mskcc.org/cancer-care/diagnosis/treatment/cancer-treatments/immunotherapy/checkpoint-inhibitors>.

²¹ Robert C. Sterner and Rosalie M. Sterner, “CAR-T Cell Therapy: Current Limitations and Potential Strategies,” *Blood Cancer Journal* 11, article 69 (April 6, 2021), <https://doi.org/10.1038/s41408-021-00459-7>.

²² Para resumos sucintos dos mecanismos teorizados das doenças neurodegenerativas, veja “Alzheimer’s Disease,” Mayo Clinic, February 19, 2022, <https://www.mayoclinic.org/diseasesconditions/alzheimers-disease/symptoms-causes/syc-20350447>; “Parkinson’s Disease,” Mayo Clinic, July 8, 2022, <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/parkinsonsdisease/symptoms-causes/syc-20376055>.

²³ “About Mental Health,” Centers for Disease Control and Prevention, June 28, 2021, <https://www.cdc.gov/mentalhealth/learn/index.htm>.

²⁴ Para mais informações sobre as limitações dos medicamentos psiquiátricos comuns, consulte Melinda Wenner Moyer, “How Much Do Antidepressants Help, Really?,” *New York Times*, April 21, 2022, <https://www.nytimes.com/2022/04/21/well/antidepressants-ssri-effectiveness.html>; Harvard Health Publishing, “What Are the Real Risks of Antidepressants?,” Harvard Medical School, August 17, 2021, https://www.health.harvard.edu/newsletter_article/what-are-the-real-risks-of-antidepressants; Krishna C. Vadodaria et al.,

“Altered Serotonergic Circuitry in SSRI-Resistant Major Depressive Disorder Patient-Derived Neurons,” *Molecular Psychiatry* 24 (March 22, 2019): 808–18, <https://doi.org/10.1038/s41380-019-0377-5>.

²⁵ Para mais informações sobre a introdução de simulações in silico no domínio da saúde, consulte Fleming, “How Artificial Intelligence Is Changing Drug Discovery”; Madhumita Murgia, “AI-Designed Drug to Enter Human Clinical Trial for First Time,” *Financial Times*, January 30, 2020, <https://www.ft.com/content/fe55190e-42bf-11ea-a43a-c4b328d9061c>; Osman N. Yogurtcu et al., “TCPro Simulates Immune System Response to Biotherapeutic Drugs,” US Food and Drug Administration, September 17, 2019, <https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/science-research-biologics/tcpro-simulates-immune-system-response-biotherapeuticdrugs>; Tina Morrison, “How Simulation Can Transform Regulatory Pathways,” US Food and Drug Administration, August 14, 2018, <https://www.fda.gov/science-research/about-science-research-fda/how-simulation-can-transform-regulatory-pathways>; Anna Edney, “Computer-Simulated Tests Eyed at FDA to Cut Drug Approval Costs,” *Bloomberg*, July 7, 2017, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-07-07/drug-agency-looks-to-computer-simulations-to-cut-testing-costs>; “Virtual Bodies for Real Drugs: In Silico Clinical Trials Are the Future,” *The Medical Futurist*, August 10, 2019, <https://medicalfuturist.com/in-silico-trials-are-the-future>; Pratik Shah et al., “Artificial Intelligence and Machine Learning in Clinical Development: A Translational Perspective,” *NPJ Digital Medicine* 2, no. 69 (July 26, 2019), <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0148-3>; Neil Savage, “Tapping into the Drug Discovery Potential of AI,” *Biopharma Dealmakers* 15, no. 2 (May 27, 2021), <https://doi.org/10.1038/d43747-021-00045-7>.

²⁶ Ray Kurzweil, “AI-Powered Biotech Can Help Deploy a Vaccine in Record Time,” *Wired*, May 19, 2020, <https://www.wired.com/story/opinion-ai-powered-biotech-can-help-deploy-a-vaccine-in-record-time>; Aaron Dubrow, “AI Fast-Tracks Drug Discovery to Fight COVID-19,” Texas Advanced Computing Center, April 22, 2020, <https://www.tacc.utexas.edu/-/ai-fasttracks-drug-discovery-to-fight-covid-19>; Thompson, “How Long Will a Vaccine Really Take?”; Tina Morrison et al., “Advancing Regulatory Science with Computational Modeling for Medical Devices at the FDA’s Office of Science and Engineering Laboratories,” *Frontiers in Medicine* 5, article 241 (September 25, 2018), <https://doi.org/10.3389/fmed.2018.00241>.

²⁷ “The Drug Development Process: Step 3: Clinical Research,” US Food and Drug Administration.

²⁸ Daniel Bastardo Blanco, “Our Cells Are Filled with ‘Junk DNA’—Here’s Why We Need It,” *Discover*, August 13, 2019, <https://www.discovermagazine.com/health/our-cells-are-filled-with-junk-dna-heres-why-we-need-it>.

²⁹ Jian Zhou et al., “Whole-Genome Deep-Learning Analysis Identifies Contribution of Noncoding Mutations to Autism Risk,” *Nature Genetics* 51, no. 6 (May 27, 2019): 973–80, <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0420-0>; Thomas Sumner, “New Causes of Autism Found in ‘Junk’ DNA,” Simons Foundation, May 27, 2019, <https://www.simonsfoundation.org/2019/05/27/autism-noncoding-mutations>.

³⁰ Sumner, “New Causes of Autism Found in ‘Junk’ DNA.”

³¹ Nancy Fliesler, “Using Multiple Data Streams and Artificial Intelligence to ‘Nowcast’ Local Flu Outbreaks,” *Vector*, Boston Children’s Hospital, January 14, 2019, <https://web.archive.org/web/20210121214157/https://vector.childrenshospital.org/2019/01/local-flu-prediction-argonet>.

³² Fliesler, “Using Multiple Data Streams and Artificial Intelligence to ‘Nowcast’ Local Flu Outbreaks.”

³³ Fliesler, “Using Multiple Data Streams and Artificial Intelligence to ‘Nowcast’ Local Flu Outbreaks.”

³⁴ Fliesler, “Using Multiple Data Streams and Artificial Intelligence to ‘Nowcast’ Local Flu Outbreaks”; Fred S. Lu et al., “Improved State-Level Influenza Nowcasting in the United States Leveraging Internet-Based Data and Network Approaches,” *Nature Communications* 10, article 147 (January 11, 2019), <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08082-0>.

³⁵ Para mais detalhes sobre o CheXNet e o seu sucessor, o CheXpert, consulte “CheXNet and Beyond,” Matthew Lungren, YouTube video, November 10, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=JqYte9UMJCg>; Pranav Rajpurkar et al., “CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning,” Stanford Machine Learning Group working paper, November 14, 2017, <https://arxiv.org/pdf/1711.05225v1.pdf>; Jeremy Irvin et al., “CheXpert: A Large Chest Radiograph

Dataset with Uncertainty Labels and Expert Comparison,” *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* 33, no. 1 (July 17, 2019): AAAI-10, IAAI-19, EAAI-20, <https://www.aaai.org/ojs/index.php/AAAI/article/view/3834>.

³⁶ Huiying Liang et al., “Evaluation and Accurate Diagnoses of Pediatric Diseases Using Artificial Intelligence,” *Nature Medicine* 25, no. 3 (February 11, 2019): 433–38, <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0335-9>.

³⁷ Dimitrios Mathios et al., “Detection and Characterization of Lung Cancer Using Cell-Free DNA Fragmentomes,” *Nature Communications* 12, article 5060 (August 20, 2021), <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24994-w>.

³⁸ Sophie Bushwick, “Algorithm That Detects Sepsis Cut Deaths by Nearly 20 Percent,” *Scientific American*, August 1, 2022, <https://www.scientificamerican.com/article/algorithm-that-detects-sepsis-cut-deaths-by-nearly-20-percent/>; Roy Adams et al., “Prospective, Multi-Site Study of Patient Outcomes After Implementation of the TREWS Machine Learning-Based Early Warning System for Sepsis,” *Nature Medicine* 28 (July 21, 2022): 1455–60, <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01894-0>; Katharine E. Henry et al., “Factors Driving Provider Adoption of the TREWS Machine Learning-Based Early Warning System and Its Effects on Sepsis Treatment Timing,” *Nature Medicine* 28 (July 21, 2022), 1447–54, <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01895-z>.

³⁹ Lungren, “CheXNet and Beyond”; Rajpurkar et al., “CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection”; Irvin et al., “CheXpert: A Large Chest Radiograph Dataset with Uncertainty Labels and Expert Comparison,” AAAI-10, IAAI-19, EAAI-20; Thomas Davenport and Ravi Kalakota, “The Potential for Artificial Intelligence in Healthcare,” *Future Healthcare Journal* 6, no. 2 (June 2019): 94–98, <https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-94>.

⁴⁰ Dario Amodei and Danny Hernandez, “AI and Compute,” OpenAI, May 16, 2018, <https://openai.com/blog/ai-and-compute>.

⁴¹ Eliza Strickland, “Autonomous Robot Surgeon Bests Humans in World First,” *IEEE Spectrum*, May 4, 2016, <https://spectrum.ieee.org/the-human-os/robotics/medical-robots/autonomousrobot-surgeon-bests-human-surgeons-in-world-first>.

⁴² Alice Yan, “Chinese Robot Dentist Is First to Fit Implants in Patient’s Mouth Without Any Human Involvement,” *South China Morning Post*, September 21, 2017, <https://www.scmp.com/news/china/article/2112197/chinese-robot-dentist-first-fit-implantpatients-mouth-without-any-human>.

⁴³ Para a apresentação de Elon Musk sobre a tecnologia de implantação automatizada de elétrodos da Neuralink, consulte “Neuralink: Elon Musk’s Entire Brain Chip Presentation in 14 Minutes (Supercut),” CNET, YouTube video, August 28, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=CLUWDLKAF1M>.

⁴⁴ Wallace P. Ritchie Jr., Robert S. Rhodes, and Thomas W. Biester, “Work Loads and Practice Patterns of General Surgeons in the United States, 1995–1997,” *Annals of Surgery* 230, no. 4 (October 1999): 533–43, <https://doi.org/10.1097/00000658-199910000-00009>.

⁴⁵ Hans Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence (Crianças Mentais: O Futuro da Inteligência Robótica e Humana)* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988).

⁴⁶ Peter Weibel, “Virtual Worlds: The Emperor’s New Bodies,” in *Ars Electronica: Facing the Future*, ed. Timothy Druckery (Cambridge, MA: MIT Press, 1999), 215, https://monoskop.org/images/4/47/Ars_Electronica_Facing_the_Future_A_Survey_of_Two_Decades_1999.pdf.

⁴⁷ “Neuron Firing Rates in Humans,” AI Impacts, April 14, 2015, <https://aiimpacts.org/rate-ofneuron-firing/>; Suzanaerculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaledup Primate Brain,” *Frontiers in Human Neuroscience* 3, no. 31 (November 9, 2009), <https://doi.org/10.3389/neuro.09.031.2009>; David A. Drachman, “Do We Have Brain to Spare?,” *Neurology* 64, no. 12 (June 27, 2005), <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000166914.38327.BB>; Antony Leather, “Intel Fires Back at AMD with Fastest Ever Processors: Mobile CPUs with up to 8 Cores and 5.3GHz Inbound,” *Forbes*, April 2, 2020, <https://www.forbes.com/sites/antonyleather/2020/04/02/intel-fires-backat-amd-with-fastest-ever-processors-mobile-cpus-with-up-to-8-cores-and-53ghzinbound/#210c5243643d>.

-
- ⁴⁸ Mladen Božanić and Saurabh Sinha, “Emerging Transistor Technologies Capable of Terahertz Amplification: A Way to Re-Engineer Terahertz Radar Sensors,” *Sensors* 19, no. 11 (May 29, 2019), <https://doi.org/10.3390/s19112454>; “Intel Core i9-10900K Processor,” Intel, accessed December 23, 2022, <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/199332/intel-corei910900k-processor-20m-cache-up-to-5-30-ghz.html>.
- ⁴⁹ Ray Kurzweil, *A Singularidade Está Próxima* (New York: Viking, 2005), 125; Moravec, *Mind Children*, 59.
- ⁵⁰ “June 2022,” Top500.org, accessed October 20, 2022, <https://www.top500.org/lists/top500/2022/06>.
- ⁵¹ Para um ensaio adaptado da conferência de Feynman de 29 de dezembro de 1959, veja Richard Feynman, “There’s Plenty of Room at the Bottom,” *Engineering and Science* 23, no. 5 (February 1960): 22–26, 30–36, <http://calteches.library.caltech.edu/47/2/1960Bottom.pdf>.
- ⁵² Feynman, “There’s Plenty of Room at the Bottom,” 22–26, 30–36.
- ⁵³ John von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata* (Urbana, IL: University of Illinois Press, 1966), https://archive.org/details/theoryofselfre00vonn_0/mode/2up; John G. Kemeny, “Man Viewed as a Machine,” *Scientific American* 192, no. 4 (April 1955): 58–67, in nearly complete form at <https://dijkstrastry.com/sites/default/files/papers/JohnKemenyManViewedasaMachine.pdf> [inactive].
- ⁵⁴ Von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata*, 251–96, 377.
- ⁵⁵ Para os livros originais de Drexler, veja K. Eric Drexler, *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* (Motores da Criação: A Era da Nanotecnologia que se Aproxima) (New York: Anchor Press/Doubleday, 1986); K. Eric Drexler, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation* (Nanossistemas: Maquinaria Molecular, Fabrico e Computação) (Hoboken, NJ: Wiley, 1992).
- ⁵⁶ Drexler, *Engines of Creation*, 18–19, 105–8, 247.
- ⁵⁷ Drexler, *Nanosystems*, 343–66.
- ⁵⁸ Drexler, *Nanosystems*, 354–55.
- ⁵⁹ Ralph C. Merkle, et al., “Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 10, no. 6, article 061006, September 17, 2018, arXiv:1801.03534v2 [cs.ET], March 25, 2019, <https://arxiv.org/pdf/1801.03534.pdf>.
- ⁶⁰ O projeto de Merkle et al. para uma “porta lógica mecânica molecular” é constituída por 87.595 átomos de carbono e 33.100 átomos de hidrogênio. Ocupa um volume de cerca de 27 nm x 32 nm x 7 nm, ou 6.048 nanômetros cúbicos. Isto corresponde a cerca de $1,65 \times 10^{20}$ (165 quintilhões) portas lógicas por litro de volume. A uma frequência de funcionamento projetada de 100 MHz, isto sugere um máximo de 10^{28} operações de porta por segundo por litro de volume de computação. Tenha em mente que estes são máximos altamente teóricos, excluindo as limitações de engenharia. Ainda não se sabe o quão perto destes máximos os computadores à escala nano conseguem realmente chegar. Veja Merkle et al., “*Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints*,” arXiv, 24–27; Drexler, *Nanosystems*, 370–71.
- ⁶¹ Segundo Merkle et al., cada operação da porta lógica acima descrita gastaria cerca de 10^{26} joules (uma ordem de grandeza superior aos 10^{27} por junta rotativa). Assim, as 10^{28} operações por segundo neste hipotético computador de um litro gastariam cerca de 100 watts. Veja Merkle et al., “*Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints*,” arXiv, 24–27.
- ⁶² Liqun Luo, “Why Is the Human Brain So Efficient?,” *Nautilus*, April 12, 2018, <http://nautil.us/issue/59/connections/why-is-the-human-brain-so-efficient>.
- ⁶³ Ralph C. Merkle, “Design Considerations for an Assembler,” *Nanotechnology* 7, no. 3 (September 1996): 210–15, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/7/3/008>, mirrored in similar version at <http://www.zyvex.com/nanotech/nano4/merklePaper.html>.

⁶⁴ Merkle, “Design Considerations for an Assembler,” 210–15; Ralph. C. Merkle, “Self Replicating Systems and Molecular Manufacturing,” *Journal of the British Interplanetary Society* 45, no. 12 (December 1992): 407–13, available in adapted version at <http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepJBIS.html>; Neil Jacobstein, “Foresight Guidelines for Responsible Nanotechnology Development,” Foresight Institute, April 2006, <https://foresight.org/guidelines/current.php>.

⁶⁵ Robert A. Freitas Jr., “The Gray Goo Problem,” KurzweilAI.net, March 20, 2001, <https://www.kurzweilai.net/the-gray-goo-problem> [inactive]; Robert A. Freitas Jr., “Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations,” Foresight Institute, April 2000, <http://www.rfreitas.com/Nano/Ecophagy.htm>.

⁶⁶ James Lewis, “Ultrafast DNA Robotic Arm: A Step Toward a Nanofactory?,” Foresight Institute, January 25, 2018, <https://foresight.org/ultrafast-robotic-arm-step-toward-nanofactory>; Kohji Tomita et al., “Self-Description for Construction and Execution in Graph Rewriting Automata,” in *Advances in Artificial Life: 8th European Conference, ECAL 2005*, Canterbury, UK, September 5–9, 2005, Proceedings, ed. Mathieu S. Capcarrere et al. (Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media, 2005), 705–14.

⁶⁷ Para mais detalhes sobre as tentativas bem-sucedidas de construir máquinas e peças de máquinas em nanoescala funcionais, consulte Eric Drexler, “Big Nanotech: Building a New World with Atomic Precision,” *Guardian*, October 21, 2013, <https://www.theguardian.com/science/small-world/2013/oct/21/bignanotech-atomically-precise-manufacturing-apm>; Mark Peplow, “The Tiniest Lego: A Tale of Nanoscale Motors, Rotors, Switches and Pumps,” *Nature* 525, no. 7567 (September 2, 2015): 18–21, <https://doi.org/10.1038/525018a>; Carlos Manzano et al., “Step-by-Step Rotation of a Molecule-Gear Mounted on an Atomic-Scale Axis,” *Nature Materials* 8, no. 6 (June 14, 2009): 576–79, <https://doi.org/10.1038/nmat2467>; Babak Kateb and John D. Heiss, *The Textbook of Nanoneuroscience and Nanoneurosurgery* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2013): 500–501, https://www.google.com/books/edition/The_Textbook_of_Nanoneuroscience_and_Nan/rCbOBQAAQBAJ; Torben Jasper-Toennies et al., “Rotation of Ethoxy and Ethyl Moieties on a Molecular Platform on Au(111),” *ACS Nano* 14, no. 4 (February 19, 2020): 3907–16, <https://doi.org/10.1021/acs.nano.0c00029>; Kwanoh Kim et al., “Man-Made Rotary Nanomotors: A Review of Recent Development,” *Nanoscale* 8, no. 20 (May 19, 2016): 10471–90, <https://doi.org/10.1039/c5nr08768f>; The Optical Society, “Nanoscale Machines Convert Light into Work,” *Phys.org*, October 8, 2020, <https://phys.org/news/2020-10-nanoscalemachines.html>.

⁶⁸ Para o debate original Drexler-Smalley, o meu comentário, duas palestras Drexler e uma amostra de investigação recente que abre caminho para os montadores moleculares, veja Richard E. Smalley, “Of Chemistry, Love and Nanobots,” *Scientific American*, September 2001, <https://www.scientificamerican.com/article/of-chemistry-love-and-nanobots>; Rudy Baum, “Nanotechnology: Drexler and Smalley Make the Case for and Against ‘Molecular Assemblers,’” *Chemical & Engineering News* 81, no. 48 (September 8, 2003): 37–42, <https://web.archive.org/web/20230116122623/http://pubsapp.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>; Eric Drexler, “Transforming the Material Basis of Civilization | Eric Drexler | TEDxISTAlameda,” TEDx Talks, YouTube video, November 16, 2015, https://www.youtube.com/watch?v=Q9RiB_o7Szs; Eric Drexler, “Dr. Eric Drexler—The Path to Atomically Precise Manufacturing,” The Artificial Intelligence Channel, YouTube video, September 18, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=dAA-HWMAf9o>; UT-Battelle, Productive Nanosystems: A Technology Roadmap, Battelle Memorial Institute and Foresight Nanotech Institute, 2007, https://foresight.org/wpcontent/uploads/2023/05/Nanotech_Roadmap_2007_main.pdf; James Lewis, “Atomically Precise Manufacturing as the Future of Nanotechnology,” Foresight Institute, March 8, 2015, <https://foresight.org/atomically-precise-manufacturing-as-the-future-of-nanotechnology>; Xiqiao Wang et al., “Atomic-Scale Control of Tunneling in Donor-Based Devices,” *Communications Physics* 3, article 82 (May 11, 2020), <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0343-1>; “Paving the Way for Atomically Precise Manufacturing,” UT Dallas, YouTube video, February 9, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=or3jYNZ6fn8>; University of Texas at Dallas, “Microscopy Breakthrough Paves the Way for Atomically Precise Manufacturing,” *Phys.org*, February 12, 2018, <https://phys.org/news/2018-02-microscopy-breakthrough-paves-atomically-precise.html>; Kiel University, “Towards a Light Driven Molecular Assembler,” *Phys.org*, July 23, 2019, <https://phys.org/news/2019-07-driven-molecular.html>; Jonathan Wyrick et al., “Atom-by-Atom Fabrication of Single and Few Dopant Quantum Devices,” *Advanced Functional Materials* 29, no. 52 (August 14, 2019), <https://doi.org/10.1002/adfm.201903475>; Farid Tajaddodianfar et al., “On the Effect of Local Barrier Height in Scanning Tunneling Microscopy: Measurement Methods and Control Implications,” *Review of Scientific Instruments* 89, no. 1, article 013701 (January 2, 2018), <https://doi.org/10.1063/1.5003851>.

- ⁶⁹ Ray Kurzweil, “The Drexler-Smalley Debate on Molecular Assembly,” KurzweilAI.net, December 1, 2003, <https://www.kurzweilai.net/the-drexler-smalley-debate-on-molecularassembly> [inactive].
- ⁷⁰ Drexler, *Nanosystems*, 398–410.
- ⁷¹ Drexler, *Nanosystems*, 238–49, 458–68.
- ⁷² Drexler, *Engines of Creation*; Drexler, *Nanosystems*; Dexter Johnson, “Diamondoids on Verge of Key Application Breakthroughs,” *IEEE Spectrum*, March 31, 2017, <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/materials/diamondoids-on-verge-of-keyapplication-breakthroughs>.
- ⁷³ Neal Stephenson, *The Diamond Age: Or, a Young Lady’s Illustrated Primer* (New York: Bantam, 1995).
- ⁷⁴ Matthew A. Gebbie et al., “Experimental Measurement of the Diamond Nucleation Landscape Reveals Classical and Nonclassical Features,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, no. 33 (August 14, 2018): 8284–89, <https://doi.org/10.1073/pnas.1803654115>.
- ⁷⁵ Hongyao Xie et al., “Large Thermal Conductivity Drops in the Diamondoid Lattice of CuFeS₂ by Discordant Atom Doping,” *Journal of the American Chemical Society* 141, no. 47 (November 2, 2019): 18900–909, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b10983>; Shenggao Liu, Jeremy Dahl, and Robert Carlson, “Heteroatom-Containing Diamondoid Transistors,” U.S. Patent 7,402,835 (filed July 16, 2003; issued July 22, 2008), US Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US7402835B2/en>.
- ⁷⁶ Veja, por exemplo, Robert A. Freitas Jr., “A Simple Tool for Positional Diamond Mechanosynthesis, and Its Method of Manufacture,” U.S. Patent 7,687,146 (filed February 11, 2005; issued March 30, 2010), US Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US7687146B1/en>; Samuel Stolz et al., “Molecular Motor Crossing the Frontier of Classical to Quantum Tunneling Motion,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, no. 26 (June 15, 2020): 14838–42, <https://doi.org/10.1073/pnas.1918654117>; Haifei Zhan et al., “From Brittle to Ductile: A Structure Dependent Ductility of Diamond Nanothread,” *Nanoscale* 8, no. 21 (May 10, 2016): 11177–84, <https://doi.org/10.1039/C6NR02414A>.
- ⁷⁷ Para mais informações sobre esta proposta e ligações para uma vasta gama de outros artigos de Merkle sobre nanotecnologia, consulte Ralph C. Merkle, “A Proposed ‘Metabolism’ for a Hydrocarbon Assembler,” *Nanotechnology* 8, no. 4 (December 1997): 149–62, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/8/4/001/meta>, mirrored at <http://www.zyvex.com/nanotech/hydroCarbonMetabolism.html>; “Papers by Ralph C. Merkle,” Merkle.com, accessed October 20, 2022, <https://www.ralphmerkle.com/merkleDir/papers.html>.
- ⁷⁸ Merkle, “A Proposed ‘Metabolism’ for a Hydrocarbon Assembler.”
- ⁷⁹ Para uma pequena amostra de avanços no grafeno, nanotubos de carbono e nanofios de carbono, incluindo um impressionante projeto do MIT para criar um chip de computador de 14.000 transístores feito inteiramente de nanotubos de carbono, veja “The Graphene Times,” *Nature Nanotechnology* 14, no. 10, article 903 (October 3, 2019), <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0561-4>; “Nova: Carbon Nanotubes,” Mangefox, YouTube video, January 28, 2011, <https://www.youtube.com/watch?v=19nzPt62UPg>; Elizabeth Gibney, “Biggest Carbon-Nanotube Chip Yet Says ‘Hello, World!’,” *Nature*, August 28, 2019, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02576->; Haifei Zhan et al., “The Best Features of Diamond Nanothread for Nanofibre Applications,” *Nature Communications* 8, article 14863 (March 17, 2017), <https://doi.org/10.1038/ncomms14863>; Haifei Zhan et al., “High Density Mechanical Energy Storage with Carbon Nanothread Bundle,” *Nature Communications* 11, article 1905 (April 20, 2020), <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15807-7>; Keigo Otsuka et al., “Deterministic Transfer of Optical-Quality Carbon Nanotubes for Atomically Defined Technology,” *Nature Communications* 12, article 3138 (May 25, 2021), <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23413-4>.
- ⁸⁰ Provavelmente, o trabalho mais detalhado até agora sobre como realizar a mecanossíntese baseada em diamantoides é o estudo de 2008 de Robert Freitas e Ralph Merkle sobre as vias de reação necessárias para a nanofabricação versátil. Veja Robert A. Freitas Jr. and Ralph C. Merkle, “A Minimal Toolset for Positional Diamond Mechanosynthesis,” *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 5, no. 5 (May 2008): 760–862, <https://doi.org/10.1166/jctn.2008.2531>, mirrored at <http://www.molecularassembler.com/Papers/MinToolset.pdf>.

- ⁸¹ Masayuki Endo and Hiroshi Sugiyama, "DNA Origami Nanomachines," *Molecules* 23, no. 7 (article 1766), July 18, 2018, <https://doi.org/10.3390/molecules23071766>; Fei Wang et al., "Programming Motions of DNA Origami Nanomachines," *Small* 15, no. 26, article 1900013 (March 25, 2019), <https://doi.org/10.1002/sml.201900013>.
- ⁸² Suping Li et al., "A DNA Nanorobot Functions as a Cancer Therapeutic in Response to a Molecular Trigger *In Vivo*," *Nature Biotechnology* 36, no. 3 (February 12, 2018): 258–64, <https://doi.org/10.1038/nbt.4071>; Stephanie Lauback et al., "Real-Time Magnetic Actuation of DNA Nanodevices via Modular Integration with Stiff Micro-Mevers," *Nature Communications* 9, no. 1, article 1446 (April 13, 2018), <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03601-5>.
- ⁸³ Liang Zhang, Vanesa Marcos, and David A. Leigh, "Molecular Machines with Bio-Inspired Mechanisms," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, no. 38 (February 26, 2018), <https://doi.org/10.1073/pnas.1712788115>.
- ⁸⁴ Christian E. Schafmeister, "Molecular Lego," *Scientific American*, February 2007, <https://www.scientificamerican.com/article/molecular-lego>.
- ⁸⁵ Matthias Koch et al., "Spin Read-Out in Atomic Qubits in an All-Epitaxial Three-Dimensional Transistor," *Nature Nanotechnology* 14, no. 2 (January 7, 2019): 137–40, <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0338-1>.
- ⁸⁶ Mukesh Tripathi et al., "Electron-Beam Manipulation of Silicon Dopants in Graphene," *Nano Letters* 18, no. 8 (June 27, 2018): 5319–23, <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b02406>.
- ⁸⁷ John N. Randall et al., "Digital Atomic Scale Fabrication an Inverse Moore's Law — A Path to Atomically Precise Manufacturing," *Micro and Nano Engineering* 1 (November 2018): 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.mne.2018.11.001>.
- ⁸⁸ Roshan Achal et al., "Lithography for Robust and Editable Atomic-Scale Silicon Devices and Memories," *Nature Communications* 9, no. 1, article 2778 (July 23, 2018), <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05171-y>.
- ⁸⁹ Chalmers University of Technology, "Graphene and Other Carbon Nanomaterials Can Replace Scarce Metals," *Phys.org*, September 19, 2017, <https://phys.org/news/2017-09-graphenecarbon-nanomaterials-scarce-metals.html>; Rickard Arvisson and Björn A. Sandén, "Carbon Nanomaterials as Potential Substitutes for Scarce Metals," *Journal of Cleaner Production* 156 (July 10, 2017): 253–61, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.048>.
- ⁹⁰ K. Eric Drexler, *Radical Abundance: How a Revolution in Nanotechnology Will Change Civilization* (New York: PublicAffairs, 2013), 168–72.
- ⁹¹ Paul Sullivan, "A Battle over Diamonds: Made by Nature or in a Lab?," *New York Times*, February 9, 2018, <https://www.nytimes.com/2018/02/09/your-money/synthetic-diamondjewelry.html>.
- ⁹² Milton Esterow, "Art Experts Warn of a Surging Market in Fake Prints," *New York Times*, January 24, 2020, <https://www.nytimes.com/2020/01/24/arts/design/fake-art-prints.html>; Kelly Crow, "Leonardo da Vinci Painting 'Salvator Mundi' Smashes Records with \$450.3 Million Sale," *Wall Street Journal*, November 16, 2017, <https://www.wsj.com/articles/leonardo-davinci-painting-salvator-mundi-sells-for-450-3-million-1510794281>.
- ⁹³ Ray Kurzweil e Terry Grossman, *Transcender: nove passos para viver bem para sempre* (Emmaus, PA: Rodale, 2009).
- ⁹⁴ Para mais recursos sobre a investigação recente em biogerontologia orientada para a compreensão e cura do envelhecimento, consulte "Why Age? Should We End Aging Forever?," Kurzgesagt—In a Nutshell, YouTube video, October 20, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=GoJsr4lwCm4>; "How to Cure Aging—During Your Lifetime?," Kurzgesagt—In a Nutshell, YouTube video, November 3, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=MjdpR-TY6QU>; "Daphne Koller, Chief Computing Officer, Calico Labs," CB Insights, YouTube video, January 18, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=OEIZ8wJYAEA>; "Ray Kurzweil—Physical Immortality," Aging Reversed, YouTube video, January 3, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=BUExzREe9oo>; Peter H. Diamandis, "Nanorobots: Where We Are Today and Why Their Future Has Amazing Potential," SingularityHub, May 16, 2016, <https://singularityhub.com/2016/05/16/nanorobots-where-we-are-today-and-why-their-futurehas-amazing-potential>.

-
- ⁹⁵ Nicola Davis, “Human Lifespan Has Hit Its Natural Limit, Research Suggests,” *Guardian*, October 5, 2016, <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/05/human-lifespan-has-hit-its-natural-limit-research-suggests>; Craig R. Whitney, “Jeanne Calment, World’s Elder, Dies at 122,” *New York Times*, August 5, 1997, <https://www.nytimes.com/1997/08/05/world/jeannecalment-world-s-elder-dies-at-122.html>.
- ⁹⁶ “Actuarial Life Table,” US Social Security Administration, accessed October 20, 2022, <https://www.ssa.gov/oact/STATS/table4c6.html>.
- ⁹⁷ France Meslé and Jacques Vallin, “Causes of Death at Very Old Ages, Including for Supercentenarians,” in *Exceptional Lifespans*, ed. Heiner Maier et al. (Cham, Switzerland: Springer, 2020): 72–82, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-49970-9.pdf?pdf=button>.
- ⁹⁸ “Aubrey De Grey—Living to 1,000 Years Old,” *Aging Reversed*, YouTube video, May 26, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=ZkMPZ8obByw>; “One-on-One: An Investigative Interview with Aubrey de Grey — 44th St. Gallen Symposium,” *StGallenSymposium*, YouTube video, May 8, 2014, https://www.youtube.com/watch?v=DkBfT_EPBlo; “Aubrey de Grey, PhD: ‘The Science of Curing Aging,’ ” *Talks at Google*, YouTube video, January 4, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=S6ARUQ5LoUo>.
- ⁹⁹ “A Reimagined Research Strategy for Aging,” *SENS Research Foundation*, accessed December 27, 2022, <https://web.archive.org/web/20221118080039/https://www.sens.org/ourresearch/intro-to-sens-research>.
- ¹⁰⁰ “Longevity: Reaching Escape Velocity,” *Foresight Institute*, YouTube video, December 12, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=M4b19vZ57U4>.
- ¹⁰¹ Richard Zijdeman and Filipa Ribeira da Silva, “Life Expectancy at Birth (Total),” *IISH Data Collection*, V1 (2015), <https://hdl.handle.net/10622/LKYT53>.
- ¹⁰² Robert A. Freitas Jr., “The Life-Saving Future of Medicine,” *Guardian*, March 28, 2014, <https://www.theguardian.com/what-is-nano/nano-and-the-life-saving-future-of-medicine>.
- ¹⁰³ Jacqueline Krim, “Friction at the Nano-Scale,” *Physics World*, February 2, 2005, <https://physicsworld.com/a/friction-at-the-nano-scale>.
- ¹⁰⁴ Rose Eveleth, “There Are 37.2 Trillion Cells in Your Body,” *Smithsonian Magazine*, October 24, 2013, <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/there-are-372-trillion-cells-in-yourbody-4941473>.
- ¹⁰⁵ Para explicações úteis e acessíveis sobre o sistema imunitário e as hormonas, consulte “How the Immune System Actually Works—Immune,” *Kurzgesagt—In a Nutshell*, YouTube video, August 10, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=IXfEK8G8CUI>; “How Does Your Immune System Work? — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, January 8, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=PSRJfaAYk4>; “How Do Your Hormones Work? — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, June 21, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=-SPRPkLoKp8>.
- ¹⁰⁶ Para uma explicação útil e acessível sobre os pulmões, consulte “How Do Lungs Work? — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, November 24, 2014, <https://www.youtube.com/watch?v=8NUxvJS-0k>.
- ¹⁰⁷ Para uma explicação útil e acessível sobre os rins, consulte “How Do Your Kidneys Work? — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, February 9, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=FN3MFhYPWWo>.
- ¹⁰⁸ Para uma explicação útil e acessível sobre o sistema digestivo, consulte “How Your Digestive System Works — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, December 14, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=Og5xAdC8EUI>.
- ¹⁰⁹ Para uma explicação útil e acessível sobre o papel e a função do pâncreas, consulte “What Does the Pancreas Do? — Emma Bryce,” *TED-Ed*, YouTube video, February 19, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=8dgoeYPoE-0>.
- ¹¹⁰ George Dvorsky, “FDA Approves World’s First Automated Insulin Pump for Diabetics,” *Gizmodo*, September 29, 2016, <https://gizmodo.com/fda-approves-worlds-first-automatedinsulin-pump-for-di-1787227150>.

¹¹¹ Para explicações úteis e acessíveis sobre o papel das hormonas na diabetes, consulte “Role of Hormones in Diabetes,” Match Health, YouTube video, December 6, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=sPwoMm9cv1M>; Matthew McPheeters, “What Is Diabetes Mellitus? | Endocrine System Diseases | NCLEX-RN,” Khan Academy Medicine, YouTube video, May 14, 2015, <https://www.youtube.com/watch?v=ulxyWZf7BWc>.

¹¹² Para uma breve explicação não técnica da relação entre o sono e as hormonas, veja Hormone Health Network, “Sleep and Circadian Rhythm,” Hormone.org, Endocrine Society, June 2019, <https://www.hormone.org/your-health-and-hormones/sleep-and-circadian-rhythm>.

¹¹³ Para mais informações sobre a recorrência do cancro e as células estaminais cancerígenas, consulte “Why Is It So Hard to Cure Cancer? — Kyuson Yun,” TED-Ed, YouTube video, October 10, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=h2rR77VsF5c>; “Recurrent Cancer: When Cancer Comes Back,” National Cancer Institute, January 18, 2016, <https://www.cancer.gov/types/recurrent-cancer>; Kyle Davis, “Investigating Why Cancer Comes Back,” National Human Genome Research Institute, September 8, 2015, <https://www.genome.gov/news/news-release/Investigating-why-cancer-comes-back>.

¹¹⁴ Zuoren Yu et al., “Cancer Stem Cells,” *International Journal of Biochemical Cell Biology* 44, no. 12 (December 2012): 2144–51, <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2012.08.022>.

¹¹⁵ “How Does Chemotherapy Work? — Hyunsoo Joshua No,” TED-Ed, YouTube video, December 5, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=RgWQCGX3MOK>; “Why People with Cancer Are More Likely to Get Infections,” American Cancer Society, March 13, 2020, <https://www.cancer.org/treatment/treatments-and-side-effects/physical-side-effects/low-bloodcounts/infections/why-people-with-cancer-are-at-risk.html>.

¹¹⁶ Nirali Shah and Terry J. Fry, “Mechanisms of Resistance to CAR T Cell Therapy,” *Nature Reviews Clinical Oncology* 16 (March 5, 2019): 372–85, <https://doi.org/10.1038/s41571-019-0184-6>; Robert Vander Velde et al., “Resistance to Targeted Therapies as a Multifactorial, Gradual Adaptation to Inhibitor Specific Selective Pressures,” *Nature Communications* 11, article 2393 (May 14, 2020), <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16212-w>.

¹¹⁷ Para uma ótima explicação não técnica sobre a reprodução celular, veja Hank Green, “Mitosis: Splitting Up Is Complicated — Crash Course Biology #12,” CrashCourse, YouTube video, April 16, 2012, <https://www.youtube.com/watch?v=L0k-enzoeOM>.

¹¹⁸ Para uma breve introdução ao CRISPR, uma das abordagens de edição genética mais promissoras dentro do paradigma atual, veja Brad Plumer et al., “A Simple Guide to CRISPR, One of the Biggest Science Stories of the Decade,” Vox, updated December 27, 2018, <https://www.vox.com/2018/7/23/17594864/crispr-cas9-gene-editing>.

¹¹⁹ Eveleth, “There Are 37.2 Trillion Cells in Your Body.”

¹²⁰ Para uma visão introdutória deste processo, consulte “Regulation of Gene Expression: Operons, Epigenetics, and Transcription Factors,” Professor Dave Explains, YouTube video, October 15, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=J9jhg90A7Lw>.

¹²¹ Bert M. Verheijen and Fred W. van Leeuwen, “Commentary: The Landscape of Transcription Errors in Eukaryotic Cells,” *Frontiers in Genetics* 8, article 219 (December 14, 2017), <https://doi.org/10.3389/fgene.2017.00219>.

¹²² Patricia Mroczek, “Nanoparticle Chomps Away Plaques That Cause Heart Attacks,” MSUToday, Michigan State University, January 27, 2020, <https://msutoday.msu.edu/news/2020/nanoparticle-chomps-away-plaques-that-cause-heartattacks>; Alyssa M. Flores, *Nature Nanotechnology* 15, no. 2 (January 27, 2020): 154–61, <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0619-3>; Ira Tabas and Andrew H. Lichtman, “Monocyte-Macrophages and T Cells in Atherosclerosis,” *Immunity* 47, no. 4 (October 17, 2017): 621–34, <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2017.09.008>.

¹²³ American Stroke Association “Understanding Diagnosis and Treatment of Cryptogenic Stroke: A Health Care Professional Guide,” American Heart Association, 2019, <https://web.archive.org/web/20211023144019/https://www.stroke.org/-/media/strokefiles/cryptogenic-professional-resource-files/cryptogenic-professional-guide-ucm-477051.pdf>.

¹²⁴ Para uma explicação animada e básica sobre o enovelamento das proteínas, consulte “Protein Structure and Folding,” Amoeba Sisters, YouTube video, September 24, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=hok2hyED9go>.

¹²⁵ A taxa máxima de disparo (muito teórica) para os neurónios biológicos é algo em torno dos 1.000 hertz, enquanto o sistema de computação mecânica de nanoescala de Ralph Merkle poderá atingir cerca de 100 megahertz — cerca de 100.000 vezes mais rápido. As fibrilas de colagénio no organismo têm uma resistência à tração de cerca de 90 megapascals, enquanto os nanotubos de carbono de paredes múltiplas demonstraram experimentalmente ter uma resistência à tração de cerca de 63 gigapascals, e as nanoagulhas de diamante de até 98 gigapascals, enquanto o máximo teórico do diamantoide é de cerca de 100 gigapascals — todos na ordem de 1.000 vezes mais fortes do que o colagénio. Veja “Neuron Firing Rates in Humans,” *AI Impacts*; Ralph C. Merkle et al., “Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints,” 24–27; Yehe Liu, Roberto Ballarini, and Steven J. Eppell, “Tension Tests on Mammalian Collagen Fibrils,” *Interface Focus* 6, no. 1, article 20150080 (February 6, 2016), <https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0080>; Min-Feng Yu et al., “Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load,” *Science* 287, no. 5453 (January 28, 2000): 637–40, <https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637>; Amit Banerjee et al., “Ultralarge Elastic Deformation of Nanoscale Diamond,” *Science* 360, no. 6386 (April 20, 2018): 300–302, <https://doi.org/10.1126/science.aar4165>; Drexler, *Nanosystems*, 24–35, 142–43.

¹²⁶ Robert A. Freitas, “Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell,” *Artificial Cells, Blood Substitutes, and Biotechnology* 26, no. 4 (1998): 411–30, <https://doi.org/10.3109/10731199809117682>.

¹²⁷ Freitas, “Exploratory Design in Medical Nanotechnology,” 426; Robert A. Freitas Jr., “Respirocytes: A Mechanical Artificial Red Cell: Exploratory Design in Medical Nanotechnology,” *Foresight Institute/Institute for Molecular Manufacturing*, April 17, 1996, <https://web.archive.org/web/20210509160649/https://foresight.org/Nanomedicine/Respirocytes.php>.

¹²⁸ Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers”; Drachman, “Do We Have Brain to Spare?”; Hervé Lemaître et al., “Normal Age-Related Brain Morphometric Changes: Nonuniformity Across Cortical Thickness, Surface Area and Grey Matter Volume?,” *Neurobiology of Aging* 33, no. 3 (March 2012): 617.e1–617.e9, <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.07.013>; Merkle et al., “Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints,” 24–27.

¹²⁹ “Neuron Firing Rates in Humans,” *AI Impacts*; Merkle et al., “Mechanical Computing Systems Using Only Links and Rotary Joints,” 24–27; Drexler, *Nanosystems*, 370–71.

¹³⁰ Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers”; Drachman, “Do We Have Brain to Spare?”; “Firing Behavior and Network Activity of Single Neurons in Human Epileptic Hypothalamic Hamartoma,” *Frontiers in Neurology* 2, no. 210 (December 27, 2013), <https://doi.org/10.3389/fneur.2013.00210>; Ernest L. Abel, *Behavioral Teratogenesis and Behavioral Mutagenesis: A Primer in Abnormal Development* (New York: Plenum Press, 1989), 113, <https://books.google.co.uk/books?id=gV0rBgAAQBAJ>; Anders Sandberg and Nick Bostrom, *Whole Brain Emulation: A Roadmap*, technical report 2008-3, Future of Humanity Institute, Oxford University (2008), 80, <https://www.fhi.ox.ac.uk/brain-emulation-roadmapreport.pdf>; veja o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos de custos de computação neste livro.

¹³¹ Herculano-Houzel, “The Human Brain in Numbers”; Drachman, “Do We Have Brain to Spare?”; “Firing Behavior and Network Activity of Single Neurons in Human Epileptic Hypothalamic Hamartoma”; Abel, *Behavioral Teratogenesis and Behavioral Mutagenesis*; Sandberg and Bostrom, *Whole Brain Emulation*, 80; veja o apêndice para as fontes utilizadas para todos os cálculos de custos de computação neste livro.

CAPÍTULO 7

¹ Bill McKibben, “How Much Is Enough? The Environmental Movement as a Pivot Point in Human History,” Harvard Seminar on Environmental Values, October 18, 2000, 11, <http://docshare04.docshare.tips/files/9552/95524564.pdf>.

² Robert M. Pirsig, *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance* (New York: Quill, 1999, 26; first published by William Morrow, 1974). O trabalho de Pirsig combinou ideias orientais e ocidentais e introduziu a estrutura filosófica conhecida como

Metafísica da Qualidade, que se centra na forma como as experiências vividas pelas pessoas dão origem ao conhecimento e às ideias. Tornou-se um dos livros de filosofia mais vendidos de sempre. Veja também Tim Adams, “The Interview: Robert Pirsig,” *Guardian*, November 19, 2006, <https://www.theguardian.com/books/2006/nov/19/fiction>.

³ Hans M. Kristensen and Matt Korda, “Status of World Nuclear Forces,” Federation of American Scientists, March 2, 2022, <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-worldnuclear-forces>.

⁴ Hans M. Kristensen, “Alert Status of Nuclear Weapons,” Briefing to Short Course on Nuclear Weapon and Related Security Issues, George Washington University Elliott School of International Affairs, April 21, 2017, 2, https://uploads.fas.org/2014/05/Brief2017_GWU_2s.pdf.

⁵ Pode explorar os efeitos da guerra nuclear com uma fascinante ferramenta interativa de Alex Wellerstein chamada Nukemap, disponível em <https://nuclearsecrecy.com/nukemap>. Veja também Kyle Mizokami, “335 Million Dead: If America Launched an All-Out Nuclear War,” *National Interest*, March 13, 2019, <https://nationalinterest.org/blog/buzz/335-million-dead-if-americalaunched-all-out-nuclear-war-57262>; Dylan Matthews, “40 Years Ago Today, One Man Saved Us from World-Ending Nuclear War,” *Vox*, September 26, 2023, <https://www.vox.com/2018/9/26/17905796/nuclear-war-1983-stanislav-petrov-soviet-union>; Owen B. Toon et al., “Rapidly Expanding Nuclear Arsenals in Pakistan and India Portend Regional and Global Catastrophe,” *Science Advances* 5, no. 10 (October 2, 2019), <https://advances.sciencemag.org/content/5/10/eaay5478>.

⁶ Seth Baum, “The Risk of Nuclear Winter,” Federation of American Scientists, May 29, 2015, <https://fas.org/pir-pubs/risk-nuclear-winter>; Bryan Walsh, “What Could a Nuclear War Do to the Climate — and Humanity?”, *Vox*, August 17, 2022, <https://www.vox.com/futureperfect/2022/8/17/23306861/nuclear-winter-war-climate-change-food-starvation-existentialrisk-russia-united-states>.

⁷ Anders Sandberg and Nick Bostrom, Global Catastrophic Risks Survey, technical report 2008-1, Future of Humanity Institute, Oxford University (2008): 1, <https://www.fhi.ox.ac.uk/reports/2008-1.pdf>.

⁸ Kristensen and Korda, “Status of World Nuclear Forces”; Arms Control Association, “Nuclear Weapons: Who Has What at a Glance,” Arms Control Association, June 2023, <https://www.armscontrol.org/factsheets/Nuclearweaponswhohaswhat>.

⁹ Para um resumo útil dos tratados de controlo de armas relevantes, veja “U.S.-Russian Nuclear Arms Control Agreements at a Glance,” Arms Control Association, August 2019, <https://www.armscontrol.org/factsheets/USRussiaNuclearAgreements>.

¹⁰ Max Roser and Mohamed Nagdy, “Nuclear Weapons,” Our World in Data, 2019, <https://ourworldindata.org/nuclear-weapons>; Hans M. Kristensen and Robert S. Norris, “The Bulletin of the Atomic Scientists’ Nuclear Notebook,” Federation of American Scientists, 2019, <https://thebulletin.org/nuclear-notebook-multimedia>; Kristensen and Korda, “Status of World Nuclear Forces.”

¹¹ Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space, and Under Water, October 10, 1963, <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%20480/volume-480-I-6964-English.pdf>.

¹² Para um resumo útil do direito internacional relevante, veja “International Legal Agreements Relevant to Space Weapons,” Union of Concerned Scientists, February 11, 2004, <https://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/international-legal-agreements>.

¹³ Scholars began to recognize this decades ago, for example in Martin E. Hellman, “Arms Race Can Only Lead to One End: If We Don’t Change Our Thinking, Someone Will Drop the Big One,” *Houston Post*, April 4, 1985, available in very similar form at <https://ee.stanford.edu/~hellman/opinion/inevitability.html>.

¹⁴ Para um resumo claro e conciso de como funciona a destruição mutuamente assegurada, veja “Mutually Assured Destruction: When the Only Winning Move Is Not to Play,” *Farnam Street*, June 2017, <https://fs.blog/2017/06/mutually-assured-destruction>.

¹⁵ Para mais informações sobre os programas de defesa antimíssil dos EUA, consulte “Current U.S. Missile Defense Programs at a Glance,” Arms Control Association, August 2019, <https://www.armscontrol.org/factsheets/usmissiledefense>.

-
- ¹⁶ Alan Robock and Owen Brian Toon, “Self-Assured Destruction: The Climate Impacts of Nuclear War,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 68, no. 5 (September 1, 2012): 66–74, <https://thebulletin.org/2012/09/self-assured-destruction-the-climate-impacts-of-nuclear-war>.
- ¹⁷ Valerie Insinna, “Russia’s Nuclear Underwater Drone Is Real and in the Nuclear Posture Review,” *DefenseNews*, January 12, 2018, <https://www.defensenews.com/space/2018/01/12/russias-nuclear-underwater-drone-is-real-and-in-the-nuclear-posture-review>; Douglas Barrie and Henry Boyd, “Burevestnik: US Intelligence and Russia’s ‘Unique’ Cruise Missile,” *International Institute for Strategic Studies*, February 5, 2021, <https://www.iiss.org/blogs/military-balance/2021/02/burevestnik-russia-cruise-missile>.
- ¹⁸ Richard Stone, “‘National Pride Is at Stake.’ Russia, China, United States Race to Build Hypersonic Weapons,” *Science*, January 8, 2020, <https://www.science.org/content/article/national-pride-stake-russia-china-united-states-race-build-hypersonic-weapons>.
- ¹⁹ Joshua M. Pearce and David C. Denkenberger, “A National Pragmatic Safety Limit for Nuclear Weapon Quantities,” *Safety* 4, no. 2 (2018): 25, <https://www.mdpi.com/2313-576X/4/2/25>.
- ²⁰ “Safety Assistance System Warns of Dirty Bombs,” *Fraunhofer*, September 1, 2017, <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2017/september/safety-assistance-systemwarns-of-dirty-bombs-.html>.
- ²¹ Jaganath Sankaran, “A Different Use for Artificial Intelligence in Nuclear Weapons Command and Control,” *War on the Rocks*, April 25, 2019, <https://warontherocks.com/2019/04/a-different-use-for-artificial-intelligence-in-nuclear-weapons-command-and-control>; Jill Hruby and M. Nina Miller, “Assessing and Managing the Benefits and Risks of Artificial Intelligence in Nuclear-Weapon Systems,” *Nuclear Threat Initiative*, August 26, 2021, <https://www.nti.org/analysis/articles/assessing-and-managing-the-benefits-and-risks-of-artificial-intelligence-in-nuclear-weapon-systems>.
- ²² Para uma explicação rápida e útil sobre a Peste Negra e outras epidemias de peste, veja Jenny Howard, “Plague, Explained,” *National Geographic*, August 20, 2019, <https://www.nationalgeographic.com/science/health-and-human-body/human-diseases/theplague>.
- ²³ “Historical Estimates of World Population,” *US Census Bureau*, July 5, 2018, <https://www.census.gov/data/tables/time-series/demo/international-programs/historical-estworldpop.html>.
- ²⁴ Elizabeth Pennisi, “Black Death Left a Mark on Human Genome,” *Science*, February 3, 2014, <https://www.sciencemag.org/news/2014/02/black-death-left-mark-human-genome>.
- ²⁵ A terapia genética, por exemplo, tem propósitos e intenções benéficas, mas utiliza frequentemente vírus modificados para atingir os seus objetivos. Para uma breve visão geral, consulte “Gene Therapy Inside Out,” *US Food and Drug Administration*, YouTube video, December 19, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=GbJasFgJkLg>.
- ²⁶ Para um resumo acessível dos riscos do bioterrorismo, veja R. Daniel Bressler and Chris Bakerlee, “‘Designer Bugs’: How the Next Pandemic Might Come from a Lab,” *Vox*, December 6, 2018, <https://www.vox.com/future-perfect/2018/12/6/18127430/superbugs-biotech-pathogensbiorisk-pandemic>.
- ²⁷ Para um estudo do caso mais aprofundado sobre a Conferência de Asilomar e os princípios que produziu, veja M. J. Peterson, “Asilomar Conference on Laboratory Precautions When Conducting Recombinant DNA Research—Case Summary,” *International Dimensions of Ethics Education in Science and Engineering Case Study Series*, June 2010, <https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1023&context=edethicsinscience>.
- ²⁸ Alan McHughen and Stuart Smyth, “US Regulatory System for Genetically Modified [Genetically Modified Organism (GMO), rDNA or Transgenic] Crop Cultivars,” *Plant Biotechnology Journal* 6, no. 1 (January 2008): 2–12, <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2007.00300.x>.
- ²⁹ Para obter informações mais detalhadas sobre as atividades do GRRT, consulte Tasha Stehling-Ariza et al., “Establishment of CDC Global Rapid Response Team to Ensure Global Health Security,” *Emerging Infectious Diseases* 23, no. 13 (December

2017), https://wwwnc.cdc.gov/eid/article/23/13/17-0711_article; Centers for Disease Control and Prevention, “Global Rapid Response Team Expands Scope to U.S. Response,” *Updates from the Field* 30 (Fall 2020), <https://www.cdc.gov/globalhealth/healthprotection/fieldupdates/fall-2020/grrt-response-covid.html>.

³⁰ Para mais informações sobre as atividades do NICBR e do USAMRIID para combater o risco de bioterrorismo, consulte os seus sites <https://www.nicbr.health.mil> and <https://www.usamriid.health.mil>.

³¹ Françoise Barré-Sinoussi et al., “Isolation of a T-Lymphotropic Retrovirus from a Patient at Risk for Acquired Immune Deficiency Syndrome (AIDS),” *Science* 220, no. 4599 (May 20, 1983): 868–71, <https://www.jstor.org/stable/1690359>; Jean K. Carr et al., “Full-Length Sequence and Mosaic Structure of a Human Immunodeficiency Virus Type 1 Isolate from Thailand,” *Journal of Virology* 70, no. 9 (August 31, 1996): 5935–43, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC190613>; Kristen Philipkoski, “SARS Gene Sequence Unveiled,” *Wired*, April 15, 2003, <https://www.wired.com/2003/04/sars-genesequence-unveiled>; Cameron Walker, “Rapid Sequencing Method Can Identify New Viruses Within Hours,” *Discover*, December 11, 2013, <https://web.archive.org/web/20201111180212>; “Rapid Sequencing of RNA Virus Genomes,” Nanopore Technologies, 2018, <https://nanoporetech.com/resource-centre/rapid-sequencing-rna-virus-genomes>.

³² Darren J. Obbard et al., “The Evolution of RNAi as a Defence Against Viruses and Transposable Elements,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364, no. 1513 (99–115), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2592633>.

³³ Para uma breve explicação sobre o funcionamento das vacinas tradicionais baseadas em antígenos, consulte “Understanding How Vaccines Work,” Centers for Disease Control, July 2018, <https://www.cdc.gov/vaccines/hcp/conversations/understanding-vacc-work.html>.

³⁴ Ray Kurzweil, “AI-Powered Biotech Can Help Deploy a Vaccine in Record Time,” *Wired*, May 19, 2020, <https://www.wired.com/story/opinion-ai-powered-biotech-can-help-deploy-a-vaccine-in-record-time>.

³⁵ Asha Barbaschow, “Moderna Leveraging Its ‘AI Factory’ to Revolutionise the Way Diseases Are Treated,” *ZDNet*, May 17, 2021, <https://www.zdnet.com/article/moderna-leveraging-its-ai-factory-to-revolutionise-the-way-diseases-are-treated>.

³⁶ Barbaschow, “Moderna Leveraging Its ‘AI Factory’ ”; “Moderna COVID-19 Vaccine,” US Food and Drug Administration, December 18, 2020, [https://www.fda.gov/emergencypreparedness-and-response/coronavirus-disease-2019-covid-19/moderna-covid-19-vaccine\[inactive\]](https://www.fda.gov/emergencypreparedness-and-response/coronavirus-disease-2019-covid-19/moderna-covid-19-vaccine[inactive]).

³⁷ Philip Ball, “The Lightning-Fast Quest for COVID Vaccines—and What It Means for Other Diseases,” *Nature* 589, no. 7840 (December 18, 2020): 16–18, <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03626-1>.

³⁸ Para duas visões gerais úteis das provas a favor e contra, veja Amy Maxmen and Smriti Mallapaty, “The COVID Lab-Leak Hypothesis: What Scientists Do and Don’t Know,” *Nature* 594, no. 7863 (June 8, 2021): 313–15, <https://www.nature.com/articles/d41586-021-01529-3>; Jon Cohen, “Call of the Wild,” *Science* 373, no. 6559 (September 2, 2021): 1072–77, <https://www.science.org/content/article/why-many-scientists-say-unlikely-sars-cov-2-originated-lab-leak>.

³⁹ James Pearson and Ju-Min Park, “North Korea Overcomes Poverty, Sanctions with Cut-Price Nukes,” *Reuters*, January 11, 2016, <https://www.reuters.com/article/us-northkorea-nuclearmoney-idUSKCN0UP1G820160111>.

⁴⁰ Lord Lyell, “Chemical and Biological Weapons: The Poor Man’s Bomb,” draft general report, *Science and Technology Committee* (96) 8, North Atlantic Assembly, October 4, 1996, <https://irp.fas.org/threat/an253stc.htm>.

⁴¹ United Nations Secretary-General, “Chemical and Bacteriological (Biological) Weapons and the Effects of Their Possible Use: Report of the Secretary-General,” United Nations, August 1969; discussed in Gregory Koblenz, “Pathogens as Weapons: The International Security Implications of Biological Warfare,” *International Security* 28, no. 3 (Winter 2003/2004): 88, <https://doi.org/10.1162/016228803773100084>.

⁴² Para uma análise mais profunda, sóbria e perspicaz das potenciais aplicações nocivas da nanotecnologia, veja Louis A. Del Monte, *Nanoweapons: A Growing Threat to Humanity* (Lincoln: University of Nebraska Press, 2017).

⁴³ K. Eric Drexler, *Motores da Criação: A Era da Nanotecnologia que se Aproxima* (New York: Anchor Press/Doubleday, 1986), 172.

⁴⁴ Ralph C. Merkle, “Self Replicating Systems and Low Cost Manufacturing,” Zyvex.com, accessed March 5, 2023, <http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepNATO.html>.

⁴⁵ Yinon M. Bar-On, Rob Phillips e Ron Milo estimam que a biomassa total da Terra contém 550 gigatoneladas de carbono de todos os tipos de seres vivos (sem contar com o carbono subterrâneo, como os depósitos de carvão que vieram originalmente de matéria viva). Isto é o equivalente a $5,5 \times 10^{17}$ gramas de carbono. Com um peso atômico médio de 12,011, podemos calcular o número de átomos como sendo $5,5 \times 10^{17} / 12,011 = 4,6 \times 10^{16}$ mols. Utilizando esta figura, podemos estimar $(4,6 \times 10^{16}) \times (6,022 \times 10^{23})$ (número de Avogadro) = $2,8 \times 10^{40}$ átomos de carbono na biomassa disponível na Terra. A quantidade total de carbono orgânico, incluindo na atmosfera, no solo e nas reservas de hidrocarbonetos no subsolo, pode ser consideravelmente maior, mas é muito mais difícil avaliar quanto disto seria facilmente acessível aos nanorrobôs num cenário de gosma cinzenta. Veja Yinon M. Bar-On et al., “The Biomass Distribution on Earth,” PNAS 115, no. 25 (June 19, 2018): 6506–11, <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.

⁴⁶ De acordo com o especialista em nanotecnologia Rob Freitas, um nanorrobô autorreplicante pode ter cerca de 70 milhões de átomos de carbono. Este é um número especulativo, mas é provavelmente a melhor estimativa disponível e pode servir como um guia geral para pensar sobre um cenário deste tipo. Veja Robert A. Freitas Jr., “Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations,” Foresight Institute, April 2000, <http://www.rfreitas.com/Nano/Ecophagy.htm>.

⁴⁷ Esta é uma média sob a suposição de que a distribuição de carbono é mais ou menos uniforme e contínua, mas num cenário real variaria de acordo com as condições locais. Em alguns locais, o fornecimento de carbono disponível esgotar-se-ia após menos gerações. Noutros locais, poderia ser necessário um maior número de gerações para converter todo o carbono, prolongando um pouco o tempo.

⁴⁸ Freitas, “Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators.”

⁴⁹ Freitas, “Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators.”

⁵⁰ Robert A. Freitas Jr. and Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines* (Austin, TX: Landes Bioscience, 2004), <http://www.molecularassembler.com/KSRM/4.11.3.3.htm>.

⁵¹ Para ler as orientações atualizadas e alguns antecedentes esclarecedores sobre as mesmas, consulte Neil Jacobstein, “Foresight Guidelines for Responsible Nanotechnology Development,” Foresight Institute, 2006, <http://www.imm.org/policy/guidelines>.

⁵² Para mais informações sobre a gama colorida de termos como “gosma azul” e “gosma cinzento” que surgiram para descrever vários cenários de nanotecnologia, consulte Chris Phoenix, “Goo vs. Paste,” *Nanotechnology Now*, September 2002, <http://www.nanotech-now.com/goo.htm>.

⁵³ Freitas, “Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators.”

⁵⁴ Bill Joy, “Why the Future Doesn’t Need Us,” *Wired*, April 1, 2000, <https://www.wired.com/2000/04/joy-2>.

⁵⁵ World Health Organization, “WHO Coronavirus Dashboard,” World Health Organization, accessed October 16, 2023, <https://covid19.who.int>.

⁵⁶ Miles Brundage et al., *The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation* (Oxford, UK: Future of Humanity Institute, February 2018), <https://img1.wsimg.com/blobby/go/3d82daa4-97fe-4096-9c6b-376b92c619de/downloads/MaliciousUseofAI.pdf?ver=1553030594217>.

⁵⁷ Evan Hubinger, “Clarifying Inner Alignment Terminology,” AI Alignment Forum, November 9, 2020, <https://www.alignmentforum.org/posts/SzecSPYxqRa5GCaSF/clarifying-inneralignment-terminology>; Paul Christiano,

“Current Work in AI Alignment,” Effective Altruism, accessed March 5, 2023, <https://www.effectivealtruism.org/articles/paul-christiano-currentwork-in-ai-alignment>.

⁵⁸ Hubinger, “Clarifying Inner Alignment Terminology”; Christiano, “Current Work in AI Alignment.”

⁵⁹ Para uma explicação mais profunda e relativamente acessível da generalização imitativa, veja Beth Barnes, “Imitative Generalisation (AKA ‘Learning the Prior’),” AI Alignment Forum, January 9, 2021, <https://www.alignmentforum.org/posts/JKj5Krff5oKMb8TjT/imitative-generalisation-akalearning-the-prior-1>.

⁶⁰ Geoffrey Irving and Dario Amodei, “AI Safety via Debate,” OpenAI, May 3, 2018, <https://openai.com/blog/debate>.

⁶¹ Para uma sequência perspicaz de publicações que explicam a amplificação iterada, escrita pelo criador principal do conceito, veja Paul Christiano, “Iterated Amplification,” AI Alignment Forum, October 29, 2018, <https://www.alignmentforum.org/s/EmDuGeRw749sD3GKd>.

⁶² Para mais detalhes sobre os desafios técnicos da segurança da IA, consulte Dario Amodei et al., “Concrete Problems in AI Safety,” arXiv:1606.06565v2 [cs.AI], July 25, 2016, <https://arxiv.org/pdf/1606.06565.pdf>.

⁶³ Para ler os Princípios de IA da Asilomar na íntegra, juntamente com a lista de signatários atualizada regularmente, consulte “Asilomar AI Principles,” Future of Life Institute, 2019, <https://futureoflife.org/ai-principles>.

⁶⁴ Um dos pais da internet, Vint Cerf, escreveu um ensaio útil expandindo o papel da DARPA na criação da internet. Veja Vint Cerf, “A Brief History of the Internet and Related Networks,” Internet Society, accessed March 5, 2023, <https://www.internetsociety.org/internet/history-internet/brief-history-internet-related-networks>.

⁶⁵ “Asilomar AI Principles,” Future of Life Institute.

⁶⁶ “Lethal Autonomous Weapons Pledge,” Future of Life Institute, 2019, <https://futureoflife.org/lethal-autonomous-weapons-pledge>.

⁶⁷ Kelley M. Saylor, “Defense Primer: U.S. Policy on Lethal Autonomous Weapon Systems” (report IF11150, Congressional Research Service, updated November 14, 2022), <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11150>.

⁶⁸ *Department of Defense Directive 3000.09—Autonomy in Weapon Systems*, US Department of Defense, November 21, 2012 (effective January 25, 2023), <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodd/300009p.pdf>.

⁶⁹ Erico Guizzo and Evan Ackerman, “Do We Want Robot Warriors to Decide Who Lives or Dies?,” *IEEE Spectrum*, May 31, 2016, <https://spectrum.ieee.org/robotics/military-robots/dowe-want-robot-warriors-to-decide-who-lives-or-dies>.

⁷⁰ Guizzo and Ackerman, “Do We Want Robot Warriors to Decide Who Lives or Dies?”

⁷¹ Bureau of Arms Control, Verification and Compliance, “Political Declaration on Responsible Military Use of Artificial Intelligence and Autonomy,” US Department of State, February 16, 2023, <https://www.state.gov/political-declaration-on-responsible-military-use-of-artificialintelligence-and-autonomy>.

⁷² Brian M. Carney, “Air Combat by Remote Control,” *Wall Street Journal*, May 12, 2008, <https://www.wsj.com/articles/SB121055519404984109>.

⁷³ “Supporters of a Ban on Killer Robots,” Campaign to Stop Killer Robots, updated May 18, 2021, <https://web.archive.org/web/20210518133318/https://www.stopkillerrobots.org/endorsers>.

⁷⁴ Brian Stauffer, “Stopping Killer Robots: Country Positions on Banning Fully Autonomous Weapons and Retaining Human Control,” Human Rights Watch, August 10, 2020, <https://www.hrw.org/report/2020/08/10/stopping-killer-robots/country-positions-banning-fullyautonomous-weapons-and>.

⁷⁵ Para melhor compreender a questão da transparência na IA, uma analogia útil é a diferença matemática entre encontrar uma solução para um problema e verificar se uma determinada solução está correta. Em alguns casos, é fácil para os humanos verificar uma solução encontrada por um computador. Por exemplo, se um programa for instruído para encontrar o maior número inteiro ímpar inferior a 1.000.000, é muito fácil para um ser humano confirmar que 999.999 cumpre realmente estes critérios. Por outro lado, se um programa for instruído para encontrar o maior número primo inferior a 1.000.000, um ser humano teria muita dificuldade em verificar por si próprio se 999.983 é de facto primo. De forma semelhante, quando a IA gera uma resposta algorítmica a partir de parâmetros claramente definidos pelos seus criadores, é fácil para os programadores "olhar para debaixo do capô" e ver exatamente quais os fatores que levaram a essa resposta. Por exemplo, um programa de Go que avalia o tabuleiro com base em regras fixas pode dizer aos seus programadores precisamente por que é que determinou que um determinado movimento será o melhor. Mas com abordagens conectivistas como a aprendizagem profunda, o "porquê" completo é muitas vezes inacessível tanto para programadores humanos e a própria IA. Provavelmente não existe uma técnica universal que possa verificar razões compreensíveis por humanos para qualquer solução arbitrária gerada por uma rede neural. Para mais informações sobre o chamado problema da caixa negra da IA, consulte Will Knight, "The Dark Secret at the Heart of AI," MIT Technology Review, April 11, 2017, <https://www.technologyreview.com/s/604087/the-dark-secret-at-the-heart-of-ai>.

⁷⁶ Paul Christiano, "Eliciting Latent Knowledge," AI Alignment, *Medium*, February 25, 2022, <https://ai-alignment.com/eliciting-latent-knowledge-f977478608fc>.

⁷⁷ John-Clark Levin and Matthijs M. Maas, "Roadmap to a Roadmap: How Could We Tell When AGI Is a 'Manhattan Project' Away?", arXiv:2008.04701 [cs.CY], August 6, 2020, <https://arxiv.org/pdf/2008.04701.pdf>.

⁷⁸ "The Bletchley Declaration by Countries Attending the AI Safety Summit, 1-2 November 2023," UK Government, November 1, 2023, <https://www.gov.uk/government/publications/aisafety-summit-2023-the-bletchley-declaration/the-bletchley-declaration-by-countries-attendingthe-ai-safety-summit-1-2-november-2023>.

⁷⁹ Para uma análise mais aprofundada da tendência mundial de longo prazo para a diminuição da violência, pode encontrar muitas revelações úteis e ricas em dados no excelente livro do meu amigo Steven Pinker, *Os anjos bons da nossa natureza* (Nova Iorque: Viking, 2011).

⁸⁰ Para um ensaio útil sobre os sentimentos antitecnológicos que se desenvolvem em resposta aos receios sobre as ameaças tecnológicas emergentes, veja Lawrence Lessig, "Stamping Out Good Science," *Wired*, July 1, 2004, <https://www.wired.com/2004/07/stamping-out-good-science>.

⁸¹ Walter Suza, "I Fight Anti-GMO Fears in Africa to Combat Hunger," *The Conversation*, February 7, 2019, <https://theconversation.com/i-fight-anti-gmo-fears-in-africa-to-combathunger-109632>; Editorial Board, "There's No Choice: We Must Grow GM Crops Now," *Guardian*, March 16, 2014, <https://www.theguardian.com/commentisfree/2014/mar/16/gmcrops-world-food-famine-starvation>.

⁸² Para uma gama representativa destas críticas, veja Joël de Rosnay, "Artificial Intelligence: Transhumanism Is Narcissistic. We Must Strive for Hyperhumanism," *Crossroads to the Future*, April 26, 2015, <https://web.archive.org/web/20230322182945/https://www.crossroads-to-thefuture.com/articles/artificial-intelligence-transhumanism-is-narcissistic-we-must-strive-forhyperhumanism>; Wesley J. Smith, "Jeffrey Epstein, a Narcissistic Transhumanist," *National Review*, August 1, 2019, <https://www.nationalreview.com/corner/jeffrey-epstein-a-narcissistictranshumanist>; Sarah Spiekermann, "Why Transhumanism Will Be a Blight on Humanity and Why It Must Be Opposed," *The Privacy Surgeon*, July 6, 2017, <https://web.archive.org/web/20180212062523/http://www.privacysurgeon.org/blog/incision/why-transhumanism-will-be-a-blight-on-humanity-and-why-it-must-be-opposed>

⁸³ Em 2021, o consumo global total de energia primária foi de cerca de 595,15 exajoules, o que equivale a 165.320 terawatts-hora. Isto é o equivalente anual de 18,8 terawatts (TW) contínuos. Em comparação, estima-se que a energia solar que atinge constantemente a Terra seja de 173.000 a 175.000 TW, dos quais os Laboratórios Nacionais de Sandia estimam que cerca de 89.300 TW cheguem à superfície do planeta, e 58.300 TW sejam teoricamente extraíveis por energia fotovoltaica de superfície. Deste total, a investigação da Sandia avaliou que até 7.500 TW poderiam ser gerados a partir de áreas de terra bem isoladas com a tecnologia de 2006. Na verdade, construir apenas um quarto de um por cento desta capacidade cobriria

a energia que utilizamos atualmente de todas as fontes — não apenas eletricidade, mas também combustíveis que são utilizados atualmente sem serem convertidos em eletricidade primeiro. Veja *BP Statistical Review of World Energy 2022* (London: BP, 2022), <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>, 9; Jeff Tsao et al., “Solar FAQs,” US Department of Energy (working paper SAND 2006-2818P, Sandia National Laboratories 2006), 9, <https://web.archive.org/web/20200424084337/https://www.sandia.gov/~jytsao/Solar%20FAQs.pdf>.

⁸⁴ Para dois resumos muito úteis sobre como alguns dos principais futuristas do mundo estão a pensar sobre os riscos existenciais — isto é, eventos que podem destruir a civilização ou causar a extinção humana por completo — veja Sebastian Farquhar et al., *Existential Risk: Diplomacy and Governance*, Global Priorities Project, 2017, <https://www.fhi.ox.ac.uk/wp-content/uploads/Existential-Risks-2017-01-23.pdf>; Nick Bostrom, “Existential Risks: Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards,” *Journal of Evolution and Technology* 9, no. 1 (2002), <https://www.nickbostrom.com/existential/risks.html>.