

MOTORES DA CRIAÇÃO

A Era da Nanotecnologia Que Se Aproxima



Autor: K. Eric Drexler

Edição e Preparação Digital: Gullan Greyl

Edição original: Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology, 1986.

Edição portuguesa concluída em 10-06-2025



Livroteca Gullan Greyl

Sinopse

Em “Motores da Criação”, K. Eric Drexler apresenta uma das visões fundadoras da nanotecnologia: a possibilidade de construir máquinas capazes de organizar átomos e moléculas com precisão, transformando radicalmente a forma como produzimos materiais, computadores, medicamentos, energia e estruturas.

Partindo da engenharia molecular, Drexler mostra como os futuros montadores moleculares poderão abrir uma nova era de abundância tecnológica, permitindo fabricar objetos complexos a partir da matéria comum, reparar células, prolongar a vida, expandir a presença humana no espaço e criar sistemas computacionais muito mais poderosos.

Mas o mesmo poder criador traz também riscos inéditos. A nanotecnologia poderá curar, reconstruir e libertar — ou tornar-se uma força destrutiva se for desenvolvida sem prudência, cooperação e mecanismos de controlo.

Visionário, rigoroso e provocador, “Motores da Criação” é um convite a pensar a tecnologia não apenas como ferramenta, mas como força civilizacional capaz de remodelar o futuro da vida, da inteligência e da matéria.

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*

Índice

Prefácio de Marvin Minsky.....	1
Agradecimentos.....	4
CAPÍTULO 1	6
Motores de Construção	6
1. Dois Estilos de Tecnologia.....	7
2. Tecnologia Molecular Hoje	9
3. Máquinas de Proteína Existentes	14
4. Desenhar com Proteína	17
5. Nanotecnologia de Segunda Geração	21
6. Montadores Universais	25
7. Fixando Conclusões	27
8. Nanocomputadores.....	33
9. Desmontadores.....	36
10. O Mundo Feito Novo	37
CAPÍTULO 2	38
Os Princípios da Mudança	38
1. Ordem do Caos	39
2. Moléculas em Evolução	40
3. Explicando a Ordem	46
4. Organismos em Evolução.....	47
5. Outra Rota de Regresso	50
6. A Ascensão dos Replicadores.....	53
7. Tecnologia em Evolução	54
8. A Evolução da Conceção.....	59
9. O Que São os Novos Replicadores?	62
10. As Criaturas da Mente	64
11. Seleccionando Ideias.....	68
CAPÍTULO 3	71
Previsão e Projeção	71
1. Armadilhas da Profecia	72
2. Ciência e Direito Natural	76
3. Ciência vs. Tecnologia	81
4. A Lição de Leonardo	85
5. O Avanço do Montador (Assembler)	90

CAPÍTULO 4	93
Motores da Abundância	93
1. Replicadores Barulhentos	94
2. Replicadores Moleculares.....	97
3. Moléculas e Arranha-céus.....	102
CAPÍTULO 5	112
Máquinas Pensantes	112
1. Inteligência de Máquina	118
2. Alvo de Turing.....	123
3. Motores do Projeto (Design)	126
4. A Corrida da Inteligência Artificial	132
5. Seremos Suficientemente Inteligentes?	134
6. Acelerando a Corrida Tecnológica	137
CAPÍTULO 6	146
O Mundo Para Lá da Terra	146
1. O Novo Programa Espacial.....	149
2. Espaço e Tecnologia Avançada.....	157
3. Abundância.....	165
4. A Sociedade da Soma Positiva.....	171
CAPÍTULO 7	174
Motores de Cura.....	174
1. Vida, Mente e Máquinas	179
2. De Medicamentos a Máquinas de Reparação Celular.....	182
3. Máquinas de Reparação de Células	185
4. Algumas Curas	192
5. Anestesia Plus.....	196
6. Da Função à Estrutura	199
7. Do Tratamento de Doenças ao Estabelecimento da Saúde	200
8. Uma Doença Chamada "Envelhecimento"	202
CAPÍTULO 8	206
Vida Longa num Mundo Aberto.....	206
1. Por Que <i>Não</i> Máquinas de Reparação de Células?.....	207
2. AS PESSOAS TENTARM — E FALHARAM	208
3. A NATUREZA TENTOU — E FALHOU	209
4. Curar e Proteger a Terra	212

5. Longevidade e Pressão Populacional	218
6. Os Efeitos da Antecipação	221
7. Progresso na Extensão da Vida	223
CAPÍTULO 9	228
Uma Porta para o Futuro	228
1. Os Requisitos Para a Biostase	229
2. Métodos de Biostase	233
3. Revertendo a Biostase	239
4. Mente, Corpo e Alma	243
5. Objeções e Argumentos	244
5.1 Porque as Máquinas de Reparação Celular ainda não Existem.....	247
5.2 Porque as Máquinas Minúsculas Carecem de Dramatismo	248
5.3 Porque Isto Parece Demasiado Inacreditável.....	250
5.4 Porque Isto Soa Demasiado Bom Para Ser Verdade	251
5.5 Porque Não Foi Provado Que Funciona	255
6. Tempo, Custo e Ação Humana	255
CAPÍTULO 10	259
Os Limites do Crescimento	259
1. A Estrutura do Vácuo	261
2. A Física Será Novamente Virada de Pernas para o Ar?	268
3. Os Limites do Hardware	274
4. Entropia: Um Limite para o Uso de Energia	279
5. Os Limites dos Recursos.....	287
6. Malthus	289
7. Alguém Nos Vai Parar?	291
8. Crescimento Dentro dos Limites	293
9. Visões de Limites.....	295
CAPÍTULO 11	299
Motores de Destruição	299
1. A Ameaça das Máquinas	300
2. Motores de Potência	303
3. Sistemas Confiáveis	310
4. Táticas para o Avanço do Montador (Assembler).....	320
5. Montadores Limitados	323
6. Laboratórios de Montadores Selados.....	324

7. Escondendo Informação	327
8. Escudos Ativos	329
9. O Sucesso é Possível?	330
CAPÍTULO 12	335
Estratégias e Sobrevivência	335
1. Restrição Pessoal.....	335
2. Supressão Local.....	336
3. Acordos Globais de Supressão	338
4. Supressão Global pela Força.....	339
5. Avanço Unilateral	340
6. Equilíbrio de Poder	341
7. Desenvolvimento Cooperativo.....	342
8. Uma Síntese de Estratégias	344
9. Escudos Ativos vs. Armas Espaciais.....	346
10. Poder, Mal, Incompetência e Preguiça	350
CAPÍTULO 13	355
Encontrando os Factos	355
1. Uma Confusão de Especialistas	358
2. Das Disputas ao Devido Processo Legal.....	360
3. Uma Abordagem.....	366
4. Por Que Não o Devido Processo Legal?	371
5. Construir o Devido Processo Legal.....	374
CAPÍTULO 14	381
A Rede do Conhecimento	381
1. O Conto do Templo	383
2. Papel Mágico Tornado Realidade	386
3. Conetando o Nosso Conhecimento	394
4. Perigos do Hipertexto.....	400
5. Do Desktop Para a Biblioteca Mundial.....	401
6. Hipertexto e Imprensa.....	404
CAPÍTULO 15	407
Mundos Suficientes, e Tempo	407
1. Nanotecnologia e Vida Quotidiana.....	410
2. Outros Sonhos de Ficção Científica	412
3. Simplicidade Avançada.....	414

4. Espaço Suficiente para Sonhos	417
5. Preparativos.....	418
Posfácio, 1996	423
Glossário	425
Notas e Referências	434

MOTORES DA CRIAÇÃO

*A Era da Nanotecnologia
Que Se Aproxima*

K. Eric Drexler

Prefácio de Marvin Minsky

O livro *Motores da Criação* de K. Eric Drexler é uma obra enormemente original sobre as consequências das novas tecnologias. É ambicioso e imaginativo e, o melhor de tudo, o raciocínio é tecnicamente sólido.

Mas como é que alguém pode prever para onde a ciência e a tecnologia nos levarão? Embora muitos cientistas e tecnólogos tenham tentado fazê-lo, não é curioso que as tentativas mais bem-sucedidas tenham sido as de escritores de ficção científica como Jules Verne e H. G. Wells, Frederik Pohl, Robert Heinlein, Isaac Asimov e Arthur C. Clarke? É certo que alguns desses escritores conheciam muito da ciência dos seus tempos. Mas talvez a fonte mais forte do seu sucesso tenha sido o facto de se preocuparem igualmente com as pressões e escolhas que imaginavam emergir das suas sociedades. Pois, como o próprio Clarke enfatizou, é virtualmente impossível prever os detalhes das tecnologias futuras para além de talvez meio século. Por um lado, é virtualmente impossível prever em detalhe quais as alternativas que se tornarão tecnicamente viáveis num intervalo de tempo mais longo. Porquê? Simplesmente porque se se conseguisse ver o futuro com tanta clareza, provavelmente seria possível realizar essas coisas em muito menos tempo — dada a vontade de o fazer. Um segundo problema é que é igualmente difícil adivinhar o carácter das mudanças sociais que provavelmente intervirão. Dada tal incerteza, olhar para o futuro é como construir uma torre de raciocínio muito alta e esguia. E todos sabemos que tais construções não são de confiança.

Como se poderia construir um argumento mais sólido? Primeiro, as fundações devem ser muito firmes — e Drexler construiu sobre as áreas mais sólidas do conhecimento técnico atual. Depois, é preciso sustentar cada passo importante da conclusão de várias maneiras diferentes, antes de se iniciar o seguinte. Isto porque nenhuma razão isolada pode ser suficientemente robusta para resistir a tantas incógnitas. Consequentemente, Drexler ofereceu-nos múltiplos apoios para cada argumento importante. Finalmente, nunca é totalmente seguro confiar nos próprios julgamentos em tais assuntos, uma vez que todos nós temos desejos e medos que influenciam a forma como pensamos — sem o sabermos. Mas, ao contrário da maioria dos iconoclastas, Drexler tem, durante muitos anos, corajosa e abertamente exposto estas ideias tanto aos céticos mais conservadores como aos sonhadores mais ilusórios entre as comunidades científicas sérias como a que existe em torno do MIT. Ele sempre ouviu

atentamente o que os outros disseram e, por vezes, mudou as suas opiniões em conformidade.

Motores da Criação começa com a percepção de que o que podemos fazer depende do que podemos construir. Isto leva a uma análise cuidadosa das possíveis maneiras de empilhar átomos. Depois, Drexler pergunta: "O que poderíamos construir com esses mecanismos de empilhamento de átomos?" Por um lado, poderíamos fabricar máquinas de montagem muito menores até do que as células vivas, e produzir materiais mais fortes e leves do que qualquer um disponível atualmente. Daí, melhores naves espaciais. Daí, minúsculos dispositivos que podem viajar ao longo dos capilares para entrar e reparar células vivas. Daí, a capacidade de curar doenças, reverter os estragos da idade ou tornar os nossos corpos mais rápidos ou mais fortes do que antes. E poderíamos fazer máquinas do tamanho de vírus, máquinas que funcionariam a velocidades que nenhum de nós consegue ainda apreciar. E então, uma vez que aprendêssemos como fazê-lo, teríamos a opção de montar estas miríades de pequenas peças em máquinas inteligentes, talvez com base no uso de bilhões de dispositivos de processamento paralelo nanoscópicos que fazem descrições, comparam-nas com padrões registados e, em seguida, exploram as memórias de todas as suas experiências anteriores. Assim, essas novas tecnologias poderiam mudar não apenas os materiais e os meios que usamos para moldar o nosso ambiente físico, mas também as atividades que seríamos então capazes de realizar dentro de qualquer tipo de mundo que criarmos.

Ora, se voltarmos ao problema de Arthur C. Clarke de prever mais de cinquenta anos no futuro, vemos que os tópicos que Drexler aborda fazem com que isto pareça quase irrelevante. Pois, uma vez iniciado esse processo de empilhamento de átomos, então "apenas cinquenta anos" poderiam trazer mais mudanças do que tudo o que aconteceu desde os tempos quase medievais. Pois, parece-me, apesar de tudo o que ouvimos sobre as revoluções tecnológicas modernas, elas realmente não fizeram diferenças tão grandes nas nossas vidas durante o último meio século. Será que a televisão realmente mudou o nosso mundo? Certamente menos do que o rádio, e ainda menos do que o telefone. E os aviões? Eles apenas reduziram os tempos de viagem de dias para horas — enquanto a ferrovia e o automóvel já tinham feito uma mudança maior ao encurtar esses tempos de viagem de semanas para dias! Mas *Motores da Criação* coloca-nos no limiar de mudanças genuinamente significativas; a nanotecnologia poderia ter mais efeito na nossa existência material do que essas duas últimas grandes invenções nesse domínio — a substituição de paus e pedras por metais e cimentos

e o aproveitamento da eletricidade. Da mesma forma, podemos comparar os possíveis efeitos da inteligência artificial sobre como pensamos — e sobre como poderíamos vir a pensar sobre nós mesmos — com apenas duas invenções anteriores: as da linguagem e da escrita.

Em breve teremos de enfrentar algumas dessas perspectivas e opções. Como devemos proceder para lidar com elas? *Motores da Criação* explica como estas novas alternativas poderiam ser direcionadas para muitas das nossas preocupações humanas mais vitais: para a riqueza ou pobreza, saúde ou doença, paz ou guerra. E Drexler não oferece um mero catálogo neutro de possibilidades, mas uma multidão de ideias e propostas sobre como se poderia começar a avaliá-las. *Motores da Criação* é a melhor tentativa até agora para nos preparar para pensar no que poderíamos nos tornar, caso persistamos em criar novas tecnologias.

MARVIN MINSKY
Professor Donner de Ciências
Instituto de Tecnologia de Massachusetts

Agradecimentos

As ideias deste livro foram moldadas por muitas mentes. Todos os autores têm uma dívida incalculável para com escritores e pensadores anteriores, e a secção de Notas e Referências fornece um reconhecimento parcial da minha dívida. Mas outras pessoas tiveram uma influência mais imediata ao lerem e criticarem toda ou parte dos vários artigos, artigos e rascunhos ancestrais à presente versão deste livro. As suas contribuições variaram de breves cartas a críticas extensas e detalhadas, sugestões e revisões; merecem grande parte do crédito pela evolução do manuscrito para a sua forma e conteúdo atuais. No entanto, assumo toda a culpa pelas suas falhas remanescentes.

Assim, gostaria de agradecer a Dale Amon, David Anderson, Alice Barkan, James Bennett, David Blackwell, Kenneth Boulding, Joe Boyle, Stephen Bridge, James Cataldo, Fred e Linda Chamberlain, Hugh Daniel, Douglas Denholm, Peter Diamandis, Thomas Donaldson, Allan Drexler, Hazel Drexler, Arthur Dula, Freeman Dyson, Erika Erdmann, Robert Ettinger, Mike Federowicz, Carl Feynman, David Forrest, Christopher Fry, Andy, Donna, Mark e Scott Gassmann, Hazel e Ralph Gassmann, Agnes Gregory, Roger Gregory, David Hannah, Keith Henson, Eric Hill, Hugh Hixon, Miriam Hopkins, Joe Hopkins, Barbara Marx Hubbard, Scott A. Jones, Arthur Kantrowitz, Manfred Karnovsky, Pamela Keller, Tom e Mara Lansing, Jerome Lettvin, Elaine Lewis, David Lindbergh, Spencer Love, Robert e Susan Lovell, Steve Lubar, John Mann, Jeff MacGillivray, Bruce Mackenzie, Marvin Minsky, Chip Morningstar, Philip Morrison, Kevin Nelson, Hugh O'Neill, Gayle Pergamit, Gordon e Mary Peterson, Norma e Amy Peterson, Naomi Reynolds, Carol Rosin, Phil Salin, Conrad Schneiker, Alice Dawn Schuster, Rosemary Simpson, Leif Smith, Ray Sperber, David Sykes, Paul Trachtman, Kevin Ulmer, Patricia Wagner, Christopher Walsh, Steve Witham, David Woodcock e Elisa Wynn. Uma vez que esta lista foi compilada a partir de ficheiros imperfeitos e montes de manuscritos marcados, peço desculpa àqueles que possa ter omitido. Mais agradecimentos são devidos aos membros de muitas audiências, no MIT e noutros locais, por fazerem perguntas que me ajudaram a refinar estas ideias e a sua apresentação.

Pela sua ajuda e encorajamento, gostaria também de agradecer ao meu agente, Norman Kurz, e aos meus editores, James Ralmes, Dave Barbor e Patrick Filley. Finalmente, pelas contribuições de qualidade e magnitude especiais ao longo deste esforço, gostaria de

agradecer a Mark S. Miller e, acima de tudo, a Christine Peterson. Sem a ajuda dela, não teria sido possível de todo.

CAPÍTULO 1

Motores de Construção¹

A engenharia de proteínas... representa o primeiro passo importante rumo a uma capacidade mais geral para a engenharia molecular que nos permitiria estruturar a matéria átomo por átomo.

— KEVIN ULMER²
Diretor de Investigação Exploratória
Corporação Genex

CARVÃO E DIAMANTES, areia e chips de computador, cancro e tecido saudável: ao longo da história, variações no arranjo dos átomos distinguiram o barato do estimado, o doente do saudável. Arranjados de uma maneira, os átomos formam o solo, o ar e a água; arranjados de outra, formam morangos maduros. Arranjados de uma maneira, formam casas e ar fresco; arranjados de outra, formam cinzas e fumo.

A nossa capacidade de arranjar átomos está na base da tecnologia. Percorremos um longo caminho no nosso arranjo de átomos, desde lascar sílex para pontas de flechas até à usinagem de alumínio para naves espaciais. Orgulhamo-nos da nossa tecnologia, com os nossos medicamentos que salvam vidas e os computadores de secretária. No entanto, as nossas naves espaciais ainda são rudimentares, os nossos computadores ainda são estúpidos e as moléculas nos nossos tecidos ainda deslizam para a

desordem, primeiro destruindo a saúde e depois a própria vida. Apesar de todos os nossos avanços no arranjo de átomos, ainda usamos métodos primitivos. Com a nossa tecnologia atual, ainda somos forçados a lidar com átomos em rebanhos indisciplinados.

Mas as leis da natureza deixam muito espaço para o progresso, e as pressões da competição mundial já nos estão a impulsionar para a frente. Para melhor ou para pior, o maior avanço tecnológico da história ainda está por vir.

1. Dois Estilos de Tecnologia

A nossa tecnologia moderna assenta numa tradição ancestral. Há trinta mil anos, talhar sílex era a alta tecnologia da época. Os nossos antepassados pegavam em pedras que continham triliões de triliões de átomos e removiam lascas com biliões de triliões de átomos para fabricar as cabeças das suas machadas; realizavam um trabalho minucioso com um nível de perícia difícil de imitar hoje em dia. Também criavam padrões nas paredes das grutas em França com tinta pulverizada, usando as mãos como moldes. Mais tarde, moldaram recipientes cozendo argila e produziram bronze ao aquecer rochas. Moldaram o bronze à força de martelo. Produziram ferro, depois aço, e moldaram-no aquecendo, martelando e talhando.

Hoje, conseguimos sintetizar cerâmicas puras e aços mais resistentes, mas continuamos a moldá-los através de processos como a martelagem e o corte. Produzimos silício puro, serramo-lo

em fatias e desenhamos padrões na sua superfície usando minúsculos moldes e feixes de luz. Chamamos a estes produtos “chips” (ou circuitos integrados), e consideramo-los extremamente pequenos — pelo menos, em comparação com as cabeças de machado.

A nossa tecnologia microeletrónica conseguiu concentrar máquinas tão poderosas como os computadores do tamanho de uma sala dos anos 1950 em apenas alguns circuitos de silício inseridos num computador do tamanho de um bolso. Os engenheiros estão agora a desenvolver dispositivos cada vez mais pequenos, lançando enxames de átomos sobre superfícies cristalinas para construir fios e componentes com uma espessura de um décimo da de um fio de cabelo.

Estes microcircuitos podem parecer diminutos segundo os padrões dos talhadores de sílex, mas cada transístor ainda contém triliões de átomos, e os chamados “microcomputadores” continuam a ser visíveis a olho nu. À luz de uma tecnologia mais recente e poderosa, parecerão gigantescos.

O estilo de tecnologia ancestral que nos levou dos fragmentos de sílex aos circuitos de silício trabalha os átomos e moléculas em massa; chamemos-lhe tecnologia macroscópica ou de volume (bulk technology). A nova tecnologia irá manipular átomos e moléculas individuais com controlo e precisão; chamemos-lhe tecnologia molecular. Esta transformará o nosso mundo de formas que hoje nem conseguimos conceber.

Os microcircuitos têm componentes medidos em micrómetros — ou seja, milionésimos de metro —, mas as moléculas medem-se em nanómetros (mil vezes mais pequenos). Podemos usar os termos “nanotecnologia” e “tecnologia molecular” de forma intercambiável para descrever este novo estilo de tecnologia. Os engenheiros desta nova era irão construir tanto nanocircuitos como nanomáquinas.

2. Tecnologia Molecular Hoje

Uma definição de dicionário³ para máquina é: “qualquer sistema, geralmente composto por corpos rígidos, formado e ligado de modo a alterar, transmitir e direccionar forças aplicadas de forma predefinida para atingir um objetivo específico, como por exemplo a realização de um trabalho útil.” As máquinas moleculares enquadram-se bastante bem nesta definição.

Para imaginar estas máquinas, é necessário primeiro visualizar moléculas. Podemos imaginar os átomos como contas e as moléculas como aglomerados de contas, como os brinquedos de criança ligados por encaixes. De facto, os químicos por vezes visualizam moléculas construindo modelos com contas de plástico (algumas das quais se ligam em várias direções, como os cubos de um conjunto de Tinkertoys). Os átomos são arredondados como contas, e embora as ligações moleculares não sejam encaixes, a imagem capta pelo menos a noção essencial de que essas ligações podem ser quebradas e refeitas.

Se um átomo tivesse o tamanho de uma pequena bola de gude (berlinde), uma molécula relativamente complexa teria o tamanho de um punho. Esta imagem mental é útil, mas na realidade os átomos são cerca de 1/10.000 do tamanho de uma bactéria, e as bactérias são cerca de 1/10.000 do tamanho de um mosquito. (O núcleo atômico, no entanto, tem cerca de 1/100.000 do tamanho do próprio átomo; a diferença entre um átomo e o seu núcleo é como a diferença entre um fogo e uma reação nuclear.)

As coisas à nossa volta comportam-se como se comportam devido à forma como se comportam as suas moléculas. O ar não mantém forma nem volume porque as suas moléculas se movem livremente, colidindo e ricocheteando pelo espaço. As moléculas de água mantêm-se unidas enquanto se movem, por isso a água mantém um volume constante mesmo ao mudar de forma. O cobre mantém a sua forma porque os seus átomos se mantêm ligados em padrões regulares; podemos dobrá-lo ou martelá-lo porque os seus átomos deslizam uns sobre os outros sem se separarem. O vidro estilhaça quando o martelamos porque os seus átomos se separam antes de deslizarem. A borracha é constituída por redes de moléculas torcidas, como um emaranhado de molas. Quando esticada e solta, as suas moléculas esticam-se e depois enrolam-se novamente. Estes padrões moleculares simples compõem substâncias passivas. Padrões mais complexos constituem as nanomáquinas ativas das células vivas.

Os bioquímicos já trabalham com estas máquinas, feitas principalmente de proteínas — o principal material de engenharia das células vivas. Estas máquinas moleculares têm relativamente

poucos átomos e, por isso, possuem superfícies irregulares, como objetos feitos colando-se alguns berlindes. Além disso, muitos pares de átomos estão ligados por ligações que podem dobrar-se ou rodar, o que torna as máquinas proteicas especialmente flexíveis. Mas, como todas as máquinas, elas têm peças de diferentes formas e tamanhos que realizam trabalho útil. Todas as máquinas usam aglomerados de átomos como componentes. As máquinas proteicas apenas usam aglomerados muito pequenos.

Os bioquímicos sonham desenhar e construir tais dispositivos, mas ainda existem obstáculos a ultrapassar. Os engenheiros usam feixes de luz para projetar padrões sobre pastilhas de silício, mas os químicos têm de construir de forma muito mais indireta. Ao combinarem moléculas em várias sequências, têm apenas um controlo limitado sobre a forma como estas se ligam. Quando os bioquímicos necessitam de máquinas moleculares complexas, continuam a ter de as "emprestar" às células. No entanto, máquinas moleculares mais avançadas permitir-lhes-ão eventualmente construir nanocircuitos e nanomáquinas com a mesma facilidade com que hoje se constroem microcircuitos ou máquinas de lavar. A partir daí, o progresso tornar-se-á rápido e dramático.

Os engenheiros genéticos já estão a abrir caminho. Normalmente, quando os químicos produzem cadeias moleculares — chamadas polímeros — despejam moléculas num recipiente onde colidem e se ligam de forma aleatória em meio líquido. As cadeias resultantes têm comprimentos variáveis e os elementos são ligados em qualquer ordem.

Mas nas modernas máquinas de síntese genética⁴, os engenheiros genéticos constroem polímeros mais ordenados — moléculas de ADN específicas — combinando moléculas numa sequência determinada. Estas moléculas são os nucleótidos do ADN (as “letras” do alfabeto genético), e os engenheiros genéticos não os misturam ao acaso. Em vez disso, orientam a máquina para adicionar diferentes nucleótidos numa determinada ordem, de forma a formar uma mensagem específica. Primeiro ligam um tipo de nucleótido às extremidades da cadeia, depois lavam os resíduos e adicionam produtos químicos para preparar a extremidade da cadeia a fim de ligar o nucleótido seguinte. As cadeias crescem à medida que os nucleótidos são adicionados, um a um, numa sequência programada. O primeiro nucleótido de cada cadeia é ancorado a uma superfície sólida para impedir que a cadeia se perca durante os banhos químicos. Desta forma, uma máquina grande e desajeitada, contida num armário, consegue montar estruturas moleculares específicas feitas de partes cem milhões de vezes mais pequenas do que ela própria.

Mas este processo de montagem cega omite acidentalmente nucleótidos em algumas cadeias. A probabilidade de erros aumenta à medida que as cadeias se tornam mais longas. Tal como os operários descartam peças defeituosas antes de montar um automóvel, os engenheiros genéticos reduzem os erros descartando cadeias defeituosas. Depois, para unir estas cadeias curtas em genes funcionais (normalmente com milhares de nucleótidos), recorrem a máquinas moleculares encontradas em bactérias.

Estas máquinas proteicas, chamadas enzimas de restrição, “leem” certas sequências de ADN como “cortar aqui”. Leem esses padrões genéticos pelo toque — ao colarem-se a eles — e cortam a cadeia rearranjando alguns átomos. Outras enzimas juntam os pedaços, lendo partes correspondentes como “colar aqui” — também lendo as cadeias pela sua adesividade seletiva e colando-as através do rearranjo atômico. Usando máquinas de genes para escrever, e enzimas de restrição para cortar e colar, os engenheiros genéticos podem escrever e editar quaisquer mensagens de ADN que desejem.

Por si só, no entanto, o ADN é uma molécula com pouco valor prático. Não é forte como o Kevlar, nem colorido como um corante, nem ativo como uma enzima. No entanto, possui algo pelo qual a indústria está disposta a investir milhões: a capacidade de dirigir máquinas moleculares chamadas ribossomas. Nas células, as máquinas moleculares primeiro transcrevem o ADN, copiando a sua informação para produzir “fitas” de ARN. Depois, tal como as antigas máquinas de controlo numérico moldavam metais a partir de instruções armazenadas em fita, os ribossomas constroem proteínas baseando-se nas instruções contidas nas cadeias de ARN. E as proteínas são úteis.

As proteínas, como o ADN, assemelham-se a cordões de contas irregulares. Mas, ao contrário do ADN, as moléculas de proteína dobram-se e formam pequenos objetos capazes de agir. Algumas são enzimas — máquinas que constroem e destroem moléculas (e que copiam o ADN, o transcrevem e constroem outras proteínas no ciclo da vida). Outras proteínas são hormonas, que se ligam a

outras proteínas para sinalizar às células que devem alterar o seu comportamento. Os engenheiros genéticos podem produzir estes objetos de forma barata, direcionando a maquinaria molecular eficiente e de baixo custo existente nos organismos vivos para realizar o trabalho. Enquanto os engenheiros químicos, num complexo industrial, precisam de lidar com tonéis de substâncias reativas (que muitas vezes desorganizam átomos e produzem subprodutos tóxicos), os engenheiros que trabalham com bactérias conseguem fazê-las absorver substâncias, rearranjar cuidadosamente os átomos e armazenar o produto ou libertá-lo no meio que as rodeia.

Os engenheiros genéticos já conseguiram programar bactérias para produzir proteínas como a hormona do crescimento humano ou a renina, uma enzima usada na produção de queijo. A empresa farmacêutica Eli Lilly (Indianápolis) comercializa atualmente a Humulina, moléculas de insulina humana produzidas por bactérias.

3. Máquinas de Proteína Existentes

Estas hormonas e enzimas proteicas aderem seletivamente a outras moléculas. Uma enzima altera a estrutura da sua molécula-alvo e depois prossegue; uma hormona afeta o comportamento da sua molécula-alvo apenas enquanto ambas permanecerem ligadas. Enzimas e hormonas podem ser descritas em termos mecânicos, mas o seu comportamento é mais frequentemente analisado em termos químicos.

Contudo, outras proteínas desempenham funções mecânicas básicas⁵. Algumas empurram e puxam, outras funcionam como cordas ou estais, e partes de certas moléculas são rolamentos (ou casquilhos) de excelente qualidade. A maquinaria muscular, por exemplo, possui conjuntos de proteínas que estendem “braços”, agarram uma “corda” (também feita de proteína), puxam-na, e depois estendem-se novamente para um novo impulso; sempre que nos movemos, utilizamos estas máquinas. As amibas e as células humanas movimentam-se e alteram a sua forma através do uso de fibras e bastonetes que funcionam como músculos e ossos moleculares. Um motor reversível, com velocidade variável, impulsiona certas bactérias através da água, fazendo girar uma hélice em forma de saca-rolhas. Se um entusiasta conseguisse construir minúsculos automóveis em torno desses motores, vários milhares de bilhões caberiam num bolso, e autoestradas com 150 faixas poderiam ser construídas até nas mais finas das nossas capilares.

Dispositivos moleculares simples combinam-se para formar sistemas que se assemelham a máquinas industriais. Na década de 1950, engenheiros desenvolveram ferramentas de precisão que cortavam metal sob o controlo de fitas perfuradas. Um século e meio antes, Joseph-Marie Jacquard tinha criado um tear que tecia padrões complexos controlado por cartões perfurados. No entanto, mais de três mil milhões de anos antes de Jacquard, as células já haviam desenvolvido a maquinaria do ribossoma. Os ribossomas são a prova de que nanomáquinas construídas a partir de proteínas e RNA podem ser programadas para construir moléculas complexas.

Consideremos agora os vírus. Um tipo específico, o fago T4, comporta-se como uma seringa acionada por mola e assemelha-se a algo retirado de um catálogo de peças industriais. Consegue aderir a uma bactéria, perfurar-lhe a membrana e injetar DNA viral (sim, até as bactérias sofrem infeções). Tal como um conquistador que toma fábricas para construir mais tanques, esse DNA passa então a comandar a maquinaria celular para produzir mais DNA viral e mais seringas. Como todos os organismos, estes vírus existem porque são suficientemente estáveis e eficazes a garantir a reprodução de si mesmos.

Quer dentro das células, quer fora delas, as nanomáquinas obedecem às leis universais da natureza. Ligações químicas comuns mantêm unidos os seus átomos, e reações químicas comuns (orientadas por outras nanomáquinas) são responsáveis pela sua montagem. As moléculas de proteína podem inclusive unir-se espontaneamente para formar máquinas, sem necessidade de assistência especial, impulsionadas apenas pela agitação térmica e pelas forças químicas. Ao misturar proteínas virais (e o DNA que elas servem) num tubo de ensaio, os biólogos moleculares conseguiram montar vírus T4 funcionais. Esta capacidade é surpreendente: seria como colocar peças de automóvel numa caixa, agitá-la, e encontrar lá dentro um carro montado! No entanto, o vírus T4 é apenas uma entre muitas estruturas auto-organizáveis⁶. Biólogos moleculares conseguiram desmontar a maquinaria do ribossoma em mais de cinquenta moléculas distintas de proteína e RNA, e depois reconstituí-la, em tubos de ensaio, formando ribossomas novamente funcionais.

Para entender como isto acontece, imaginemos diferentes cadeias proteicas do vírus T4 a flutuar na água. Cada tipo dobra-se sobre si próprio formando um aglomerado com relevos e cavidades distintos, cobertos por padrões específicos de oleosidade, hidrofobicidade e cargas elétricas. Imaginemos estas cadeias a vaguar, a rodopiar, agitadas pelas vibrações térmicas das moléculas de água em redor. De tempos a tempos, duas colidem e separam-se. Mas, por vezes, duas colidem e encaixam: saliências em cavidades, zonas adesivas a coincidir — puxam-se mutuamente e aderem. Deste modo, proteína junta-se a proteína para formar secções do vírus, e estas secções, por sua vez, juntam-se para formar o todo.

Engenheiros de proteínas não precisarão de nano-braços e nano-mãos para montar nanomáquinas complexas. Ainda assim, minúsculos manipuladores serão úteis — e inevitavelmente serão construídos. Tal como os engenheiros atuais constroem maquinaria tão complexa como pianos mecânicos e braços robóticos a partir de motores, rolamentos e peças móveis comuns, também os bioquímicos do futuro utilizarão moléculas de proteína como motores, rolamentos e peças móveis para construir braços robóticos que, por sua vez, serão capazes de manipular moléculas individuais.

4. Desenhar com Proteína⁷

Quão distante está tal capacidade? Já foram dados alguns passos, mas muito trabalho ainda está por fazer. Os bioquímicos já mapearam as estruturas de muitas proteínas. Com máquinas de

genes a ajudar a escrever “fitas de ADN”, conseguem instruir as células a construir qualquer proteína que consigam desenhar⁸. Mas ainda não sabem como desenhar cadeias que se dobrem de modo a formar proteínas com a forma e função corretas. As forças que fazem com que as proteínas se dobrem são fracas, e o número de formas plausíveis como uma proteína pode dobrar-se é astronómico; por isso, desenhar uma proteína grande a partir do zero não é tarefa fácil.

As forças que mantêm as proteínas unidas para formar máquinas complexas são as mesmas que dobras inicialmente as cadeias proteicas. As diferentes formas e tipos de “aderência” dos aminoácidos — as contatos moleculares irregulares que formam as cadeias de proteínas — fazem com que cada cadeia se dobre de uma maneira específica, criando um objeto com uma forma particular. Os bioquímicos já aprenderam certas regras que sugerem como uma cadeia de aminoácidos pode dobrar-se, mas essas regras não são muito rígidas. Tentar prever como uma cadeia se dobrará é como tentar resolver um puzzle sem imagem — um puzzle cujas peças parecem encaixar-se de muitas formas mais ou menos iguais (ou igualmente erradas), sendo que apenas uma é correta. Tentativas falhadas poderiam consumir muitas vidas, e mesmo a resposta certa poderia passar despercebida. Os bioquímicos, mesmo com os melhores programas informáticos disponíveis, ainda não conseguem prever com precisão como se dobrará uma cadeia longa de proteína natural — e alguns já perderam a esperança de desenhar moléculas proteicas em breve.

Contudo, a maioria dos bioquímicos trabalha como cientista, não como engenheiro. Dedicam-se a prever como as proteínas naturais se dobram, não a *desenhar* proteínas que se dobrem de forma previsível. Estas tarefas podem parecer semelhantes⁹, mas diferem enormemente: a primeira é um desafio científico, a segunda, um desafio de engenharia. Por que razão deveriam as proteínas naturais dobrar-se de forma a facilitar a vida aos cientistas? A única exigência da natureza é que elas se dobrem de facto de forma funcional — não que o façam de maneira óbvia para os humanos.

As proteínas podem ser desenhadas desde o início com o objetivo de tornar a sua dobra mais previsível. Carl Pabo, escrevendo na revista *Nature*¹⁰, sugeriu uma estratégia de projeto baseada nesta intuição, e alguns engenheiros bioquímicos já desenharam e construíram pequenas cadeias de algumas dezenas de aminoácidos¹¹ que se dobram e se encaixam nas superfícies de outras moléculas, conforme planeado. Desenharam, do zero¹², uma proteína com propriedades semelhantes às da melitina, uma toxina presente no veneno das abelhas. Modificaram enzimas existentes, alterando o seu comportamento de forma previsível¹³. A nossa compreensão das proteínas cresce diariamente.

Em 1959, segundo o biólogo Garrett Hardin¹⁴, alguns geneticistas consideravam a engenharia genética impossível; hoje, é uma indústria. A bioquímica e o design assistido por computador são hoje campos em plena expansão, e, como escreveu Frederick Blattner na revista *Science*¹⁵, “os programas de xadrez para computador já atingiram um nível apenas ligeiramente inferior ao de um grande mestre. Talvez a solução para o problema do

dobramento das proteínas esteja mais próxima do que pensamos.” William Rastetter, da Genentech, escrevendo na *Applied Biochemistry and Biotechnology*¹⁶, pergunta: “Quão distante está o design e a síntese de enzimas *de novo* (do zero)? Dez, quinze anos?” Ele responde: “Talvez nem tanto.”

Forrest Carter, do Laboratório de Investigação Naval dos EUA, Ari Aviram e Philip Seiden da IBM, Kevin Ulmer da Genex Corporation, entre outros investigadores em universidades e laboratórios industriais espalhados pelo mundo, já iniciaram trabalhos teóricos e experimentos para desenvolver interruptores moleculares, dispositivos de memória e outras estruturas que possam ser integradas em computadores baseados em proteínas. O Laboratório Naval dos EUA já organizou dois encontros internacionais sobre dispositivos eletrônicos moleculares¹⁷, e uma conferência patrocinada pela Fundação Nacional de Ciência dos EUA recomendou o apoio à investigação básica¹⁸ com vista ao desenvolvimento de computadores moleculares. O Japão terá já iniciado um programa multimilionário com o objetivo de desenvolver motores e computadores moleculares automontáveis, e a VLSI Research Inc.¹⁹, de San Jose, refere que “parece que a corrida aos biochips [outro termo para sistemas eletrônicos moleculares] já começou. A NEC, Hitachi, Toshiba, Matsushita, Fujitsu, Sanyo-Denki e a Sharp iniciaram esforços de investigação a grande escala sobre biochips para biocomputadores.”

Os bioquímicos têm ainda outras razões para querer aprender a arte de desenhar proteínas. Novas enzimas prometem realizar processos químicos sujos e caros de forma mais barata e limpa, e

proteínas inovadoras oferecerão uma nova gama de ferramentas aos biotecnologistas. Já estamos no caminho da engenharia de proteínas e, como observa Kevin Ulmer na citação da *Science* que abre este capítulo, esse caminho conduz “a uma capacidade mais geral de engenharia molecular, que nos permitirá estruturar a matéria átomo por átomo.”

5. Nanotecnologia de Segunda Geração

Apesar da sua versatilidade, a proteína apresenta limitações enquanto material de engenharia. As máquinas proteicas deixam de funcionar quando secas, congelam quando expostas ao frio e "cozinham" quando aquecidas. Não construímos máquinas feitas de carne, cabelo ou gelatina; ao longo dos séculos, aprendemos a usar as nossas mãos de carne e osso para construir máquinas de madeira, cerâmica, aço e plástico. Do mesmo modo, faremos no futuro: utilizaremos máquinas feitas de proteínas para construir nanomáquinas feitas de materiais mais resistentes do que a própria proteína.

À medida que a nanotecnologia ultrapassar a dependência das proteínas, tornar-se-á mais comum do ponto de vista da engenharia. As moléculas serão montadas como componentes de um conjunto de construção (erector set), e as peças bem ligadas manter-se-ão no lugar. Assim como ferramentas convencionais constroem máquinas convencionais a partir de peças, também as ferramentas moleculares ligarão moléculas para formar minúsculos engrenagens, motores, alavancas e carcaças, podendo depois ser montadas para compor máquinas complexas.

Peças com apenas alguns átomos serão naturalmente irregulares (lombadas), mas os engenheiros podem trabalhar com peças irregulares se tiverem rolamentos suaves que as sustentem. Convenientemente, algumas ligações entre átomos funcionam como excelentes rolamentos: uma peça pode ser montada através de uma única ligação química²⁰ que lhe permita girar livre e suavemente. Como um rolamento pode ser feito com apenas dois átomos (e como as partes móveis podem conter apenas alguns átomos), as nanomáquinas poderão, de facto, conter componentes mecânicos à escala molecular.

Como serão construídas essas máquinas melhoradas? Ao longo do tempo, os engenheiros têm usado tecnologia para melhorar a própria tecnologia. Utilizaram ferramentas metálicas para moldar metal em ferramentas ainda melhores, e computadores para conceber e programar computadores mais avançados. Do mesmo modo, utilizarão máquinas de proteína para construir nanomáquinas superiores. As enzimas mostram o caminho: elas montam grandes moléculas ao “agarrar” pequenas moléculas da água em seu redor e mantê-las juntas até que uma ligação se forme. É assim que as enzimas sintetizam o ADN, o ARN, as proteínas, os lípidos, as hormonas e a clorofila — praticamente toda a gama de moléculas que se encontra nos seres vivos.

Os engenheiros bioquímicos, portanto, construirão novas enzimas para montar novos padrões atômicos. Por exemplo, poderão criar uma máquina semelhante a uma enzima que adicione átomos de carbono a um ponto específico, camada após camada. Se as ligações forem corretamente estabelecidas, os átomos

formarão uma fibra de diamante²¹ fina e flexível, com mais de cinquenta vezes a resistência do alumínio com o mesmo peso. As empresas aeroespaciais farão fila para comprar essas fibras por toneladas, para aplicação em compósitos avançados. (Este é apenas um pequeno exemplo de como a competição militar impulsionará o avanço da tecnologia molecular, como já impulsionou tantos outros campos no passado.)

Mas o grande avanço surgirá quando as máquinas de proteína forem capazes de construir estruturas mais complexas do que simples fibras. Estas máquinas de proteína programáveis assemelhar-se-ão aos ribossomos programados por ARN, ou às máquinas-ferramenta automatizadas de gerações anteriores, controladas por fitas perfuradas. Abrirão um novo mundo de possibilidades, permitindo aos engenheiros superar as limitações das proteínas para construir máquinas robustas, compactas e com projetos mais lineares e funcionais. As proteínas engenheiradas dividirão e unirão moléculas, tal como fazem as enzimas. As proteínas existentes já se ligam a uma variedade de moléculas mais pequenas, usando-as como ferramentas químicas; as proteínas recém-engenheiradas utilizarão todas estas ferramentas — e muitas mais.

Além disso, os químicos orgânicos já demonstraram que reações químicas podem produzir resultados extraordinários mesmo sem nanomáquinas a orientar as moléculas. Os químicos não têm controlo direto sobre os movimentos aleatórios das moléculas num líquido; estas colidem e reagem conforme as condições permitirem. Ainda assim, os químicos conseguem induzir reações²² que

produzem estruturas regulares como moléculas cúbicas ou dodecaédricas, e até estruturas improváveis como anéis moleculares com ligações altamente tensionadas. As máquinas moleculares terão uma versatilidade ainda maior na formação de ligações, pois poderão aproveitar os mesmos movimentos moleculares, mas guiando-os de formas que os químicos convencionais não conseguem.

De facto, como os químicos não conseguem direccionar os movimentos moleculares, raramente conseguem montar moléculas complexas com padrões específicos. As maiores moléculas que conseguem construir com padrões complexos e definidos são todas cadeias lineares. Criam esses padrões (como nas "gene machines") ao adicionarem moléculas uma de cada vez a uma cadeia em crescimento. Com apenas um ponto de ligação por cadeia, podem garantir que a próxima peça se encaixará no local certo.

Mas se uma molécula arredondada e irregular tiver, digamos, cem átomos de hidrogénio na sua superfície, como podem os químicos remover apenas um átomo específico (por exemplo, o quinto acima e o terceiro ao lado do ressalto frontal) para substituí-lo? Agitar produtos químicos simples dificilmente resolve o problema, pois pequenas moléculas raramente conseguem reagir com precisão num ponto específico de uma molécula maior. Mas as máquinas de proteína serão mais criteriosas.

Uma máquina de proteína flexível e programável poderá agarrar uma molécula grande (a peça de trabalho) enquanto posiciona uma molécula pequena no local exato onde se pretende a reação. Tal

como uma enzima, ligará então ambas as moléculas. Ao repetir este processo, adicionando molécula após molécula à peça de trabalho, a máquina construirá uma estrutura cada vez maior, mantendo controlo absoluto sobre o arranjo dos átomos. Esta é a capacidade essencial que tem faltado aos químicos.

Tal como os ribossomas, estas nanomáquinas poderão operar sob a direção de fitas moleculares. No entanto, ao contrário dos ribossomas, serão capazes de manipular uma vasta gama de pequenas moléculas (e não apenas aminoácidos), podendo ligá-las em qualquer ponto da peça de trabalho, não apenas na extremidade de uma cadeia. As máquinas de proteína combinarão, assim, as capacidades de cisão e ligação das enzimas com a programabilidade dos ribossomas. Mas enquanto os ribossomas só conseguem formar as dobras frouxas de uma proteína, estas máquinas de proteína construirão objetos pequenos e sólidos feitos de metal, cerâmica ou diamante — invisivelmente pequenos, mas resistentes.

Onde os nossos dedos de carne se magoam ou queimam, recorreremos a pinças de aço. E, onde as máquinas de proteína forem propensas a esmagar ou desintegrar-se, recorreremos a nanomáquinas feitas de materiais mais resistentes.

6. Montadores Universais

Estas nanomáquinas de segunda geração — construídas com mais do que apenas proteínas — farão tudo o que as proteínas conseguem fazer, e mais ainda²³. Em particular, algumas servirão

como dispositivos melhorados para montar estruturas moleculares. Capazes de tolerar ácido ou vácuo, congelamento ou aquecimento extremo, consoante o design (concepção/estrutura/projeto), estas máquinas semelhantes a enzimas serão capazes de usar como “ferramentas” praticamente qualquer uma das moléculas reativas usadas pelos químicos — mas irão utilizá-las com a precisão de máquinas programadas. Serão capazes de unir átomos em praticamente qualquer padrão estável, adicionando alguns de cada vez à superfície de uma peça de trabalho (workpiece), até que uma estrutura complexa esteja concluída. Pense nessas nanomáquinas como montadores (assemblers)²⁴.

Como os montadores nos permitirão posicionar átomos em quase qualquer arranjo razoável²⁵, permitir-nos-ão construir praticamente qualquer coisa que as leis da natureza permitam existir. Em particular, permitir-nos-ão construir praticamente qualquer coisa que sejamos capazes de conceber (design) — incluindo mais montadores. As consequências disto serão profundas, porque as nossas ferramentas rudimentares apenas nos permitiram explorar uma pequena parte do leque de possibilidades que a lei natural permite. Os montadores abrirão um mundo de novas tecnologias.

Os avanços nas tecnologias da medicina, do espaço, da computação, da produção — e da guerra — dependem todos da nossa capacidade de organizar átomos. Com montadores, poderemos reconstruir o nosso mundo... ou destruí-lo. Assim, neste ponto, parece sensato recuar um passo e olhar para esta perspetiva com toda a clareza possível, para nos assegurarmos de que os

montadores e a nanotecnologia não são uma mera miragem futuroológica.

7. Fixando Conclusões

Em tudo o que tenho vindo a descrever, mantive-me fiel aos factos comprovados da química e da biologia molecular. Ainda assim, surgem regularmente certas questões baseadas na física e na biologia. Estas merecem respostas mais diretas.

O princípio da incerteza da física quântica tornará inviáveis as máquinas moleculares?

Este princípio afirma (entre outras coisas) que as partículas não podem ser fixadas numa localização exata durante qualquer período de tempo. Ele impõe limites ao que as máquinas moleculares podem fazer — assim como impõe limites a tudo o resto. No entanto, cálculos mostram que o princípio da incerteza impõe poucos limites significativos quanto à estabilidade da posição dos átomos, pelo menos para os fins aqui descritos. O princípio da incerteza torna bastante difusas (fuzzy) as posições dos eletrões, e, de facto, essa difusão determina o próprio tamanho e estrutura dos átomos. No entanto, um átomo como um todo tem uma posição comparativamente bem definida, estabelecida pelo seu núcleo relativamente maciço. Se os átomos não se mantivessem razoavelmente estáveis na sua posição, as moléculas simplesmente não existiriam. Não é necessário estudar mecânica quântica para confiar nestas conclusões, porque as máquinas moleculares

presentes na célula demonstram que as máquinas moleculares funcionam.

As vibrações moleculares causadas pelo calor tornarão as máquinas moleculares inviáveis ou demasiado instáveis para serem utilizadas?

As vibrações térmicas causarão mais problemas do que o princípio da incerteza, mas, mais uma vez, as máquinas moleculares já existentes demonstram diretamente que tais máquinas podem funcionar a temperaturas comuns. Apesar das vibrações térmicas, a maquinaria celular que copia o ADN (DNA) em certas células²⁶ comete menos de um erro por cada 100.000.000.000 (cem mil milhões) de operações. Para alcançar este grau de precisão, contudo, as células utilizam máquinas (como a enzima DNA polymerase I) que reveem (proofread) a cópia e corrigem os erros. Os montadores (assemblers) provavelmente também necessitarão de capacidades semelhantes de verificação e correção de erros, se quiserem produzir resultados fiáveis.

A radiação irá perturbar as máquinas moleculares e torná-las inutilizáveis?

A radiação de alta energia pode quebrar ligações químicas e perturbar o funcionamento das máquinas moleculares. No entanto, mais uma vez, as células vivas demonstram que existem soluções: elas funcionam durante anos, reparando e substituindo componentes danificados pela radiação²⁷. Além disso, como cada

máquina individual é extremamente pequena, apresenta uma área de impacto reduzida para a radiação e raramente é atingida. Ainda assim, se um sistema de nanomáquinas tiver de ser fiável, terá de tolerar um certo grau de dano — e os componentes danificados terão de ser regularmente reparados ou substituídos. Esta abordagem à fiabilidade é bem conhecida pelos engenheiros que projetam aviões e naves espaciais.

Já que a evolução nunca produziu montadores (assemblers), isso demonstra que eles são impossíveis ou inúteis?

As questões anteriores foram em parte respondidas com base na maquinaria molecular existente nas células. Isso constitui uma prova simples e poderosa de que as leis da natureza permitem que pequenos grupos de átomos se comportem como máquinas controladas, capazes de construir outras nanomáquinas. Apesar da semelhança básica com os ribossomas, os montadores serão diferentes de tudo o que se encontra nas células; as funções que desempenharão — embora consistindo em movimentos e reações moleculares comuns — produzirão resultados inéditos. Nenhuma célula, por exemplo, fabrica fibras de diamante.

A ideia de que novos tipos de nanomáquinas poderão oferecer capacidades úteis e inéditas pode parecer surpreendente: em todos os seus milhares de milhões de anos de evolução, a vida nunca abandonou a sua dependência fundamental das máquinas feitas de proteínas²⁸. Mas isso sugere, porventura, que melhorias são impossíveis? A evolução dá-se através de alterações graduais, e o

sistema *do* ADN não consegue *substituir-se* facilmente a si próprio. Dado que o sistema ADN/ARN/ribossoma está especializado na produção de proteínas, a vida nunca teve, na prática, a oportunidade de evoluir uma alternativa. Qualquer gestor de produção compreenderá as razões: tal como numa fábrica, a vida não pode simplesmente parar para substituir os seus sistemas antigos.

A existência de maquinaria molecular melhorada não deveria surpreender-nos mais do que o facto de o aço de liga ser dez vezes mais resistente do que o osso, ou os fios de cobre transmitirem sinais um milhão de vezes mais depressa do que os nervos. Os automóveis ultrapassam os guepardos, os jatos voam mais alto e rápido do que os falcões, e os computadores já ultrapassaram os humanos na arte de fazer cálculos. O futuro trará novos exemplos de melhorias em relação à evolução biológica — sendo as nanomáquinas de segunda geração apenas um entre muitos.

Em termos físicos, é perfeitamente compreensível por que razão os montadores avançados conseguirão fazer mais do que as atuais máquinas moleculares feitas de proteínas. Serão programáveis como os ribossomas, mas capazes de utilizar uma gama muito mais vasta de "ferramentas" do que todas as enzimas de uma célula juntas. Além disso, como serão construídos a partir de materiais muito mais fortes, rígidos e estáveis do que as proteínas, poderão exercer forças superiores, mover-se com maior precisão e suportar condições muito mais extremas. Tal como o braço articulado de um robô industrial — mas ao contrário de qualquer estrutura presente numa célula viva — estes montadores serão capazes de rodar e

manipular moléculas em três dimensões sob controlo programado, possibilitando a montagem precisa de objetos complexos. Estas vantagens permitir-lhes-ão montar uma gama muito mais vasta de estruturas moleculares do que aquelas que as células vivas alguma vez foram capazes de construir.

Existirá alguma magia especial na vida, essencial para que a maquinaria molecular funcione?

Pode-se duvidar de que nanomáquinas artificiais consigam igualar as capacidades das nanomáquinas presentes nas células, se houvesse razão para acreditar que estas contêm algum tipo de magia especial que as faz funcionar. Esta ideia é conhecida como "vitalismo". Os biólogos abandonaram-na porque encontraram explicações químicas e físicas para todos os aspetos das células vivas que até hoje estudaram, incluindo o seu movimento, crescimento e reprodução. De facto, este conhecimento é a base da biotecnologia.

Nanomáquinas flutuando em tubos de ensaio estéreis, sem a presença de células, já foram feitas para desempenhar todos os tipos básicos de atividades que realizam dentro das células vivas. Começando com substâncias químicas que podem ser obtidas do ar poluído, os bioquímicos construíram máquinas proteicas funcionais sem qualquer ajuda de células. R. B. Merrifield, por exemplo, utilizou técnicas químicas²⁹ para montar aminoácidos simples e produzir ribonuclease pancreática bovina — um dispositivo enzimático que desintegra moléculas de RNA. A vida é especial na

sua estrutura, no seu comportamento e naquilo que se sente internamente ao estar vivo, mas as leis da natureza que regem a maquinaria da vida também regem o resto do universo.

A argumentação a favor da viabilidade dos montadores e outras nanomáquinas pode parecer sólida, mas por que não esperar simplesmente para ver se eles conseguem realmente ser desenvolvidos?

A simples curiosidade já parece ser razão suficiente para explorar as possibilidades abertas pela nanotecnologia — mas existem razões ainda mais fortes. Estes desenvolvimentos vão varrer o mundo dentro de dez a cinquenta anos — ou seja, dentro da expectativa de vida de nós próprios ou das nossas famílias. Além disso, as conclusões dos capítulos seguintes sugerem que uma política de “esperar para ver” seria extremamente cara — custaria milhões de vidas, podendo até pôr fim à vida na Terra.

A argumentação a favor da viabilidade da nanotecnologia e dos montadores é suficientemente sólida para ser levada a sério? Parece que sim, pois o cerne da argumentação assenta em dois factos bem estabelecidos da ciência e da engenharia:

- (1) que existem máquinas moleculares atuais que desempenham um leque de funções básicas; e

(2) que componentes com essas funções básicas podem ser combinados para construir máquinas complexas. Uma vez que as reações químicas podem ligar átomos de diversas formas, e que as máquinas moleculares podem dirigir reações químicas segundo instruções programadas, os montadores são, definitivamente, viáveis.

8. Nanocomputadores

Os montadores trarão um avanço de importância óbvia e fundamental: os engenheiros irão utilizá-los para reduzir drasticamente o tamanho e o custo dos circuitos dos computadores, ao mesmo tempo que aumentarão enormemente a sua velocidade de operação.

Com a tecnologia macroscópica atual, os engenheiros criam padrões em chips de silício lançando-lhes átomos e fótons, mas os padrões obtidos permanecem planos e os defeitos à escala molecular são inevitáveis. Com os montadores, no entanto, os engenheiros poderão construir circuitos em três dimensões e com precisão atômica. Os limites exatos da tecnologia eletrônica de hoje ainda são incertos, porque o comportamento quântico dos elétrons em redes complexas de estruturas minúsculas apresenta problemas complexos — alguns deles decorrentes diretamente do princípio da incerteza. Quaisquer que sejam esses limites, serão atingidos com a ajuda dos montadores.

Os computadores mais rápidos utilizarão efeitos eletrônicos, mas os mais pequenos poderão não o fazer. Isto pode parecer estranho, mas a essência da computação nada tem a ver com a eletrónica. Um computador digital é, basicamente, um conjunto de interruptores capazes de ligar e desligar uns aos outros. Os seus interruptores começam numa dada configuração (por exemplo, representando $2 + 2$), e depois mudam de estado entre si para formar uma nova configuração (representando 4), e assim por diante. Tais padrões podem representar praticamente qualquer coisa. Os engenheiros constroem computadores a partir de minúsculos interruptores elétricos ligados por fios apenas porque interruptores mecânicos, ligados por hastes ou cordas, seriam hoje grandes, lentos, pouco fiáveis e caros.

A ideia de um computador puramente mecânico está longe de ser nova. Em Inglaterra, durante meados do século XIX, Charles Babbage³⁰ inventou um computador mecânico construído com engrenagens de latão; a sua colaboradora Augusta Ada, Condessa de Lovelace, inventou a programação informática. As constantes reformulações da máquina por parte de Babbage, os problemas com a precisão na sua fabricação e a oposição de críticos atentos ao orçamento (alguns duvidando da utilidade dos computadores!) combinaram-se para impedir a conclusão do projeto.

Nessa tradição, Danny Hillis e Brian Silverman, do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, construíram um computador mecânico de propósito especial capaz de jogar o jogo do galo (tic-tac-toe). Com vários metros de lado, cheio de eixos rotativos e estruturas móveis que representam o estado do tabuleiro e a

estratégia do jogo, ele encontra-se agora no Museu do Computador em Boston. Parece muito com um grande modelo molecular de bolas e hastes, pois é construído com Tinkertoys.

Engrenagens de latão e Tinkertoys fazem computadores grandes e lentos. Contudo, com componentes de apenas alguns átomos de largura, um simples computador mecânico caberia dentro de 1/100 de um micrón cúbico, muitos milhares de milhões de vezes mais compacto do que a atual microeletrónica. Mesmo com um bilião de bytes de armazenamento, um computador nanomecânico poderia caber numa caixa com um micrón de largura³¹, aproximadamente do tamanho de uma bactéria. E seria rápido. Embora os sinais mecânicos³² se desloquem cerca de 100.000 vezes mais devagar do que os sinais elétricos nas máquinas atuais, teriam de percorrer apenas 1/1.000.000 da distância, e assim enfrentariam menos atraso. Por isso, um mero computador mecânico funcionaria mais rapidamente do que os turbilhões eletrónicos de hoje.

Os nanocomputadores *eletrónicos* serão provavelmente milhares de vezes mais rápidos do que os microcomputadores eletrónicos — talvez centenas de milhares de vezes mais rápidos, se um esquema proposto pelo físico laureado com o Prémio Nobel Richard Feynman³³ se concretizar. O aumento da velocidade através da redução do tamanho é uma história antiga na eletrónica.

9. Desmontadores

Os computadores moleculares controlarão os montadores moleculares, fornecendo o fluxo rápido de instruções necessário para dirigir a colocação de vastos números de átomos. Os nanocomputadores com dispositivos de memória molecular também armazenarão dados gerados por um processo oposto ao da montagem.

Os montadores ajudarão os engenheiros a sintetizar coisas; os seus equivalentes, os desmontadores³⁴, ajudarão cientistas e engenheiros a analisar coisas. A justificação para os montadores assenta na capacidade das enzimas e das reações químicas para formar ligações, e das máquinas para controlar o processo. A justificação para os desmontadores assenta na capacidade das enzimas e das reações químicas para quebrar ligações, e das máquinas para controlar esse processo. Enzimas, ácidos, oxidantes, metais alcalinos, iões e grupos reativos de átomos chamados radicais livres — todos podem quebrar ligações e remover grupos de átomos.

Como nada é absolutamente imune à corrosão, parece plausível que ferramentas moleculares venham a ser capazes de desmontar qualquer coisa, alguns átomos de cada vez. Além disso, uma nanomáquina poderá (se necessário ou conveniente) aplicar também força mecânica, libertando assim grupos de átomos através de uma espécie de alavanca molecular. Uma nanomáquina capaz de fazer isto, enquanto regista o que remove camada por camada, é um desmontador. Montadores, desmontadores e

nanocomputadores funcionarão em conjunto. Por exemplo, um sistema de nanocomputação poderá dirigir o desmantelamento de um objeto, registrar a sua estrutura e depois dirigir a montagem de cópias perfeitas. E isso dá uma ideia do poder da nanotecnologia.

10. O Mundo Feito Novo

Os montadores levarão anos a surgir, mas o seu surgimento parece quase inevitável: embora o caminho até aos montadores tenha muitos passos, cada passo tornará o seguinte mais acessível e trará recompensas imediatas. Os primeiros passos já foram dados, sob os nomes de “engenharia genética” e “biotecnologia”. Outros caminhos rumo aos montadores parecem possíveis. A menos que ocorra uma destruição global ou um controlo global, a corrida tecnológica continuará, quer o desejemos quer não. E à medida que os avanços na conceção assistida por computador acelerarem o desenvolvimento de ferramentas moleculares, o avanço rumo aos montadores tornar-se-á mais célere.

Para termos alguma esperança de compreender o nosso futuro, devemos compreender as consequências dos montadores, desmontadores e nanocomputadores. Eles prometem trazer mudanças tão profundas quanto a revolução industrial, os antibióticos e as armas nucleares — tudo condensado numa única e avassaladora revolução. Para compreender um futuro de mudanças tão profundas, faz sentido procurar princípios de mudança que tenham sobrevivido aos maiores abalos do passado. Esses princípios revelar-se-ão guias úteis.

CAPÍTULO 2

Os Princípios da Mudança

Pense no processo de concepção¹ como algo que envolve primeiro a geração de alternativas e depois o teste dessas alternativas em relação a uma série de requisitos e restrições.

— HERBERT A. SIMON

OS MONTADORES MOLECULARES trarão uma revolução sem paralelo desde o desenvolvimento dos ribossomas, os montadores primitivos existentes na célula. A nanotecnologia daí resultante poderá ajudar a vida a espalhar-se para além da Terra — um passo sem paralelo desde que a vida se espalhou para além dos mares. Poderá ajudar a mente a emergir nas máquinas — um passo sem paralelo desde que a mente emergiu nos primatas. E poderá permitir que as nossas mentes renovem e reconstruam os nossos corpos — um passo sem qualquer paralelo.

Estas revoluções trarão perigos e oportunidades demasiado vastos para serem plenamente compreendidos pela imaginação humana. No entanto, os princípios de mudança que se aplicaram às moléculas, às células, aos animais, às mentes e às máquinas deverão continuar válidos mesmo numa Era de biotecnologia, nanomáquinas e mentes artificiais. Os mesmos princípios que se aplicaram no mar, em terra e no ar deverão perdurar à medida que a vida da Terra se expande em direção às estrelas. Compreender

os princípios duradouros da mudança ajudar-nos-á a compreender o potencial — tanto para o bem como para o mal — das novas tecnologias.

1. Ordem do Caos

A ordem pode emergir do caos sem que ninguém dê ordens: cristais organizados condensaram-se a partir de gás interestelar informe muito antes do aparecimento do Sol, da Terra ou da vida. O caos também dá origem a uma ordem cristalina em circunstâncias mais familiares. Imaginemos uma molécula — talvez de forma regular, ou talvez assimétrica e nodosa como uma raiz de gengibre. Agora imaginemos um vasto número dessas moléculas a moverem-se aleatoriamente num líquido, girando e agitando-se como ébrias em queda livre na escuridão. Imaginemos o líquido a evaporar e a arrefecer, forçando as moléculas a aproximarem-se e a abrandar os seus movimentos. Reunir-se-ão estas moléculas de formas estranhas simplesmente em montes desordenados? Regra geral, não. Normalmente, assentam-se numa disposição cristalina, cada uma aninhada de forma ordenada junto às suas vizinhas, formando filas e colunas tão perfeitas como um tabuleiro de xadrez — embora, muitas vezes, mais complexas.

Este processo não envolve magia nem uma propriedade especial das moléculas ou das forças quânticas. Nem sequer requer formas especialmente compatíveis como as que permitem às proteínas auto-organizarem-se em máquinas. Esferas de tamanho uniforme, se colocadas numa bandeja e agitadas, também se organizam numa disposição regular.

Os cristais crescem por tentativa e eliminação do erro, por variação e seleção. Nenhuma mão minúscula os monta. Um cristal pode começar por um aglomerado fortuito de moléculas: estas vagueiam, colidem e agrupam-se ao acaso, mas os aglomerados aderem melhor quando se encaixam no padrão cristalino correto. Outras moléculas então colidem com esse primeiro e diminuto cristal. Algumas colidem na posição ou orientação errada; aderem mal e acabam por soltar-se. Outras, por acaso, colidem de forma apropriada; aderem melhor e, muitas vezes, permanecem. Camada sobre camada, o padrão cristalino estende-se. Embora as moléculas colidam ao acaso, não aderem ao acaso. A ordem cresce a partir do caos por meio da variação e da seleção.

2. Moléculas em Evolução

No crescimento cristalino, cada camada forma um molde para a seguinte. Camadas uniformes acumulam-se até formar um bloco sólido.

Nas células, cadeias de ADN ou ARN podem também servir como moldes, com o auxílio de enzimas que funcionam como máquinas de cópia moleculares. Mas as subunidades das cadeias de ácidos nucleicos podem ser organizadas em muitas sequências diferentes, e uma cadeia-molde pode separar-se da sua cópia. Tanto o molde como a cópia² podem então ser copiados novamente. O bioquímico Sol Spiegelman³ utilizou uma máquina de cópia (uma proteína de um vírus) em experiências realizadas em tubo de ensaio. Num ambiente simples e sem vida, essa máquina duplica moléculas de ARN.

Imaginemos uma cadeia de ARN a flutuar num tubo de ensaio juntamente com máquinas de cópia e subunidades de ARN. A cadeia gira e contorce-se até colidir com uma máquina de cópia na posição certa para aderir. As subunidades colidem aleatoriamente até que uma do tipo certo encontre a máquina de cópia na posição adequada para coincidir com a cadeia-molde. À medida que subunidades compatíveis calham a cair na posição correta, a máquina agarra-as e liga-as à cópia em crescimento; embora as subunidades colidam ao acaso, a máquina liga-as de forma seletiva. Por fim, a máquina, o molde e a cópia separam-se.

Na terminologia do zoólogo de Oxford Richard Dawkins⁴, coisas que originam cópias de si mesmas são denominadas replicadores. Neste ambiente, as moléculas de ARN qualificam-se: uma única molécula depressa se torna em duas, depois quatro, oito, dezasseis, trinta e duas, e assim sucessivamente, multiplicando-se exponencialmente. Mais tarde, a taxa de replicação estabiliza: o número fixo de máquinas proteicas só consegue produzir cópias de ARN a uma certa velocidade, independentemente de quantas moléculas-molde competem pelos seus serviços. Mais adiante, os materiais de base para a produção de ARN escasseiam e a replicação estagna. A população explosiva de moléculas atinge um limite de crescimento e deixa de se reproduzir.

As máquinas de cópia, no entanto, frequentemente cometem erros ao copiar uma cadeia de ARN, inserindo, eliminando ou trocando uma subunidade. A cadeia mutada resultante difere então em comprimento ou sequência de subunidades. Tais alterações são bastante aleatórias, e as mudanças acumulam-se à medida que as

moléculas copiadas com erro são novamente copiadas com erro. À medida que as moléculas se multiplicam, começam a divergir dos seus antepassados e entre si. Isto poderia parecer uma receita para o caos.

Contudo, os bioquímicos descobriram que diferentes moléculas de ARN replicam-se a diferentes velocidades, dependendo dos seus comprimentos e padrões de subunidades. Os descendentes dos replicadores mais rápidos tornam-se naturalmente mais numerosos. De facto, se um tipo se replicar apenas 10% mais depressa do que os seus “irmãos”, então, após cem gerações, cada um dos do tipo mais rápido dará origem a mil vezes mais descendentes. Diferenças pequenas em crescimento exponencial acumulam-se de forma exponencial.

Quando um tubo de ensaio esgota as subunidades, o experimentador pode colher amostras do ARN e “infetar” um novo tubo. O processo reinicia-se, e as moléculas que dominaram a primeira ronda de competição começam com vantagem. Novas alterações menores surgem, acumulando-se ao longo do tempo em mudanças maiores. Algumas moléculas replicam-se mais depressa, e o seu tipo passa a dominar a mistura. Quando os recursos se esgotam, o experimentador pode novamente recolher ARN e reiniciar o processo (repetidamente), mantendo estáveis as condições.

Este experimento revela um processo natural: independentemente das sequências de RNA com que o experimentador comece, o caos aparente de erros aleatórios e

cópias enviesadas acaba por dar origem a um único tipo de molécula de RNA (com pequenas variações provocadas pelos erros de cópia). A sua versão típica possui uma sequência bem definida de 220 subunidades. Trata-se do melhor replicador de RNA nesse ambiente, e por isso sobrevive — dominando a população e eliminando os restantes.

A cópia prolongada, os erros sucessivos e a competição levam sempre ao mesmo desfecho, seja qual for o comprimento ou o padrão da molécula inicial. Embora ninguém pudesse prever à partida qual seria o padrão vencedor, qualquer pessoa consegue ver que, num sistema tão simples, a mudança e a competição tendem naturalmente a produzir um único vencedor. Pouco mais poderia acontecer.

Se os replicadores interagissem entre si de forma mais intensa — talvez atacando-se ou ajudando-se seletivamente —, o resultado poderia assemelhar-se a uma ecologia mais complexa. Mas, tal como o sistema está configurado, limitam-se a competir por um recurso comum.

Uma variação deste exemplo mostra-nos algo mais: as moléculas de RNA adaptam-se de maneira diferente a ambientes distintos. Uma máquina molecular chamada ribonuclease agarra as moléculas de RNA com determinadas sequências de subunidades expostas e corta-as ao meio. No entanto, tal como as proteínas, as moléculas de RNA dobram-se segundo padrões dependentes da sua sequência, e podem proteger os seus pontos vulneráveis dobrando-se de forma adequada. Os experimentadores observaram que as

moléculas de RNA evoluem para sacrificar a velocidade de replicação em favor de uma melhor proteção, quando a ribonuclease está presente. Mais uma vez, surge um competidor dominante.

Repare que, pouco a pouco, termos biológicos começam a surgir nesta descrição: como as moléculas se replicam, o termo “geração” parece adequado; moléculas “descendentes” de um “ancestral comum” são consideradas “parentes”, e palavras como “crescimento”, “reprodução”, “mutação” e “competição” também se tornam pertinentes. Porquê? Porque estas moléculas copiam-se com pequenas variações, tal como os genes dos organismos vivos. Quando replicadores com variações diferentes obtêm sucessos diferentes, os mais bem-sucedidos tendem a acumular-se. Este processo — onde quer que ocorra — é aquilo a que chamamos “evolução”.

Neste exemplo de tubo de ensaio, podemos observar a evolução reduzida aos seus elementos essenciais, despida da controvérsia emocional que muitas vezes envolve a evolução da vida. Os replicadores de RNA e as proteínas que funcionam como máquinas copiadoras são coleções bem definidas de átomos, obedecendo a princípios bem compreendidos e evoluindo sob condições laboratoriais repetíveis. Os bioquímicos conseguem sintetizar RNA e proteínas a partir de produtos químicos disponíveis no mercado, sem qualquer ajuda da vida biológica.

Estas máquinas de cópia são, na verdade, proteínas extraídas de um tipo de vírus que infeta bactérias e utiliza RNA como material

genético. Estes vírus sobrevivem entrando numa bactéria, utilizando os seus recursos para se replicarem e, depois, escapando para infectar novas bactérias. Os erros de cópia do RNA viral produzem mutações, e os vírus que se replicam com maior sucesso tornam-se mais comuns. Isto é evolução por seleção natural — “natural”, ao que parece, porque envolve elementos não humanos da natureza.

Mas, ao contrário dos RNAs de tubo de ensaio, o RNA viral precisa de fazer mais do que simplesmente replicar-se enquanto molécula isolada. O RNA viral bem-sucedido tem de comandar os ribossomas bacterianos para que construam dispositivos proteicos que permitam ao vírus sair da bactéria antiga, sobreviver no exterior e, por fim, entrar noutra bactéria. Esta informação adicional torna as moléculas de RNA viral cerca de 4.500 subunidades mais longas.

Para se replicar com sucesso, o DNA dos grandes organismos tem de realizar tarefas ainda mais complexas: dirigir a construção de dezenas de milhares de diferentes máquinas proteicas, bem como o desenvolvimento de tecidos e órgãos sofisticados. Isto exige milhares de genes codificados em milhões — ou mesmo bilhões — de subunidades de DNA. Apesar disso, o processo essencial da evolução por variação e seleção mantém-se idêntico: no tubo de ensaio, nos vírus e para além deles.

3. Explicando a Ordem

Há pelo menos três formas de explicar a estrutura de uma população evoluída de replicadores moleculares, sejam eles RNA em tubo de ensaio, genes virais ou genes humanos. A primeira forma de explicação é um relato pormenorizado dos seus históricos: como ocorreram mutações específicas e como se propagaram. Isto é impossível sem registrar todos os eventos moleculares, e mesmo que tal registo existisse, seria extremamente enfadonho.

A segunda forma de explicação recorre a uma palavra algo enganadora: propósito. Em detalhe, as moléculas simplesmente mudam de forma aleatória e replicam-se seletivamente. No entanto, ao tomarmos distância do processo, poderíamos descrever o resultado imaginando que as moléculas sobreviventes mudaram “para alcançar o objetivo” da replicação. Por que é que as moléculas de RNA que evoluíram sob a ameaça de ribonuclease se dobram da forma como o fazem? Por causa de uma longa e detalhada história, claro, mas a ideia de que “elas querem evitar o ataque e sobreviver para se replicarem” preveria o mesmo resultado. A linguagem do propósito constitui uma abreviação útil (tente-se discutir a ação humana sem ela!), mas a aparência de propósito não precisa de resultar da ação de uma mente. O exemplo do RNA demonstra isso de forma bastante clara.

A terceira (e muitas vezes melhor) forma de explicação — em termos evolutivos — afirma que a ordem emerge através da variação e seleção dos replicadores. Uma molécula dobra-se de determinada maneira porque se assemelha a antecessoras que se

multiplicaram com mais sucesso (evitando o ataque, etc.) e deixaram descendentes, incluindo essa mesma molécula. Como Richard Dawkins salienta⁵, a linguagem do propósito (se usada cuidadosamente) pode ser traduzida para a linguagem da evolução.

A evolução atribui padrões de sucesso à *eliminação de alterações malsucedidas*. Explica, assim, um resultado positivo como sendo fruto de um duplo negativo — um tipo de explicação que parece ligeiramente difícil de apreender. Pior ainda, explica algo visível (entidades bem-sucedidas e com aparência de propósito) em termos de algo invisível (entidades fracassadas que desapareceram). Como só os seres bem-sucedidos deixaram vestígios no mundo — sob a forma dos ossos dos seus descendentes —, os fracassos deformados do passado deixaram poucos ou nenhuns fósseis.

A mente humana tende a focar-se no visível, procurando causas positivas para resultados positivos, uma força ordenadora por trás de resultados ordenados. No entanto, através da reflexão, podemos perceber que este grande princípio mudou o nosso passado e moldará o nosso futuro: *a evolução prossegue pela variação e seleção dos replicadores*.

4. Organismos em Evolução

A história da vida é a história de uma corrida armamentista baseada em maquinaria molecular. Hoje, à medida que essa corrida se aproxima de uma nova e mais veloz fase, precisamos ter a

certeza de que compreendemos o quão profundamente enraizada está a evolução. Num tempo em que a ideia da evolução biológica é muitas vezes desvalorizada nas escolas e por vezes atacada, devemos lembrar-nos de que as provas que a sustentam são tão sólidas como rocha e tão comuns como as células.

Nas páginas de pedra, a própria Terra registou a história da vida. No fundo de lagos e oceanos, conchas, ossos e sedimentos acumularam-se, camada sobre camada. Por vezes, uma corrente alterada ou uma convulsão geológica lavou as camadas; caso contrário, estas simplesmente se aprofundaram. As camadas antigas, enterradas em profundidade, foram comprimidas, cozidas, embebidas em águas minerais e transformadas em pedra.

Durante séculos, os geólogos estudaram rochas para ler o passado da Terra. Há muito tempo, encontraram conchas marinhas nas rochas esmagadas e enrugadas das cordilheiras montanhosas. Em 1785 — setenta e quatro anos antes do detestado livro de Darwin⁶ — James Hutton já havia concluído que o lodo dos fundos marinhos fora comprimido até se tornar pedra e elevado aos céus por forças ainda não compreendidas. Que mais poderiam os geólogos pensar, a não ser que a própria natureza mentisse?

Eles observaram que os fósseis de ossos e conchas diferiam de camada para camada. Viram que conchas em determinadas camadas aqui coincidiam com conchas em camadas ali, mesmo que essas camadas estivessem enterradas sob extensões de terra entre os locais. Atribuíram nomes às camadas (A, B, C, D..., ou Osagiana, Merameciana, Chesteriana Inferior, Chesteriana Superior...) e

usaram fósseis característicos para rastrear as camadas rochosas. O constante movimento da crosta terrestre não deixou exposta em lado nenhum uma sequência completa de camadas, mas geólogos que encontravam A, B, C, D, E num lugar, C, D, E, F, G, H, I, J noutro e J, K, L noutro ainda, podiam ver que A precedia L. Geólogos do petróleo (mesmo os que não se interessam pela evolução nem pelas suas implicações) continuam a usar tais fósseis para datar camadas rochosas e rastrear essas camadas de um local de perfuração para outro.

Os cientistas chegaram à conclusão óbvia. Tal como as espécies marinhas hoje habitam vastas áreas, também o faziam em tempos passados. Tal como hoje as camadas se acumulam umas sobre as outras, também o fizeram então. Conchas semelhantes em camadas semelhantes indicam sedimentos depositados na mesma época. As conchas mudam de camada para camada porque as espécies mudaram de Era para Era. Foi isto que os geólogos encontraram escrito em conchas e ossos sobre as páginas de pedra.

As camadas superiores de rocha contêm ossos de animais recentes; camadas mais profundas contêm ossos de animais agora extintos. Camadas ainda mais antigas não mostram qualquer traço de espécies modernas. Sob ossos de mamíferos encontram-se ossos de dinossauros; em camadas mais antigas, ossos de anfíbios, depois conchas e ossos de peixes, e finalmente nenhuma concha ou osso. As rochas fósseis mais antigas contêm vestígios microscópicos de células individuais.

A datação por elementos radioativos (radioativa) mostra que esses vestígios mais antigos têm vários milhares de milhões de anos. Células mais complexas do que as bactérias datam de pouco mais de mil milhões de anos. A história de vermes, peixes, anfíbios, répteis e mamíferos abrange centenas de milhões de anos. Ossos semelhantes aos humanos remontam a vários milhões de anos. Os vestígios de civilizações remontam a vários milhares.

Em três mil milhões de anos, a vida evoluiu desde células individuais capazes de absorver substâncias químicas até coleções de células que incorporam mentes capazes de absorver ideias. No último século, a tecnologia evoluiu desde a locomotiva a vapor e a luz elétrica até à nave espacial e ao computador eletrónico — e os computadores já estão a ser ensinados a ler e a escrever. Com a mente e a tecnologia, a taxa de evolução aumentou um milhão de vezes ou mais.

5. Outra Rota de Regresso

O livro de pedra regista as formas de organismos mortos há muito tempo, mas as células vivas também transportam registos — textos genéticos que só agora estão a ser lidos. Tal como aconteceu com as ideias da geologia, os princípios essenciais da evolução já eram conhecidos antes de Darwin⁷ pegar na pena.

Em templos e mosteiros iluminados por candeeiros, gerações de escribas copiaram e recopiavam manuscritos. Por vezes, copiavam mal palavras e frases — fosse por acidente, teimosia ou ordem do

governante local — e, à medida que os manuscritos se replicavam, auxiliados por estas máquinas humanas de cópia, os erros acumulavam-se. Os piores erros podiam ser detetados e corrigidos, e passagens famosas podiam sobreviver inalteradas, mas as diferenças cresciam.

Os livros antigos raramente existem nas suas versões originais. As cópias mais antigas são muitas vezes séculos mais recentes do que os originais perdidos. Ainda assim, a partir de cópias diferentes com erros diferentes, os estudiosos conseguem reconstruir versões mais próximas do original.

Comparando os textos, podem traçar linhas de descendência a partir de antepassados comuns, porque padrões únicos de erros denunciam a cópia a partir de uma fonte comum. (Os professores sabem disto: respostas certas idênticas não são suspeitas — exceto num teste de redação —, mas aí dos alunos sentados lado a lado que entreguem testes com os mesmos erros!) Quando todas as cópias sobreviventes concordam, os estudiosos podem assumir que o exemplar original (ou pelo menos o último antepassado comum dos sobreviventes) continha as mesmas palavras. Quando as cópias diferem, os estudiosos analisam manuscritos que descendem separadamente de um antepassado distante, pois as áreas de concordância indicam então uma origem comum nessa versão ancestral.

Os genes assemelham-se a manuscritos escritos num alfabeto de quatro letras. Tal como uma mensagem pode assumir muitas formas na linguagem comum (reformular uma ideia com palavras

completamente diferentes não é difícil), também diferentes redações genéticas podem dirigir a construção das mesmas moléculas proteicas. Além disso, moléculas proteicas com detalhes de conceção diferentes podem desempenhar funções idênticas. Um conjunto de genes numa célula é como um livro inteiro, e os genes — tal como os manuscritos antigos — foram copiados e recopiados por escribas imprecisos.

Como os estudiosos dos textos antigos, os biólogos trabalham geralmente com cópias modernas do seu material (sem, infelizmente, haver Manuscritos do Mar Morto biológicos dos primórdios da vida). Comparam organismos com aparências semelhantes (leões e tigres, cavalos e zebras, ratos e camundongos) e descobrem que eles dão respostas semelhantes às perguntas de desenvolvimento inscritas nos seus genes e proteínas. Quanto mais dois organismos diferem (leões e lagartos, humanos e girassóis), mais essas respostas diferem — mesmo entre máquinas moleculares que desempenham funções idênticas. Ainda mais revelador, animais semelhantes cometem os mesmos erros: todos os primatas, por exemplo, carecem das enzimas necessárias para fabricar vitamina C — uma omissão partilhada apenas por mais dois mamíferos conhecidos, o porquinho-da-índia e o morcego-da-fruta. Isto sugere que nós, primatas, copiámos as nossas respostas genéticas a partir de uma fonte comum, há muito tempo.

O mesmo princípio que revela as linhas de descendência de textos antigos (e que ajuda a corrigir os seus erros de cópia) revela assim também as linhas de descendência da vida moderna. De

facto, indica que toda a vida conhecida partilha um antepassado comum.

6. A Ascensão dos Replicadores

Os primeiros replicadores na Terra desenvolveram capacidades que vão além daquilo que é possível para moléculas de RNA a replicar-se em tubos de ensaio. Quando chegaram ao estágio bacteriano, já tinham desenvolvido o sistema “moderno” de usar ADN, ARN e ribossomas para construir proteínas. As mutações passaram então a alterar não apenas o ADN replicador em si, mas também as máquinas proteicas e as estruturas vivas que estas constroem e moldam.

Equipas de genes moldaram células cada vez mais elaboradas e depois orientaram a cooperação celular que deu origem a organismos complexos. A variação e a seleção favoreceram equipas de genes que formavam criaturas com peles protetoras e bocas famintas, animadas por nervos e músculos, guiadas por olhos e cérebros. Como diz Richard Dawkins⁸, os genes construíram máquinas de sobrevivência cada vez mais elaboradas para favorecer a sua própria replicação.

Quando os genes de um cão se replicam, muitas vezes combinam-se com os de outros cães que foram selecionados por pessoas — as quais depois escolhem que cachorros manter e cruzar. Ao longo dos milénios, os humanos moldaram feras semelhantes a lobos em galgos, caniches miniatura, dachshunds e São Bernardos.

Ao selecionar que genes sobrevivem, os humanos remodelaram os cães tanto no corpo como no temperamento. Os desejos humanos definiram o sucesso dos genes caninos; outras pressões definiram o sucesso dos genes dos lobos.

A mutação e seleção dos genes encheram, ao longo das Eras, o mundo com erva e árvores, insetos, peixes e pessoas. Mais recentemente, outras coisas surgiram e multiplicaram-se — ferramentas, casas, aviões e computadores. E tal como as moléculas de RNA sem vida, este hardware também *evoluiu*.

7. Tecnologia em Evolução

Tal como a pedra da Terra regista o surgimento de formas de vida cada vez mais complexas e capazes, também os vestígios e os escritos da humanidade registam o aparecimento de formas de hardware cada vez mais complexas e sofisticadas. O nosso hardware mais antigo que sobreviveu é também ele de pedra, enterrado junto aos fósseis dos nossos antepassados; o mais recente encontra-se em órbita acima de nós.

Consideremos por um momento a ancestralidade híbrida do vaivém espacial. Do lado da aviação, descende dos jatos de alumínio dos anos sessenta, que por sua vez derivam de uma linha que recua aos aviões de hélice de alumínio da Segunda Guerra Mundial, aos biplanos de madeira e tecido da Primeira Guerra Mundial, aos planadores motorizados dos irmãos Wright e, antes disso, aos planadores de brincar e papagaios de papel. Do lado dos

foguetes, o vaivém traça a sua linhagem até aos foguetões lunares, passando por mísseis militares, pelos foguetes de artilharia do século passado, e por fim aos fogos-de-artifício e brinquedos. Este híbrido entre avião e foguete voa, e ao variar componentes e projetos, os engenheiros aeroespaciais continuarão a fazer evoluir versões ainda melhores.

Os engenheiros falam em “gerações” de tecnologia; o projeto japonês de computadores da “quinta geração” mostra a rapidez com que certas tecnologias crescem e se multiplicam. Falam também em “híbridos”, em “tecnologias concorrentes” e na sua “proliferação”. O Director de Investigação da IBM, Ralph E. Gomory, enfatiza o carácter evolutivo da tecnologia, escrevendo que “o desenvolvimento tecnológico é muito mais evolutivo e muito menos revolucionário ou orientado para grandes ruturas do que a maioria das pessoas imagina”. (Com efeito, mesmo avanços tão significativos como os montadores moleculares desenvolver-se-ão através de muitos pequenos passos.) Na citação que abre este capítulo, o Professor Herbert A. Simon, da Universidade Carnegie-Mellon, exorta-nos a “pensar no processo de conceção como envolvendo, primeiro, a geração de alternativas e, depois, a testagem dessas alternativas contra um vasto leque de exigências e restrições”. Gerar e testar alternativas é sinónimo de variação e seleção.

Por vezes, já existem várias alternativas. Em “Uma Caixa de Ferramentas Altamente Evoluída”, no *The Next Whole Earth Catalog*⁹, J. Baldwin escreve: “A nossa oficina portátil tem vindo a evoluir há cerca de vinte anos. Não há nada de verdadeiramente

especial nela, exceto o facto de que um processo contínuo de remoção de ferramentas obsoletas ou inadequadas e a sua substituição por outras mais apropriadas resultou numa coleção que se tornou num sistema de criação de coisas, em vez de apenas um monte de hardware.”

Baldwin utiliza o termo “evoluir” com precisão. A invenção e a manufatura geraram, ao longo de milénios, variações nos projetos de ferramentas, e Baldwin selecionou, por competição, as melhores entre as atuais, mantendo aquelas que melhor funcionam em conjunto com as suas outras ferramentas para satisfazer as suas necessidades. Ao longo de anos de variação e seleção, o seu sistema evoluiu — um processo que ele recomenda vivamente. Com efeito, ele aconselha a que nunca se tente planejar, de uma só vez, a compra de um conjunto completo de ferramentas. Em vez disso, sugere adquirir as ferramentas que mais frequentemente se pede emprestadas, ferramentas escolhidas não com base na teoria, mas na experiência.

As variações tecnológicas são muitas vezes deliberadas, no sentido em que os engenheiros são pagos para inventar e testar. Ainda assim, algumas novidades surgem por puro acaso, como a descoberta de uma forma rudimentar de Teflon num cilindro que supostamente estaria cheio de gás tetrafluoroetileno: com a válvula aberta, o cilindro permanecia pesado; ao ser cortado, revelou um estranho sólido ceroso. Outras inovações surgiram de erros sistemáticos. Edison tentou carbonizar de tudo, desde papel a bambu e teias de aranha, enquanto procurava um bom filamento para lâmpadas. Charles Goodyear passou anos a experimentar na

cozinha, tentando transformar borracha natural pegajosa numa substância durável, até que, por acaso, deixou cair borracha sulfurada sobre um fogão quente, realizando assim a primeira vulcanização rudimentar.

Na engenharia, é o ensaio e erro esclarecido — e não o planeamento de intelectos infalíveis — que trouxe a maioria dos avanços; é por isso que os engenheiros constroem protótipos. Peters e Waterman¹⁰, no seu livro *In Search of Excellence*, mostram que o mesmo se aplica aos avanços nos produtos e políticas das empresas. É por isso que as empresas de excelência criam “um ambiente e um conjunto de atitudes que incentivam a experimentação” e evoluem “de forma muito darwiniana”.

As fábricas impõem ordem através da variação e seleção. Sistemas rudimentares de controlo de qualidade testam e descartam peças defeituosas antes de montar os produtos, e sistemas sofisticados de controlo de qualidade utilizam métodos estatísticos para rastrear defeitos até à sua origem, ajudando os engenheiros a modificar o processo de fabrico de modo a minimizar falhas. Os engenheiros japoneses, baseando-se no trabalho de W. Edwards Deming sobre controlo estatístico de qualidade, fizeram dessa variação e seleção dos processos industriais um pilar do sucesso económico do seu país. Os sistemas baseados em montadores (assemblers) também terão de medir resultados para eliminar defeitos.

O controlo de qualidade é uma espécie de evolução, que não visa a mudança, mas sim a eliminação de variações prejudiciais.

Contudo, tal como a evolução darwiniana pode preservar e disseminar mutações favoráveis, também os bons sistemas de controlo de qualidade podem ajudar gestores e operários a preservar e propagar processos mais eficazes, quer tenham surgido por acaso ou por intenção.

Toda esta experimentação por parte de engenheiros e fabricantes prepara os produtos para o seu teste final. No mercado, infinitas variedades de chaves inglesas, automóveis, meias e computadores competem pelo favor dos compradores. Quando os compradores estão bem informados e são livres de escolher, os produtos que fazem demasiado pouco ou que custam demasiado acabam por deixar de ser reproduzidos. Tal como na natureza, a prova competitiva transforma o melhor concorrente de ontem no fóssil de amanhã. “Ecologia” e “economia” partilham mais do que raízes linguísticas.

Tanto no mercado como nos campos de batalha reais e imaginários, a competição global leva as organizações a inventar, comprar, implorar ou roubar tecnologias cada vez mais capazes. Algumas organizações competem sobretudo para servir as pessoas com bens superiores; outras competem sobretudo para as intimidar com armas superiores. As pressões da evolução impulsionam ambas.

A corrida global pela tecnologia tem vindo a acelerar há milhares de milhões de anos. A cegueira da minhoca não impediu o desenvolvimento de aves de visão aguçada. O pequeno cérebro e as asas desajeitadas das aves não impediram o surgimento das

mãos humanas, das mentes e das espingardas. Do mesmo modo, proibições locais não conseguem travar os avanços na tecnologia militar e comercial. Parece que temos de orientar a corrida tecnológica — ou morrer. No entanto, a força da evolução tecnológica ridiculariza os movimentos antitecnologia: os movimentos democráticos a favor da contenção local só conseguem restringir as democracias do mundo, não o mundo como um todo. A história da vida e o potencial das novas tecnologias sugerem algumas soluções, mas isso será abordado na Parte Três.

8. A Evolução da Conceção

Pode parecer que a conceção oferece uma alternativa à evolução, mas a conceção envolve a evolução de duas formas distintas. Primeiro, a própria prática da conceção evolui. Os engenheiros não acumulam apenas projetos que funcionam — acumulam também métodos de conceção que funcionam. Estes variam desde normas técnicas em manuais para a escolha de tubos, até sistemas de gestão para organizar a investigação e o desenvolvimento. E, como afirmou Alfred North Whitehead¹¹, “a maior invenção do século XIX foi a invenção do método de invenção”.

Segundo, a própria conceção avança por variação e seleção. Os engenheiros utilizam frequentemente leis matemáticas desenvolvidas (ou “evoluídas”) para descrever, por exemplo, o fluxo de calor ou a elasticidade, a fim de testar projetos simulados antes de os construírem. Desta forma, os projetos evoluem através de um ciclo de conceção, cálculo, crítica e reconceção, evitando assim os

custos de cortar metal. A criação de projetos processa-se, assim, por uma forma não-material de evolução.

A Lei de Hooke, por exemplo, descreve como o metal se dobra e estica: a deformação é proporcional ao esforço aplicado — o dobro da força, o dobro da extensão. Embora apenas aproximadamente correta, a lei mantém-se bastante precisa até que a elasticidade do metal ceda finalmente ao esforço. Os engenheiros podem usar uma forma da Lei de Hooke para projetar uma barra metálica que suporte uma carga sem se dobrar excessivamente — e depois torná-la um pouco mais espessa, para compensar imprecisões na lei e nos seus próprios cálculos. Também podem aplicar uma versão da Lei de Hooke para descrever a flexão e torção de asas de aviões, raquetes de ténis e chassis de automóveis. Mas equações matemáticas simples não se adaptam facilmente a estruturas tão complexas. Os engenheiros têm de ajustar as equações a formas mais simples (a partes do projeto) e depois combinar essas soluções parciais para descrever a flexão do todo. Este método — chamado “análise de elementos finitos” — exige normalmente cálculos imensos e, sem computadores, seria impraticável. Com eles, tornou-se comum.

Tais simulações prolongam uma tendência ancestral. Sempre imaginámos consequências — com esperança ou receio — quando precisamos de escolher um curso de ação. Modelos mentais mais simples (inatos ou aprendidos) orientam, sem dúvida, os animais também. Quando baseadas em modelos mentais precisos, as experiências mentais podem substituir experiências físicas mais dispendiosas (ou até letais) — um desenvolvimento favorecido pela

evolução. As simulações em engenharia são apenas uma extensão dessa capacidade de imaginar consequências, permitindo-nos cometer os erros no pensamento em vez de os cometer durante a ação.

No ensaio “Uma Caixa de Ferramentas Altamente Evoluída”, J. Baldwin explora a forma como as ferramentas e o pensamento se interligam no trabalho de oficina:

“Começamos a incorporar a nossa capacidade de ferramentas na forma como pensamos sobre fazer coisas. Como qualquer pessoa que construa muitas coisas poderá dizer, as ferramentas tornam-se rapidamente uma parte quase automática do processo de concepção... Mas as ferramentas não podem tornar-se parte do seu processo de concepção se você não souber o que está disponível e o que cada ferramenta faz.”

Ter uma sensibilidade para as capacidades das ferramentas é essencial tanto ao planejar um projeto de oficina com entrega marcada para a próxima quarta-feira, como ao delinear uma estratégia para lidar com as inovações das próximas décadas. Quanto melhor for a nossa intuição quanto às ferramentas do futuro, mais sólidos serão os nossos planos para sobreviver e prosperar.

Um artesão numa oficina pode manter as ferramentas à vista; ao trabalhar com elas diariamente, torna-se íntimo delas com os olhos, as mãos e a mente. Vai conhecendo as suas capacidades de

forma natural, e pode aplicar esse conhecimento de forma criativa e imediata. Mas pessoas como nós — que têm de compreender o futuro — enfrentam um desafio maior, porque as ferramentas do futuro existem, por agora, apenas como ideias e possibilidades implícitas nas leis da natureza. Essas ferramentas não estão penduradas na parede, nem se impõem à mente através da visão, do som ou do tato — nem o farão, até existirem sob a forma de hardware. Nos anos de preparação que se avizinham, só o estudo, a imaginação e o pensamento¹² poderão tornar reais, para a mente, as suas capacidades.

9. O Que São os Novos Replicadores?

A História mostra-nos que o hardware evolui. O RNA em tubo de ensaio, os vírus e os cães demonstram todos como a evolução avança através da modificação e do teste de replicadores. Mas o hardware (hoje em dia) não consegue reproduzir-se a si próprio — então, onde estão os replicadores por detrás da evolução da tecnologia? Quais são os genes das máquinas?

Naturalmente, não é necessário identificar de facto os replicadores para reconhecer o processo evolutivo. Darwin descreveu a evolução antes de Mendel descobrir os genes, e os geneticistas aprenderam muito sobre a hereditariedade antes de Watson e Crick descobrirem a estrutura do ADN. Darwin não precisou de conhecer a genética molecular para perceber que os organismos variavam e que alguns deixavam mais descendentes do que outros.

Um replicador é um padrão que consegue que sejam feitas cópias de si próprio. Pode precisar de ajuda; sem máquinas proteicas para o copiar, o ADN não poderia replicar-se. Mas segundo esse critério, algumas máquinas são replicadores! As empresas fabricam frequentemente máquinas que acabam nas mãos de concorrentes; estes, por sua vez, aprendem os seus segredos e constroem cópias. Tal como os genes “usam” máquinas proteicas para se replicarem, também estas máquinas “usam” mentes e mãos humanas para se replicarem. Com nanocomputadores a dirigir montadores e desmontadores, a replicação do hardware poderia até ser automatizada.

A mente humana, no entanto, é um motor de imitação muito mais subtil do que qualquer mera máquina proteica ou montador. A voz, a escrita e o desenho podem transmitir projetos de mente para mente antes de estes tomarem forma como hardware. As ideias por detrás dos métodos de conceção são ainda mais subtis: mais abstratas do que o próprio hardware, replicam-se e funcionam exclusivamente no mundo das mentes e dos sistemas simbólicos.

Onde os genes evoluíram ao longo de gerações e de Eras, os replicadores mentais evoluem agora em dias e décadas. Tal como os genes, as ideias dividem-se, combinam-se e assumem múltiplas formas (os genes podem ser transcritos do ADN para ARN e vice-versa; as ideias podem ser traduzidas de língua para língua). A ciência ainda não consegue descrever os padrões neuronais que corporizam as ideias no cérebro, mas qualquer pessoa pode observar que as ideias sofrem mutações, replicam-se e competem. As ideias evoluem.

Richard Dawkins chama "memes"¹³ às unidades mínimas de padrões mentais replicáveis (meme rima com "creme"). Ele afirma: "exemplos de memes são melodias, ideias, expressões populares, modas de vestuário, formas de fazer potes ou de construir arcos. Tal como os genes se propagam na piscina genética saltando de corpo para corpo [de geração em geração] através de espermatozoides ou óvulos, também os memes se propagam na piscina memética ao saltar de cérebro para cérebro através de um processo que, em sentido amplo, pode ser chamado de imitação."

10. As Criaturas da Mente

Os memes replicam-se porque as pessoas tanto aprendem como ensinam. Variam porque as pessoas criam o novo e compreendem mal o antigo. São selecionados (em parte) porque as pessoas não acreditam nem repetem tudo o que ouvem. Tal como as moléculas de ARN em tubos de ensaio competem por máquinas de cópia e subunidades escassas, também os memes têm de competir por um recurso raro — a atenção e o esforço humanos. E como os memes moldam o comportamento, o seu sucesso ou fracasso é uma questão de extrema gravidade.

Desde os tempos antigos que modelos mentais e padrões de comportamento têm sido transmitidos de pais para filhos. Os padrões meméticos que favorecem a sobrevivência e a reprodução tendem a espalhar-se. (Come esta raiz apenas depois de cozinhada; não comas essas bagas — os seus espíritos malignos torcer-te-ão as entranhas.) Ano após ano, as pessoas variavam as suas ações com resultados diferentes. Ano após ano, algumas morriam

enquanto outras descobriam novos truques de sobrevivência e os transmitiam. Os genes moldaram cérebros hábeis na imitação porque os padrões imitados eram, em geral, valiosos — afinal, os seus portadores haviam sobrevivido para os disseminar.

Os próprios memes, porém, enfrentam as suas próprias questões de “vida” e “morte”: como replicadores, evoluem exclusivamente para sobreviver e propagar-se. Tal como os vírus, podem replicar-se sem beneficiar a sobrevivência ou o bem-estar do seu hospedeiro. De facto, o meme do martírio por uma causa pode propagar-se precisamente através do ato de matar o seu portador.

Os genes, tal como os memes, sobrevivem através de múltiplas estratégias. Alguns genes de pato espalharam-se encorajando os patos a formar pares para cuidar dos ovos e das crias que carregam esses genes. Outros espalharam-se (quando presentes em machos) encorajando o estupro, e outros ainda (quando em fêmeas) promovendo o depósito de ovos nos ninhos de outros patos. Existem ainda genes virais encontrados em patos, capazes de se espalhar sem produzir mais patos. Proteger os ovos ajuda a espécie dos patos (e os genes individuais dos patos) a sobreviver; o estupro favorece um conjunto de genes à custa de outros; a infeção beneficia os genes virais à custa dos genes dos patos em geral. Como salienta Richard Dawkins, os genes “preocupam-se” apenas com a sua própria replicação: parecem egoístas.

Mas motivos egoístas podem fomentar a cooperação¹⁴. Pessoas que procuram dinheiro e reconhecimento para si mesmas cooperam para construir corporações que servem as necessidades de outros.

Genes egoístas cooperam para formar organismos que, por sua vez, frequentemente cooperam entre si. Ainda assim, imaginar que os genes servem automaticamente algum bem maior (— do seu cromossoma? — da sua célula? — do seu corpo? — da sua espécie?) é confundir um efeito comum com uma causa subjacente. Ignorar o egoísmo dos replicadores é deixar-se adormecer por uma ilusão perigosa.

Alguns genes nas células são, sem rodeios, parasitas. Como os genes do herpes inseridos nos cromossomas humanos, exploram as células e prejudicam os seus hospedeiros. Mas, se os genes podem ser parasitas, por que não também os memes?

No livro *The Extended Phenotype*¹⁵, Richard Dawkins descreve um verme que parasita abelhas e completa o seu ciclo de vida na água. Para passar da abelha para a água, o verme faz com que a abelha hospedeira se atire para a morte num mergulho. De forma semelhante, vermes cerebrais que parasitam formigas precisam de entrar num carneiro para completar o seu ciclo. Para tal, instalam-se no cérebro da formiga hospedeira e, de algum modo, provocam alterações que fazem com que a formiga “queira” subir até ao topo de uma haste de erva e ali permaneça, à espera de ser comida por um carneiro.

Tal como os vermes entram noutros organismos e os utilizam para sobreviver e replicar-se, também os memes o fazem. Com efeito, a ausência de memes que explorem os seres humanos para fins egoístas seria surpreendente — sinal de um sistema imunitário mental poderosíssimo, quase perfeito. Mas é evidente que os

memes parasitas existem. Tal como os vírus evoluem para estimular as células a fabricar mais vírus, também os boatos evoluem para soar plausíveis e apetecíveis, estimulando a sua repetição. Não pergunte se um boato é verdadeiro — pergunte antes como se espalha. A experiência mostra que ideias que evoluem para serem replicadores bem-sucedidos podem ter pouco ou nenhum vínculo com a verdade.

Na melhor das hipóteses, correntes de cartas, boatos infundados, modas insensatas e outros parasitas mentais apenas prejudicam as pessoas fazendo-as perder tempo. Na pior das hipóteses, implantam concepções mortais. Estes sistemas meméticos exploram a ignorância e a vulnerabilidade humanas. Espalhá-los é como estar constipado e espirrar para um amigo.

Apesar disso, o facto de alguns memes atuarem como vírus não significa que a contagiosidade seja má em si. (Pense num sorriso contagiante, ou numa boa disposição contagiante.) Se um conjunto de ideias tem valor, então a sua capacidade de se espalhar apenas reforça esse valor — e, na verdade, os melhores ensinamentos éticos também nos ensinam a ensinar ética. Boas publicações podem entreter, aprofundar a compreensão, ajudar no discernimento — e ainda assim sugerir subscrições para oferecer a outros. Espalhar sistemas meméticos úteis é como oferecer sementes férteis a um amigo que tem jardim.

11. Seleccionando Ideias

Os parasitas obrigaram os organismos a evoluir sistemas imunitários — como as enzimas que as bactérias usam para destruir vírus invasores, ou os glóbulos brancos que vagueiam pelo nosso corpo para eliminar bactérias. De forma semelhante, os memes parasitas obrigaram as mentes a seguir um caminho análogo, desenvolvendo sistemas meméticos que funcionam como sistemas imunitários mentais.

O mais antigo e simples destes sistemas imunitários mentais opera segundo uma regra básica: “acredita no antigo, rejeita o novo”. Um sistema deste tipo servia, em geral, para impedir as tribos de abandonarem práticas antigas e testadas em favor de ideias novas e selvagens — como a noção de que obedecer a ordens supostamente espirituais para destruir todo o gado e as colheitas da tribo traria milagrosamente abundância de alimentos e exércitos de antepassados para expulsar os estrangeiros. (Este conjunto memético infetou o povo Xhosa¹⁶, no sul de África, em 1856; no ano seguinte, 68.000 pessoas haviam morrido, sobretudo de fome.)

O sistema imunitário do corpo segue uma lógica semelhante: em geral, aceita todos os tipos celulares presentes nas fases iniciais da vida e rejeita como estranhos e perigosos os novos — como células cancerígenas ou bactérias invasoras. Este sistema simples, baseado na rejeição do novo, funcionou bem durante muito tempo, mas na Era dos transplantes de órgãos pode tornar-se fatal. De forma análoga, numa época em que a ciência e a tecnologia apresentam regularmente factos que são ao mesmo tempo novos e credíveis,

um sistema imunitário mental rígido transforma-se num obstáculo perigoso.

Apesar das suas limitações, o princípio da rejeição do novo é simples e oferece vantagens reais. A tradição contém muito do que foi testado e provado útil (ou, mesmo não sendo verdadeiro, pelo menos funcional). A mudança é arriscada: assim como a maioria das mutações genéticas são prejudiciais, também a maioria das ideias novas está errada. Até a razão pode ser perigosa: se uma tradição associa práticas sensatas ao medo de fantasmas, um raciocínio demasiado confiante pode descartar tanto o falso como o valioso. Infelizmente, as tradições que evoluíram para serem boas podem ter menos apelo do que ideias que evoluíram apenas para soar bem — e, quando confrontada pela primeira vez, a tradição mais sólida pode ser substituída por ideias piores que, no entanto, seduzem mais a mente racional.

No entanto, os memes que selam a mente contra novas ideias protegem-se de uma forma suspeitamente autointeressada. Ao mesmo tempo que defendem tradições valiosas contra edições desastradas, podem também proteger disparates parasitas da prova da verdade. Em tempos de mudança acelerada, estes memes podem tornar as mentes perigosamente rígidas.

Grande parte da história da filosofia e da ciência pode ser vista como uma busca por melhores sistemas imunitários mentais — formas mais eficazes de rejeitar o falso, o inútil e o nocivo. Os melhores sistemas respeitam a tradição, mas encorajam a

experimentação. Propõem critérios para avaliar memes, ajudando a mente a distinguir entre parasitas e ferramentas.

Os princípios da evolução oferecem uma forma de observar a mudança — seja em moléculas, organismos, tecnologias, mentes ou culturas. As mesmas perguntas fundamentais surgem repetidamente: quais são os replicadores? Como variam? O que determina o seu sucesso? Como se defendem contra invasores? Estas questões voltarão a surgir quando considerarmos as consequências da revolução dos assembladores, e ainda mais uma vez ao ponderarmos como a sociedade poderá lidar com essas consequências.

Os princípios profundamente enraizados da mudança evolutiva moldarão o desenvolvimento da nanotecnologia, mesmo à medida que a distinção entre hardware e vida começa a esbater-se. Estes princípios dizem-nos muito sobre o que podemos — e não podemos — esperar alcançar, e podem ajudar-nos a orientar os nossos esforços para moldar o futuro. Dizem-nos também muito sobre aquilo que podemos — e não podemos — prever, pois orientam a evolução não apenas do hardware, mas também do próprio conhecimento.

CAPÍTULO 3

Previsão e Projeção

A atitude crítica¹ pode ser descrita como a tentativa consciente de fazer com que as nossas teorias, as nossas conjecturas, sofram em nosso lugar na luta pela sobrevivência do mais apto. Dá-nos uma hipótese de sobreviver à eliminação de uma hipótese inadequada — quando uma atitude mais dogmática a eliminaria ao eliminar-nos.

— Sir KARL POPPER

À MEDIDA QUE OLHAMOS PARA O FUTURO, tentando perceber para onde conduz a corrida tecnológica, devemos colocar três perguntas: O que é *possível*? O que é *realizável*? E o que é *desejável*?

Primeiro, no que diz respeito ao hardware, a lei natural estabelece os limites do possível. Como os montadores (assemblers) abrirão caminho até esses limites, compreender os montadores é essencial para compreender o que é possível.

Segundo, os princípios da mudança e os factos da nossa situação atual impõem limites ao que é realizável. Como os replicadores em evolução desempenharão um papel fundamental, os princípios da evolução são a chave para compreender o que será efetivamente alcançável.

Quanto ao que é desejável ou indesejável, os nossos sonhos divergentes alimentam uma busca por um futuro com espaço para a diversidade, enquanto os nossos medos comuns impulsionam uma busca por um futuro de segurança.

Estas três perguntas — o que é *possível*, o que é *realizável* e o que é *desejável* — estruturam uma abordagem à previsão do futuro. Em primeiro lugar, o conhecimento científico e de engenharia forma um mapa dos limites do possível. Embora ainda difuso e incompleto, esse mapa delinea os limites permanentes dentro dos quais o futuro terá de mover-se. Em segundo lugar, os princípios evolutivos determinam quais os caminhos que permanecem abertos, e impõem limites ao que se pode alcançar — incluindo limites inferiores, já que os avanços que prometem melhorar a vida ou reforçar o poder militar serão, praticamente, imparáveis. Isto permite uma previsão limitada: se a corrida evolutiva, com milhares de milhões de anos, não for abruptamente interrompida, então as pressões competitivas moldarão o nosso futuro tecnológico segundo os contornos dos limites do possível. Por fim, dentro dos amplos contornos do possível e do realizável, podemos tentar alcançar um futuro que consideremos desejável.

1. Armadilhas da Profecia

Mas como poderá alguém prever o futuro? As tendências políticas e económicas são notoriamente voláteis, e o acaso lança os seus dados através dos continentes. Mesmo o avanço comparativamente estável da tecnologia escapa muitas vezes à previsão.

Os prognosticadores costumam arriscar palpites sobre os prazos e os custos necessários para dominar novas tecnologias. Quando vão além da simples descrição das possibilidades e tentam fazer previsões precisas, geralmente falham. Por exemplo, embora o vaivém espacial fosse claramente possível, as previsões sobre o seu custo e a data do primeiro lançamento erraram por vários anos e milhares de milhões de dólares. Os engenheiros não conseguem prever com exatidão quando uma tecnologia será desenvolvida, porque o desenvolvimento envolve sempre incertezas. Mas é necessário tentar prever e orientar o desenvolvimento. Iremos desenvolver tecnologias monstruosas antes das tecnologias que as possam conter — ou depois? Alguns monstros, uma vez libertos, não podem ser enjaulados. Para sobreviver, precisamos de manter o controlo, acelerando certos desenvolvimentos e abrandando outros.

Embora uma tecnologia possa, por vezes, contrariar os perigos de outra (defesa versus ataque, controlo da poluição versus poluição), as tecnologias concorrentes seguem frequentemente na mesma direção. Em 29 de Dezembro de 1959, Richard Feynman (que mais tarde receberia o Prémio Nobel) proferiu uma palestra² num encontro anual da American Physical Society intitulada "Há Muito Espaço Cá Embaixo" (There's Plenty of Room at the Bottom). Descreveu uma abordagem não-bioquímica à nanotecnologia (trabalhar progressivamente, de cima para baixo, usando máquinas maiores para construir máquinas mais pequenas), e afirmou que os princípios da física não excluem a possibilidade de manipular objetos átomo a átomo:

"Não se trata de uma tentativa de violar qualquer lei; é algo que, em princípio, pode ser feito; mas, na prática, ainda não foi feito porque somos demasiado grandes... No fim de contas, podemos fazer síntese química... colocar os átomos no lugar indicado pelo químico, e assim fabricar a substância."

Em resumo, delineou um caminho alternativo — não bioquímico — rumo aos montadores (assemblers). E declarou, mesmo naquela altura, que se tratava de um desenvolvimento que, segundo ele, "não poderá ser evitado".

Como discutirei nos Capítulos 4 e 5, os montadores e as máquinas inteligentes irão simplificar muitas das questões relativas ao tempo e ao custo do desenvolvimento tecnológico. Mas essas questões de tempo e custo continuarão a turvar a nossa visão do período que medeia entre o presente e essas grandes conquistas. Richard Feynman, em 1959, reconheceu que as nanomáquinas poderiam dirigir a síntese química, presumivelmente incluindo a síntese de ADN. No entanto, não conseguiu prever nem o tempo nem o custo necessários para o fazer.

Na verdade, os bioquímicos desenvolveram técnicas para fabricar ADN sem recorrer a nanomáquinas programáveis, utilizando atalhos baseados em truques químicos específicos. As tecnologias vencedoras obtêm frequentemente sucesso graças a detalhes e estratégias pouco óbvias. Na década de 1950, os físicos já compreendiam que os princípios básicos dos semicondutores tornavam os microcircuitos fisicamente possíveis. No entanto,

prever como seriam fabricados — antever todos os detalhes sobre a criação de máscaras, os materiais fotossensíveis, o crescimento de óxidos, a implantação iônica, a gravação química e por aí adiante, com toda a sua complexidade — teria sido impossível. As nuances dos detalhes e as vantagens competitivas que selecionam as tecnologias vencedoras tornam a corrida tecnológica complexa e o seu percurso imprevisível.

Mas será isso razão para desistirmos da previsão a longo prazo? Numa corrida em direção aos limites impostos pelas leis naturais, a linha de chegada é previsível — mesmo que o percurso e o ritmo dos corredores não o sejam. Não são os caprichos humanos, mas as leis imutáveis da natureza que traçam a linha entre o que é fisicamente possível e o que não é. Nenhuma ação política, nenhum movimento social pode alterar, nem que seja por um instante, a lei da gravidade. Assim, por mais futuristas que possam parecer, as projeções sólidas sobre possibilidades tecnológicas são muito diferentes de meras previsões. Apoiam-se nas leis eternas da natureza, e não nos caprichos dos acontecimentos.

Infelizmente, esta clareza continua a ser rara. Sem ela, cambaleamos, atordoados, através da paisagem do possível, confundindo montanhas com miragens — e desvalorizando ambas. Olhamos para o futuro com mentes e culturas ainda enraizadas nas ideias de tempos mais lentos, quando tanto a ciência como a competição tecnológica não tinham a força nem a velocidade que hoje possuem. Apenas recentemente começámos a desenvolver uma tradição de visão tecnológica.

2. Ciência e Direito Natural

A ciência e a tecnologia entrelaçam-se. Os engenheiros usam o conhecimento produzido pelos cientistas; os cientistas usam as ferramentas criadas pelos engenheiros. Ambos trabalham com descrições matemáticas das leis naturais e testam ideias através de experiências. Mas ciência e tecnologia diferem radicalmente na sua base, nos seus métodos e nos seus objetivos. Compreender estas diferenças é crucial para uma previsão sólida. Embora ambos os campos consistam em sistemas de memes em evolução, evoluem sob pressões diferentes. As raízes do conhecimento científico

Durante a maior parte da história, as pessoas tinham pouca compreensão da evolução. Isto levava os filósofos a pensar que a evidência sensorial, por meio da razão, deveria de algum modo imprimir na mente todo o conhecimento humano — incluindo o conhecimento das leis naturais. Mas, em 1737, o filósofo escocês David Hume apresentou-lhes um enigma perturbador: demonstrou que as observações não podem provar logicamente uma regra geral — o facto de o Sol brilhar dia após dia não prova, logicamente, que voltará a brilhar amanhã. E, de facto, um dia o Sol deixará de brilhar, refutando essa lógica ilusória. O problema de Hume parecia destruir a ideia de conhecimento racional, abalando profundamente os filósofos racionais (incluindo o próprio Hume). Eles lutaram e suaram para encontrar uma saída, enquanto o irracionalismo ganhava terreno. Em 1945, o filósofo Bertrand Russell³ observou:

“O crescimento da irracionalidade ao longo do século XIX e no que decorreu do século XX é uma consequência natural da destruição do empirismo por Hume.”

O problema-meme de Hume minou a própria ideia de conhecimento racional — pelo menos tal como era então imaginado.

Nas últimas décadas, filósofos como Karl Popper (talvez o mais estimado pelos cientistas), Thomas Kuhn, entre outros, passaram a reconhecer a ciência como um processo evolutivo. Não a veem como um processo mecânico, onde observações geram conclusões, mas como uma batalha em que ideias competem pela aceitação.

Todas as ideias, enquanto memes, competem por aceitação, mas o sistema de memes da ciência é especial: possui uma tradição de mutação deliberada de ideias e um sistema imunitário único para controlar os mutantes. Os resultados da evolução variam consoante as pressões seletivas aplicadas — seja entre moléculas de ARN num tubo de ensaio, insetos, ideias ou máquinas. Hardware evoluído para refrigeração difere de hardware evoluído para transporte; por isso, frigoríficos fazem carros muito maus. De forma geral, replicadores evoluídos para A são diferentes dos que evoluíram para B. E os memes não são exceção.

De modo geral, as ideias podem evoluir para parecer verdadeiras, ou podem evoluir para ser verdadeiras⁴ — ou seja, parecer verdadeiras a quem verifica cuidadosamente as ideias. Antropólogos e historiadores descreveram o que acontece quando

as ideias evoluem apenas para parecer verdadeiras, entre pessoas sem acesso aos métodos científicos. Os resultados — teorias de espíritos malignos para explicar doenças, ou a ideia de que as estrelas são luzes presas numa cúpula, e outras semelhantes — foram surpreendentemente consistentes em todo o mundo. Psicólogos que estudaram os conceitos errôneos ingênuos das pessoas sobre a forma como os objetos caem, encontraram crenças semelhantes às que evoluíram para sistemas formais “científicos” durante a Idade Média, antes do trabalho de Galileu e Newton.

Galileu e Newton usaram experiências e observações para testar ideias sobre objetos e movimento, iniciando uma Era de progresso científico dramático: Newton desenvolveu uma teoria que sobreviveu a todos os testes disponíveis na época. O seu método de testes deliberados eliminou ideias que se afastavam demasiado da verdade, incluindo aquelas que haviam evoluído para agradar à mente humana ingênua.

Esta tendência manteve-se. Variações e testes sucessivos forçaram a evolução contínua das ideias científicas, produzindo algumas tão bizarras quanto:

o tempo variável e o espaço curvo da relatividade,
ou as funções de onda probabilísticas da mecânica quântica.

Mesmo a biologia abandonou a ideia de uma força vital especial, esperada por muitos dos primeiros biólogos, revelando em seu lugar sistemas elaborados de máquinas moleculares invisivelmente

pequenas. Ideias evoluídas para serem verdadeiras (ou próximas da verdade) revelaram-se repetidamente falsas à primeira vista — ou incompreensíveis. O verdadeiro e o verosímil acabaram por se mostrar tão diferentes quanto automóveis e frigoríficos.

As ideias nas ciências físicas evoluíram segundo várias regras básicas de seleção. Primeiro, os cientistas ignoram ideias sem consequências testáveis; assim, evitam que as suas mentes fiquem entupidas por parasitas inúteis. Segundo, procuram substituir ideias que falharam em testes. Finalmente, procuram ideias que permitam o maior número possível de previsões exatas. A lei da gravidade, por exemplo, descreve:

como caem as pedras,
como orbitam os planetas,
e como se movem as galáxias,

fazendo previsões precisas que a deixam totalmente vulnerável à refutação. A sua amplitude e precisão também a tornam altamente útil, ajudando engenheiros a projetar pontes e a planejar voos espaciais.

A comunidade científica fornece um ambiente onde tais memes se propagam, forçados pela competição e pelo teste a evoluir rumo ao poder explicativo e à precisão. O acordo sobre a importância de testar as teorias é o que mantém a comunidade científica coesa, mesmo no meio de controvérsias ferozes sobre as próprias teorias.

Provas inexatas e limitadas nunca podem provar uma teoria geral e exata (como Hume demonstrou), mas podem refutar algumas teorias e assim ajudar os cientistas a escolher entre elas. Como outros processos evolutivos, a ciência cria algo positivo (um crescente acervo de teorias úteis) através de um duplo negativo (a refutação de teorias incorretas). O papel central da evidência negativa explica parte da perturbação mental causada pela ciência: como motor de refutação, pode arrancar crenças acarinhadas, deixando vazios psicológicos que não tem de preencher.

Em termos práticos, é claro, muito do conhecimento científico é tão sólido como uma pedra caída sobre o seu pé. Sabemos que a Terra gira em torno do Sol (embora os nossos sentidos sugiram o contrário) porque a teoria se ajusta a intermináveis observações, e porque sabemos por que razão os nossos sentidos são enganados. Temos mais do que uma simples teoria de que os átomos existem: ligámo-los para formar moléculas, extraímos luz deles, vimo-los ao microscópio (mal), e partimo-los em pedaços. Temos mais do que uma simples teoria da evolução: observámos mutações, observámos seleção, e observámos evolução em laboratório. Encontrámos vestígios de evolução passada nas rochas do nosso planeta, e observámos a evolução a moldar as nossas ferramentas, as nossas mentes, e as ideias nas nossas mentes — incluindo a própria ideia de evolução. O processo da ciência forjou uma explicação unificada de muitos factos, incluindo como as pessoas e a própria ciência vieram a existir.

Quando a ciência termina de refutar teorias, os sobreviventes muitas vezes agrupam-se tão estreitamente⁵ que a diferença entre

elas não faz diferença prática. Afinal, uma diferença prática entre duas teorias sobreviventes poderia ser testada e usada para refutar uma delas. As diferenças entre as teorias modernas da gravidade, por exemplo, são demasiado subtis para incomodar os engenheiros que planeiam voos através dos campos gravitacionais do espaço. Na verdade, os engenheiros planeiam voos espaciais usando a teoria refutada de Newton porque é mais simples do que a de Einstein, e suficientemente precisa. A teoria da gravidade de Einstein sobreviveu a todos os testes até agora, mas não existe prova absoluta para ela — e nunca existirá. A sua teoria faz previsões exatas sobre tudo em todo o lado (pelo menos sobre assuntos gravitacionais), mas os cientistas só conseguem fazer medições aproximadas de algumas coisas em certos lugares. E, como Karl Popper aponta⁶, pode-se sempre inventar uma teoria tão semelhante a outra que a evidência existente não consiga distingui-las.

Embora os debates nos média realcem as fronteiras frágeis e disputadas do conhecimento, o poder da ciência para construir consenso permanece claro. Onde mais cresceu tanto acordo de forma tão constante e internacional? Seguramente não na política, religião ou arte. Na verdade, o principal rival da ciência é um parente: a engenharia, que também evolui através de propostas e testes rigorosos.

3. Ciência vs. Tecnologia

Como diz Ralph E. Gomory, Director de Investigação da IBM⁷: “A evolução do desenvolvimento tecnológico é muitas vezes

confundida com a ciência no imaginário do público.” Esta confusão turva os nossos esforços de previsão.

Embora os engenheiros frequentemente caminhem por terreno incerto, não estão condenados a fazê-lo, como acontece com os cientistas. Podem escapar aos riscos inerentes de propor teorias científicas universais e precisas. Os engenheiros precisam apenas de demonstrar que, sob determinadas condições, certos objetos funcionarão suficientemente bem. Um projetista não precisa de conhecer nem a tensão exata num cabo de uma ponte suspensa, nem a tensão exata que o partirá; o cabo sustentará a ponte desde que a primeira permaneça abaixo da segunda, seja qual for o seu valor.

Embora as medições não possam provar a igualdade precisa, podem provar a desigualdade. Os resultados da engenharia podem, assim, ser sólidos de uma forma que as teorias científicas precisas não conseguem. Os resultados da engenharia podem até sobreviver à refutação das teorias científicas que os sustentam, quando a nova teoria produz resultados semelhantes. O argumento a favor dos montadores moleculares, por exemplo, sobreviverá a quaisquer refinamentos possíveis na nossa teoria da mecânica quântica e das ligações moleculares.

Prever o conteúdo de novos conhecimentos científicos é logicamente impossível, porque não faz sentido afirmar que já se conhecem os factos que se irão descobrir no futuro. Prever os detalhes da tecnologia futura, por outro lado, é apenas difícil. A ciência visa o saber, mas a engenharia visa o fazer; isto permite

aos engenheiros falar de realizações futuras sem paradoxo. Podem fazer evoluir o seu hardware no mundo da mente e da computação, antes de cortar metal ou mesmo de preencher todos os detalhes de um projeto.

Os cientistas reconhecem normalmente esta diferença entre previsão científica e previsão tecnológica: fazem prontamente previsões tecnológicas sobre a ciência. Os cientistas puderam — e de facto fizeram-no — prever a qualidade das imagens de Saturno e dos seus anéis captadas pela sonda Voyager, embora não o seu conteúdo surpreendente. De facto, previram a qualidade das imagens quando as câmaras ainda eram meras ideias e desenhos. Os seus cálculos basearam-se em princípios de óptica bem testados, sem envolver qualquer ciência nova.

Como a ciência visa compreender como tudo funciona, a formação científica pode ser uma grande ajuda na compreensão de componentes específicos de hardware. Ainda assim, não confere automaticamente competência em engenharia; projetar um avião comercial exige muito mais do que o conhecimento das ciências da metalurgia e da aerodinâmica.

Os cientistas são encorajados pelos seus colegas e pela sua formação a concentrarem-se em ideias que possam ser testadas com os aparelhos disponíveis. Este foco de curto prazo serve frequentemente bem a ciência: evita que os cientistas se percam em mundos nebulosos de fantasias não testadas, e os testes rápidos funcionam como um sistema imunitário mental eficiente. Infelizmente, porém, este viés cultural a favor de testes de curto

prazo pode tornar os cientistas menos interessados em avanços tecnológicos de longo prazo.

A impossibilidade de uma verdadeira previsão no domínio da ciência leva muitos cientistas a considerar todas as afirmações sobre desenvolvimentos futuros como “especulativas” — um termo que faz todo o sentido quando aplicado ao futuro da ciência, mas pouco sentido quando aplicado a projeções tecnológicas bem fundamentadas. Mas a maioria dos engenheiros partilha uma inclinação semelhante para o curto prazo. Também eles são encorajados pela sua formação, pelos seus colegas e pelos seus empregadores a concentrarem-se num único tipo de problema: o projeto de sistemas que possam ser realizados com a tecnologia atual ou com tecnologia iminente. Mesmo projetos de engenharia de longo prazo, como o vaivém espacial, devem ter uma data limite a partir da qual nenhum novo desenvolvimento pode ser incluído no projeto básico do sistema.

Em resumo, os cientistas recusam-se a prever conhecimento científico futuro, e raramente discutem desenvolvimentos de engenharia futuros. Os engenheiros, por sua vez, projetam desenvolvimentos futuros, mas raramente discutem qualquer um que não se baseie em capacidades atuais. Isto deixa, no entanto, uma lacuna crucial: e os desenvolvimentos de engenharia firmemente baseados na ciência atual, *mas à espera de capacidades futuras*? Essa lacuna deixa uma área fértil para estudo.

Imaginemos uma linha de desenvolvimento que envolva o uso de ferramentas existentes para construir novas ferramentas, e

depois o uso dessas ferramentas para construir hardware inovador (talvez incluindo ainda outra geração de ferramentas). Cada conjunto de ferramentas pode assentar em princípios estabelecidos, e ainda assim toda a sequência de desenvolvimento pode levar muitos anos, à medida que cada passo traz consigo um conjunto de problemas específicos a resolver. Cientistas a planejar a próxima experiência e engenheiros a conceber o próximo dispositivo podem ignorar tudo exceto o primeiro passo. Ainda assim, o resultado final pode ser previsível, situando-se claramente dentro dos limites do possível delineados pela ciência estabelecida.

A história recente ilustra este padrão. Poucos engenheiros consideraram construir estações espaciais antes de os foguetões chegarem à órbita, mas os princípios eram suficientemente claros, e a engenharia de sistemas espaciais é hoje um campo em plena expansão. De forma semelhante, poucos matemáticos e engenheiros estudaram as possibilidades da computação até os computadores serem construídos, embora muitos o tenham feito depois. Por isso, não é demasiado surpreendente que poucos cientistas e engenheiros tenham ainda examinado o futuro da nanotecnologia, por muito importante que esta se possa tornar.

4. A Lição de Leonardo

Os esforços para projetar desenvolvimentos de engenharia têm uma longa história, e exemplos do passado ilustram possibilidades atuais. Por exemplo, como é que Leonardo da Vinci conseguiu prever tanto, e por que motivo falhou por vezes?

Leonardo viveu há quinhentos anos, numa época que coincidiu com a descoberta do Novo Mundo. Fez projeções sob a forma de desenhos e invenções; cada projeto pode ser visto como uma projeção de que algo semelhante poderia ser feito para funcionar. Teve êxito como engenheiro mecânico: concebeu dispositivos funcionais (alguns dos quais só seriam construídos séculos mais tarde) para escavação, metalurgia, transmissão de energia e outros fins. Falhou como engenheiro aeronáutico: sabemos hoje que as suas máquinas voadoras nunca poderiam funcionar tal como foram descritas.

Os seus sucessos no projeto de máquinas são fáceis de compreender. Se as peças puderem ser fabricadas com precisão suficiente, de um material suficientemente duro e resistente, então o projeto de máquinas lentas com alavancas, roldanas e rolamentos torna-se uma questão de geometria e alavancagem. Leonardo compreendia bem estes princípios. Algumas das suas “previsões” eram de longo prazo, mas apenas porque muitos anos se passaram até que as pessoas aprenderam a fabricar peças suficientemente precisas, duras e resistentes para construir (por exemplo) bons rolamentos de esferas — o seu uso só se generalizou cerca de trezentos anos depois de Leonardo os ter proposto. De forma semelhante, engrenagens com dentes cicloidais superiores não foram construídas durante quase dois séculos após Leonardo as ter desenhado, e um dos seus projetos de transmissão por corrente não foi concretizado durante quase três séculos.

As suas falhas no campo da aviação também são fáceis de compreender. Como na época de Leonardo não existia uma ciência

da aerodinâmica, ele não podia calcular as forças sobre as asas nem conhecer os requisitos de potência e controle necessários ao voo.

Poderão as pessoas da nossa época fazer projeções sobre máquinas moleculares tão precisas quanto aquelas que Leonardo da Vinci fez sobre máquinas metálicas? Poderemos evitar erros como os que cometeu nos seus planos de máquinas voadoras? O exemplo de Leonardo sugere que sim. Pode ajudar recordar que o próprio Leonardo provavelmente não tinha grande confiança nos seus projetos aeronáuticos, e que os seus erros continham, apesar de tudo, um germe de verdade. Tinha razão ao acreditar que algum tipo de máquina voadora era possível — de facto, podia estar certo disso, pois já existiam exemplos em funcionamento. Aves, morcegos e abelhas provavam a possibilidade do voo. Além disso, embora não houvesse exemplos práticos dos seus rolamentos, engrenagens e sistemas de corrente, podia confiar nos princípios que os sustentavam. Mentes capazes já tinham construído uma base sólida de conhecimento sobre geometria e leis de alavancagem. A resistência e precisão exigidas pelas peças podiam causar-lhe dúvidas, mas não a interação entre função e movimento⁸. Leonardo podia propor máquinas que requeriam peças melhores do que as então conhecidas e, mesmo assim, manter um certo grau de confiança nos seus projetos.

As tecnologias moleculares propostas assentam, de forma semelhante, numa vasta base de conhecimento — não apenas em geometria e alavancagem, mas também em ligações químicas, mecânica estatística e física em geral. Desta vez, porém, os problemas relacionados com as propriedades dos materiais e a

precisão da sua fabricação não surgem de forma separada. As propriedades dos átomos e das ligações químicas são as propriedades dos materiais, e os átomos vêm pré-fabricados e perfeitamente normalizados. Assim, parece que estamos hoje melhor preparados para a previsão do que estavam as pessoas no tempo de Leonardo: sabemos mais sobre moléculas e ligações controladas do que eles sabiam sobre aço e maquinagem de precisão. Além disso, podemos apontar nanomáquinas que já existem dentro da célula, tal como Leonardo podia apontar para as máquinas (aves) que já voavam no céu.

Projetar como nanomáquinas de segunda geração podem ser construídas por máquinas proteicas é certamente mais fácil do que era, no tempo de Leonardo, projetar como máquinas de aço precisas poderiam ser fabricadas a partir das suas máquinas rudimentares. Aprender a usar máquinas toscas para construir máquinas mais precisas era inevitavelmente um processo moroso, e os métodos não eram nada óbvios. As máquinas moleculares, em contraste, serão construídas a partir de peças atômicas idênticas e pré-fabricadas, que apenas precisam de ser montadas. Construir máquinas precisas com máquinas imperfeitas deve ter sido mais difícil de imaginar naquela época do que o é agora conceber a montagem molecular. Além disso, sabemos que a montagem molecular ocorre constantemente na natureza. Mais uma vez, temos bases mais sólidas para a confiança do que aquelas de que Leonardo dispunha.

No tempo de Leonardo, o conhecimento sobre a eletricidade e o magnetismo era escasso, e nada se sabia sobre moléculas ou

mecânica quântica. Por conseguinte, luzes elétricas, rádios e computadores ter-lhes-iam parecido incompreensíveis. Hoje, contudo, as leis básicas mais importantes para a engenharia — aquelas que descrevem a matéria normal — parecem estar bem compreendidas. Tal como acontece com as teorias sobreviventes sobre a gravidade, o motor científico da refutação obrigou as teorias da matéria que permanecem a alinharem-se estreitamente com a realidade.

Esse conhecimento é recente. Antes deste século [século XX], as pessoas não compreendiam por que razão os sólidos eram sólidos ou por que o Sol brilhava. Os cientistas não compreendiam as leis que regem a matéria no mundo comum das moléculas, das pessoas, dos planetas e das estrelas. É por isso que o nosso século fez nascer transístores e bombas de hidrogénio, e é também por isso que a tecnologia molecular se aproxima. Este conhecimento traz novas esperanças e novos perigos, mas pelo menos oferece-nos os meios para prever e para nos prepararmos.

Quando as leis fundamentais de uma tecnologia são conhecidas, as possibilidades futuras podem ser previstas (embora com lacunas — ou Leonardo teria previsto os computadores mecânicos). Mesmo quando as leis básicas são pouco conhecidas, como acontecia com os princípios da aerodinâmica no tempo de Leonardo, a natureza pode demonstrar o que é possível. Finalmente, quando tanto a ciência como a natureza apontam para uma possibilidade, estas lições sugerem que devemos levá-la a sério e planejar em conformidade.

5. O Avanço do Montador (Assembler)

Os alicerces da ciência podem evoluir e mudar, mas continuarão a sustentar um edifício estável e crescente de saber técnico e conhecimentos de engenharia. Eventualmente, os montadores (assemblers) permitirão aos engenheiros fabricar tudo o que possa ser concebido em projeto, contornando os problemas tradicionais dos materiais e da fabricação. Já hoje, aproximações e modelos computacionais permitem aos engenheiros desenvolver projetos mesmo na ausência das ferramentas⁹ necessárias para os concretizar. Tudo isto irá combinar-se para permitir a previsão — e algo mais.

À medida que a nanotecnologia avança, chegará o momento em que os montadores se tornarão uma perspectiva iminente, sustentada por um programa de desenvolvimento sério e bem financiado. As suas capacidades esperadas ter-se-ão tornado claras.

Nessa altura, o projeto assistido por computador de sistemas moleculares¹⁰ — que já começou — ter-se-á tornado comum e sofisticado, impulsionado tanto pelos avanços na tecnologia informática como pelas crescentes exigências dos engenheiros moleculares. Com essas ferramentas de conceção, os engenheiros poderão projetar nanossistemas de segunda geração, incluindo os montadores de segunda geração necessários para os construir. Mais ainda: ao permitir uma margem de tolerância suficiente para imprecisões (e ao preparar projetos alternativos), os engenheiros conseguirão desenhar muitos sistemas que funcionarão à primeira

construção — terão desenvolvido projetos sólidos num mundo de moléculas simuladas.

Consideremos a força desta situação: estará em desenvolvimento a maior ferramenta de produção da história, um sistema de fabricação verdadeiramente universal, capaz de produzir tudo o que possa ser concebido — e o sistema de projeto já estará nas mãos dos engenheiros. Alguém esperará pelo surgimento dos montadores para começar a planear o seu uso? Ou responderão empresas e países às pressões da oportunidade e da concorrência projetando nanossistemas com antecedência, para acelerar a exploração dos montadores logo que estes se tornem disponíveis?

Esse *processo de projetar antes* parece inevitável; a única questão é saber quando começará e até onde irá. Anos de progresso silencioso no projeto podem muito bem culminar, de forma súbita e sem precedentes, no surgimento de hardware funcional, a reboque da descoberta dos montadores. O quão bem projetarmos com antecedência¹¹ — e o que projetarmos — pode determinar se sobreviveremos e prosperaremos, ou se nos autoaniquilaremos.

Porque a revolução dos montadores afetarà quase toda a tecnologia, a previsão torna-se uma tarefa gigantesca. Do universo de possíveis dispositivos mecânicos, Leonardo previu apenas alguns. Do mesmo modo, do universo muito mais vasto das tecnologias futuras, as mentes modernas só conseguem antever uma fração. Algumas dessas inovações, porém, parecem ter importância fundamental.

A tecnologia médica, a fronteira espacial, os computadores avançados e novas invenções sociais prometem desempenhar papéis interligados. Mas a revolução dos montadores afetará todos eles — e mais.

CAPÍTULO 4

Motores da Abundância

Se cada ferramenta, quando ordenada¹, ou mesmo por vontade própria, pudesse fazer o trabalho que lhe é adequado... então não haveria necessidade de aprendizes para os mestres trabalhadores, nem de escravos para os senhores.

— ARISTOTLE

A 27 de Março de 1981, a rádio CBS noticiou uma declaração de um cientista da NASA², segundo a qual os engenheiros seriam capazes de construir robôs autorreplicantes num prazo de vinte anos, para utilização no espaço ou na Terra. Estas máquinas construiriam cópias de si mesmas, e essas cópias seriam orientadas para fabricar produtos úteis. O cientista não duvidava da sua possibilidade — apenas do momento em que seriam efetivamente construídas. E tinha razão.

Desde 1951, quando John von Neumann delineou os princípios das máquinas autorreplicantes, os cientistas têm, em geral, reconhecido a sua possibilidade. Em 1953, Watson e Crick descreveram a estrutura do ADN (DNA), mostrando como os seres vivos transmitem as instruções que guiam a sua construção. Desde então, os biólogos têm compreendido com cada vez maior detalhe como funciona a maquinaria molecular autorreplicante da célula. Descobriram que ela segue os princípios que von Neumann havia

delineado. Assim como os pássaros provam a possibilidade do voo, a própria vida prova a possibilidade da autorreplicação — pelo menos através de sistemas de máquinas moleculares. Contudo, o cientista da NASA tinha algo diferente em mente.

1. Replicadores Barulhentos

Os replicadores biológicos³ — como os vírus, bactérias, plantas e seres humanos — utilizam máquinas moleculares. Os replicadores artificiais, por outro lado, poderão usar tecnologia macroscópica ou de volume. Uma vez que já dispomos de tecnologia macroscópica hoje, os engenheiros poderão utilizá-la para construir replicadores antes mesmo da chegada plena da nanotecnologia molecular.

O antigo mito de uma força vital mágica — associado à concepção errada de que o aumento da entropia implica que tudo no universo está constantemente a degradar-se — deu origem a um meme cultural que afirma que os replicadores violam alguma lei natural. Mas isso simplesmente não é verdade. Os bioquímicos compreendem como as células se replicam e não encontram magia alguma nesse processo. Em vez disso, observam máquinas fornecidas com todos os materiais, energia e instruções necessários para executar a tarefa. As células replicam-se; logo, os robôs também poderiam replicar-se.

Os avanços na automação conduzirão naturalmente à criação de replicadores mecânicos, quer esse objetivo seja assumido ou não. À medida que as pressões competitivas exigirem níveis crescentes

de automação, a necessidade de trabalho humano nas fábricas diminuirá. A empresa Fujitsu Fanuc⁴ já opera a secção de maquinagem de uma unidade fabril vinte e quatro horas por dia com apenas dezanove trabalhadores no turno diurno, e nenhum no turno noturno. Esta fábrica produz 250 máquinas por mês, das quais 100 são robôs.

Eventualmente, os robôs poderão realizar todo o trabalho de montagem de outros robôs, montar equipamentos diversos, fabricar as peças necessárias, operar minas e geradores que abasteçam as fábricas com materiais e energia, e assim por diante. Embora uma rede de fábricas espalhadas pela paisagem não se assemelhe a um robô grávido, ela constituirá um sistema autoexpansível e autorreplicante. A revolução dos assemblers (montadores moleculares) chegará com certeza antes da automatização completa da indústria, mas os movimentos modernos nessa direção já representam passos rumo a uma espécie de gigantesco replicador mecânico e ruidoso.

Mas como poderá um sistema destes ser mantido e reparado sem mão-de-obra humana?

Imaginemos uma fábrica automática capaz tanto de testar peças como de montar equipamentos. As peças defeituosas falhariam nos testes e seriam descartadas ou recicladas. Se a fábrica também pudesse desmontar máquinas, as reparações seriam simples: bastaria desmontar as máquinas com defeito, testar todas as suas peças, substituir as peças gastas ou partidas e voltar a montá-las.

Um sistema mais eficiente diagnosticaria os problemas sem ter de testar todas as peças, mas isso não é estritamente necessário.

Um sistema extenso de fábricas operado por robôs seria funcional, mas algo pesado. Com um projeto engenhoso e um número mínimo de peças e materiais diferentes, os engenheiros poderiam condensar um sistema replicador numa única caixa — mas essa caixa poderia ainda assim ser enorme, pois teria de conter equipamentos capazes de fabricar e montar muitas peças diferentes. Quantas peças diferentes? Tantas quantas o próprio sistema contivesse. Quantas peças e materiais diferentes seriam necessários para construir uma máquina capaz de fabricar e montar tantas peças e materiais? Isso é difícil de estimar, mas sistemas baseados na tecnologia atual utilizariam chips eletrônicos. Apenas para fabricar estes chips, seria necessário demasiado equipamento para que coubesse no interior de um pequeno replicador.

Os coelhos replicam-se, mas necessitam de peças pré-fabricadas, como moléculas de vitaminas. Ao obterem estas substâncias a partir dos alimentos, conseguem sobreviver com menos maquinaria molecular do que precisariam para fabricar tudo do zero. De modo semelhante, um replicador mecânico que usasse chips pré-fabricados poderia ser algo mais simples do que um que fabricasse tudo o que necessitasse. As suas exigências "dietéticas" particulares também o ligariam a uma "ecologia" mais ampla de máquinas, ajudando a mantê-lo sob controlo. Engenheiros em estudos patrocinados pela NASA propuseram o uso de tais semirreplicadores no espaço, permitindo à indústria espacial

expandir-se com apenas uma pequena entrada de peças sofisticadas vindas da Terra.

Ainda assim, dado que replicadores de tecnologia macroscópica têm de fabricar e montar as suas peças, terão de conter tanto máquinas para fabricar peças como para montá-las. Isto evidencia uma vantagem dos replicadores moleculares: as suas peças são átomos — e os átomos vêm prontos.

2. Replicadores Moleculares

As células replicam-se. As suas máquinas copiam o seu ADN, que dirige a maquinaria ribossómica na construção de outras máquinas a partir de moléculas mais simples. Estas máquinas e moléculas estão contidas numa bolsa cheia de fluido. A sua membrana permite a entrada de moléculas de combustível e peças para mais nanomáquinas, ADN, membrana, e assim por diante; e permite a saída do combustível gasto e de componentes descartados. Uma célula replica-se copiando as partes dentro da sua bolsa membranar, separando-as em dois conjuntos e depois estrangulando a bolsa ao meio. Poder-se-iam construir replicadores artificiais que funcionassem de forma semelhante, mas usando montadores (assemblers) em vez de ribossomas. Desta forma, poderíamos construir replicadores semelhantes a células que não estariam limitados à maquinaria molecular feita a partir das dobras suaves e húmidas das moléculas de proteína.

No entanto, os engenheiros parecem mais propensos a desenvolver outras abordagens à replicação. A evolução não dispunha de uma forma fácil de alterar o padrão fundamental da célula, e esse padrão tem limitações. Nas sinapses, por exemplo, as células do cérebro comunicam com as vizinhas esvaziando pequenas bolsas de moléculas químicas. Estas moléculas depois agitam-se aleatoriamente até se ligarem a sensores moleculares na célula vizinha, por vezes desencadeando um impulso neural. Uma sinapse química é um interruptor lento, e os impulsos neurais deslocam-se mais devagar do que o som. Com montadores, os engenheiros moleculares construirão computadores inteiros mais pequenos do que uma sinapse e um milhão de vezes mais rápidos.

A mutação e a seleção não poderiam transformar uma sinapse num nanocomputador mecânico — tal como um criador de cavalos não poderia transformar um cavalo num automóvel. No entanto, os engenheiros construíram automóveis, e também aprenderão a construir computadores mais rápidos do que cérebros, e replicadores mais capazes do que as células existentes.

Alguns destes replicadores não se parecerão em nada com células, mas sim com fábricas reduzidas⁵ ao tamanho de uma célula. Conterão nanomáquinas montadas sobre uma estrutura molecular e correias transportadoras para mover peças de máquina para máquina. No exterior, terão um conjunto de braços montadores para construírem réplicas de si mesmos, átomo a átomo, ou secção a secção.

A velocidade com que estes replicadores podem replicar dependerá da velocidade da sua montagem e do seu tamanho. Imagine um montador avançado que contenha um milhão de átomos: pode ter até dez mil peças móveis, cada uma contendo em média cem átomos — peças suficientes para constituir uma máquina bastante complexa. Na realidade, o montador em si parece uma caixa que suporta um braço robótico curto, com cem átomos de comprimento. A caixa e o braço contêm dispositivos que movem o braço de posição em posição, e outros que mudam as ferramentas moleculares na ponta do braço.

Por trás da caixa está um dispositivo que lê uma fita e fornece sinais mecânicos que acionam os movimentos do braço e as mudanças de ferramenta. Em frente ao braço está uma estrutura inacabada. Correias transportadoras trazem moléculas para o sistema do montador. Algumas fornecem energia aos motores que acionam o leitor de fita e o braço, e outras fornecem grupos de átomos para a montagem. Átomo a átomo (ou grupo a grupo), o braço move as peças para o lugar conforme indicado pela fita; reações químicas ligam-nas à estrutura ao contato.

Estes montadores funcionarão rapidamente. Uma enzima rápida⁶, como a anidrase carbónica ou a isomerase cetosteróide, pode processar quase um milhão de moléculas por segundo, mesmo sem correias transportadoras e mecanismos motorizados que coloquem uma nova molécula no lugar assim que a antiga é libertada. Poderá parecer demasiado pedir que um montador agarre uma molécula, a mova e a encaixe no sítio em apenas um milionésimo de segundo. Mas pequenos apêndices podem mover-

se muito rapidamente. Um braço humano pode bater várias vezes por segundo, os dedos podem tocar ainda mais rápido, uma mosca pode agitar as asas depressa o suficiente para zumbir, e um mosquito produz um som irritante. Os insetos conseguem agitar as asas cerca de mil vezes mais rápido do que um braço humano porque a asa de um inseto é cerca de mil vezes mais curta.

Um braço de montador será cerca de cinquenta milhões de vezes mais curto do que um braço humano, e por isso (como se verifica) poderá mover-se para a frente e para trás cerca de cinquenta milhões de vezes mais rapidamente⁷. Para um braço de montador mover-se um mero milhão de vezes por segundo seria como um braço humano mover-se uma vez por minuto: lento. Portanto, este parece ser um objetivo bastante razoável.

A velocidade da replicação dependerá também do tamanho total do sistema a construir. Os montadores não se replicarão sozinhos; precisarão de materiais e energia, e de instruções sobre como usá-los. Produtos químicos comuns podem fornecer materiais e energia, mas a nanomáquina deve estar disponível para os processar. Moléculas poliméricas irregulares podem codificar informação, como uma fita perfurada de papel, mas é necessário um leitor para traduzir os padrões das irregularidades em padrões de movimento do braço. Juntas, estas partes formam o essencial de um replicador: a fita fornece as instruções para montar uma cópia do montador, do leitor, das outras nanomáquinas e da própria fita⁸.

Um desenho razoável para este tipo de replicador provavelmente incluirá vários braços montadores e mais alguns braços para

segurar e mover as peças de trabalho. Cada um destes braços adicionará cerca de um milhão de átomos. As outras partes — leitores de fita, processadores químicos, e assim por diante — poderão ser tão complexas quanto os montadores. Por fim, um sistema replicador flexível incluirá provavelmente um computador simples; seguindo a abordagem mecânica mencionada no Capítulo 1, isso acrescentará aproximadamente 100 milhões de átomos. No total, estas partes somarão menos de 150 milhões de átomos. Considere em vez disso um total de um bilhão, para deixar uma margem de erro ampla. Ignore a capacidade acrescida dos braços montadores adicionais, deixando uma margem ainda maior. Trabalhando a um milhão de átomos por segundo, o sistema ainda se copiará a si mesmo em mil segundos, ou pouco mais de quinze minutos — aproximadamente o tempo que uma bactéria demora a replicar em boas condições.

Imagine um replicador assim a flutuar numa garrafa cheia de produtos químicos, fazendo cópias de si mesmo. Constrói uma cópia em mil segundos, trinta e seis em dez horas. Numa semana, acumula cópias suficientes para preencher o volume de uma célula humana. Num século, acumula cópias suficientes para formar uma mancha respeitável. Se isto fosse tudo o que os replicadores pudessem fazer, talvez pudéssemos ignorá-los em segurança.

Cada cópia, contudo, construirá ainda mais cópias. Assim, o primeiro replicador monta uma cópia em mil segundos, os dois replicadores constroem então mais duas nos próximos mil segundos, os quatro constroem mais quatro, e os oito constroem mais oito. No fim de dez horas, não há trinta e seis replicadores

novos, mas mais de 68 mil milhões. Em menos de um dia, pesariam uma tonelada; em menos de dois dias, pesariam mais do que a Terra; em quatro horas mais, excederiam a massa do Sol e de todos os planetas juntos — se a garrafa de produtos químicos não se tivesse esgotado muito antes.

O dobrar regular significa crescimento exponencial. Os replicadores multiplicam-se exponencialmente, a não ser que sejam contidos, por falta de espaço ou recursos. As bactérias fazem-no, e a uma taxa semelhante à dos replicadores descritos. As pessoas replicam-se muito mais lentamente, mas, dado tempo suficiente, também poderiam ultrapassar qualquer recurso finito disponível. A preocupação com o crescimento populacional nunca perderá a sua importância. A preocupação em controlar replicadores novos e rápidos tornar-se-á em breve, de facto, uma preocupação crucial.

3. Moléculas e Arranha-céus

Máquinas capazes de agarrar e posicionar átomos individuais poderão construir quase tudo, ao ligarem os átomos certos nos padrões adequados, como descrevi no final do Capítulo 1. Claro está, construir objetos grandes um átomo de cada vez será lento. Afinal, uma mosca contém cerca de um milhão de átomos para cada segundo desde que os dinossauros eram jovens. No entanto, as máquinas moleculares podem construir objetos de tamanho substancial — afinal, constroem baleias.

Para fabricar objetos grandes rapidamente, um vasto número de montadores terá de cooperar, mas os replicadores produzirão montadores às toneladas. De facto, com o desenho correto, a diferença entre um sistema montador e um replicador residirá inteiramente na programação do montador.

Se um montador replicante pode copiar-se a si próprio em mil segundos, então pode ser programado para construir outra coisa do seu tamanho com igual rapidez. Do mesmo modo, uma tonelada de replicadores pode rapidamente construir uma tonelada de outra coisa — e o produto terá todos os seus biliões de biliões de biliões de átomos no lugar certo, com apenas uma fração minúscula mal colocada⁹.

Para entender as capacidades e limites de um método para montar objetos grandes, imagine uma folha plana coberta com pequenos braços de montagem — talvez um exército de replicadores reprogramados para trabalhos de construção e organizados em fileiras ordenadas. Transportadores e canais de comunicação atrás deles fornecem moléculas reativas, energia e instruções de montagem. Se cada braço ocupar uma área com 100 diâmetros atômicos de largura, então atrás de cada montador haverá espaço para transportadores e canais com uma área transversal total de cerca de 10 000 átomos.

Isto parece espaço suficiente. Um espaço com dez ou vinte átomos de largura pode conter um transportador (talvez baseado em correias e polias moleculares). Um canal com alguns átomos de largura pode conter uma haste molecular que, tal como aquelas no

computador mecânico mencionado no Capítulo 1, será empurrada e puxada para transmitir sinais. Todos os braços trabalharão em conjunto para construir uma estrutura larga e sólida, camada por camada. Cada braço será responsável pela sua própria área, manipulando cerca de 10 000 átomos por camada. Uma folha de montadores a processar 1 000 000 de átomos por segundo por braço completará cerca de cem camadas atômicas por segundo. Isto pode parecer rápido, mas a este ritmo empilhar uma espessura do tamanho de uma folha de papel demorará cerca de uma hora, e fazer uma placa com um metro de espessura levará mais de um ano.

Braços mais rápidos poderiam aumentar a velocidade de montagem para mais de um metro por dia, mas gerariam mais calor residual. Se pudessem construir uma camada com um metro de espessura num dia, o calor de um metro quadrado poderia cozinhar centenas de bifes simultaneamente, e poderia fritar a maquinaria. A partir de certa dimensão e velocidade, os problemas de arrefecimento tornar-se-ão um fator limitador, mas existem outras formas de montar objetos mais rapidamente sem sobreaquecer a maquinaria.

Imagine tentar construir uma casa colando, um a um, grãos de areia individuais. A cada nova camada adicionada, as máquinas coladoras de grãos demorariam tanto que levantar as paredes poderia levar décadas. Agora imagine que máquinas numa fábrica colam os grãos para formar tijolos. A fábrica pode trabalhar em muitos tijolos ao mesmo tempo. Com máquinas suficientes a colar grãos, os tijolos sairiam em grande quantidade; os montadores das

paredes poderiam então construir paredes rapidamente, empilhando os tijolos pré-montados. De modo semelhante, montadores moleculares juntar-se-ão a montadores maiores para construir coisas grandes rapidamente — as máquinas podem ter qualquer dimensão, desde molecular até gigantesca. Com esta abordagem, a maior parte do calor da montagem será dissipada longe do local de trabalho, na fabricação das peças.

A construção de arranha-céus e a arquitetura da vida sugerem um modo relacionado de construir objetos grandes. Plantas e animais grandes têm sistemas vasculares, canais intrincados que transportam materiais para a maquinaria molecular que trabalha em todo o tecido. Do mesmo modo, depois dos montadores e rebiteiros concluírem a estrutura de um arranha-céus, o “sistema vascular” do edifício — os elevadores e corredores, auxiliados por guias — transporta os materiais de construção para os trabalhadores por todo o interior. Os sistemas de montagem poderiam também empregar esta estratégia, primeiro montando um andaime e depois trabalhando por todo o volume, incorporando materiais trazidos por canais do exterior.

Imagine este método a ser utilizado para “cultivar” um grande motor de foguetão, construído dentro de um tanque numa instalação industrial. O tanque — feito de aço brilhante, com uma janela de vidro para os visitantes observarem — é mais alto do que uma pessoa, pois precisa de conter o motor completo. Canos e bombas ligam-no a outros equipamentos e a permutadores de calor refrigerados a água. Esta configuração permite ao operador fazer circular diversos fluidos através do tanque.

Para iniciar o processo, o operador abre a parte superior do tanque e baixa para o seu interior uma placa de base, sobre a qual o motor será construído. A tampa é então novamente selada. Com um simples toque num botão, as bombas inundam a câmara com um fluido espesso e esbranquiçado, que submerge a placa e logo torna a janela opaca. Este fluido provém de outro tanque onde foram cultivados assembladores replicadores, posteriormente reprogramados através da introdução e multiplicação de uma nova fita de instruções (um processo semelhante à infeção de bactérias por um vírus). Estes novos sistemas de assembladores, mais pequenos que bactérias, dispersam a luz e tornam o fluido esbranquiçado. A sua enorme quantidade torna-o viscoso.

No centro da placa de base, imerso neste líquido turvo e repleto de montadores (assemblers), encontra-se uma “semente”. Esta contém um nanocomputador com os planos detalhados do motor e possui, na sua superfície, zonas de ancoragem onde os montadores se fixam. Quando um assemblador se liga à semente, ambos se conetam, permitindo ao computador central transferir instruções para o computador do assemblador. Esta nova programação informa o assemblador da sua posição relativa à semente e orienta os seus braços manipuladores para capturar outros montadores. Estes, por sua vez, ligam-se à estrutura e recebem instruções idênticas. Obedecendo às diretivas da semente — que se propagam por toda a rede crescente de assembladores interligados — forma-se uma espécie de cristal de assembladores a partir do caos líquido. Como cada assemblador conhece a sua posição no plano global, apenas captura novos elementos nos locais específicos onde são necessários. Forma-se assim um padrão de organização mais

complexo e menos regular do que qualquer cristal natural. Ao longo de algumas horas, esta estrutura de suporte cresce até atingir a forma final do motor de foguetão.

Seguidamente, as bombas do tanque entram novamente em ação, substituindo o fluido esbranquiçado — saturado de assembladores livres — por uma mistura clara de solventes orgânicos e substâncias dissolvidas, incluindo compostos de alumínio, compostos ricos em oxigénio, e elementos destinados a servir de combustível para os montadores. À medida que o fluido se torna translúcido, a forma do motor torna-se visível através da janela — assemelhando-se a um modelo em escala real esculpido em plástico branco translúcido.

Então, uma nova mensagem propagada a partir da semente instrui certos montadores a libertarem os seus vizinhos e a recolherem os braços. Estes são lavados para fora da estrutura em jatos brancos súbitos, deixando para trás uma malha esponjosa de assembladores fixos, agora com espaço suficiente para continuar a operar. A forma do motor dentro do tanque torna-se quase transparente, com um leve brilho iridescente.

Cada assemblador restante, embora ainda ligado aos seus vizinhos, encontra-se agora rodeado por minúsculos canais preenchidos com fluido. Braços especiais, semelhantes a flagelos, agitam o fluido em redor, impulsionando-o através destes canais microscópicos. Estes movimentos — como todos os outros realizados pelos montadores — são alimentados por motores moleculares, cujo combustível são moléculas dissolvidas no próprio

fluido. Tal como o açúcar dissolve-se para alimentar o fermento, também estes compostos dissolvidos fornecem energia aos montadores. O fluido em circulação traz consigo combustível fresco e matérias-primas dissolvidas para a construção, e ao fluir para fora remove o calor residual. A rede de comunicações interna propaga instruções a cada assemblador individual.

Os montadores estão agora prontos para iniciar a construção. O objetivo é fabricar um motor de foguetão, constituído sobretudo por tubos e bombas — ou seja, estruturas leves, robustas, de formas intrincadas, algumas capazes de resistir a temperaturas extremas, outras concebidas para transportar fluido refrigerante. Nos pontos que exigem elevada resistência estrutural, os montadores constroem hastes de fibras interligadas de carbono, na sua forma de diamante. A partir destas, erguem uma malha cuidadosamente desenhada para suportar os padrões específicos de tensão previstos. Nas zonas onde a resistência ao calor e à corrosão é essencial — como nas superfícies mais expostas —, constroem estruturas similares em óxido de alumínio, na sua forma cristalina de safira. Onde a tensão estrutural é baixa, os montadores poupam material deixando espaços mais amplos na malha; onde a tensão é elevada, reforçam-na até que os canais remanescentes fiquem tão estreitos que mal permitem a sua própria passagem. Noutras zonas, depositam materiais diferentes para formar sensores, computadores, motores, solenoides, e todos os componentes necessários ao funcionamento do motor.

Para concluir o processo, constroem paredes que subdividem os canais restantes em células quase seladas. Depois, recolhem-se

para os últimos espaços abertos e bombeiam para fora o fluido que ali resta. Uma vez as células seladas, retiram-se completamente, flutuando para longe com o fluxo do fluido em circulação. Por fim, o tanque é esvaziado, um sistema de pulverização enxagua o motor, a tampa eleva-se e o motor acabado é içado para secar. A sua criação demorou menos de um dia e exigiu praticamente nenhuma intervenção humana.

Como será esse motor? Em vez de ser uma peça maciça de metal soldado e aparafusado, trata-se de um objeto contínuo, sem emendas, semelhante a uma gema. As suas células internas vazias, dispostas em padrões separados por distâncias equivalentes ao comprimento de onda da luz, produzem um efeito secundário: tal como os sulcos num disco laser, difratam a luz, gerando uma iridescência variada semelhante à de um ópalo de fogo. Esses espaços vazios reduzem ainda mais o peso de uma estrutura já feita de alguns dos materiais mais leves e resistentes conhecidos. Comparado com um motor metálico moderno, este motor avançado possui mais de 90% menos massa.

Se o bater com os dedos, ressoa como um sino de tom surpreendentemente agudo para o seu tamanho. Montado numa nave espacial construída de forma semelhante, eleva-se da pista até ao espaço e regressa com facilidade. Suporta um uso intenso e prolongado porque os seus materiais resistentes permitiram aos engenheiros incluir margens de segurança amplas. Além disso, graças à capacidade dos montadores de estruturar os materiais de modo a cederem antes de se partirem (amortecendo fissuras e

impedindo a sua propagação), o motor não é apenas resistente — é robusto.

Apesar de toda a sua excelência, este motor é, no essencial, bastante convencional. Apenas substituiu o metal denso por estruturas cuidadosamente desenhadas de átomos leves e fortemente ligados. O produto final não contém qualquer nanomáquina ativa.

Projetistas mais avançados, contudo, explorarão a nanotecnologia de forma mais profunda. Poderão deixar um sistema vascular permanente, capaz de alimentar assembladores e desassembladores programáveis para reparar peças desgastadas. Enquanto receber energia e matérias-primas, tal motor renovará a sua própria estrutura. E mais: motores avançados poderão ser literalmente mais flexíveis. Motores-foguetão funcionam melhor se puderem assumir formas diferentes consoante as condições operacionais, mas os engenheiros não conseguem tornar o metal maciço simultaneamente forte, leve e maleável. Com nanotecnologia, no entanto, será possível construir estruturas mais fortes que o aço e mais leves que a madeira, capazes de mudar de forma como um músculo — funcionando, como o músculo¹⁰, com o princípio das fibras deslizantes. Um motor poderia então expandir-se, contrair-se e fletir-se na base para orientar o impulso conforme necessário, em condições variáveis. Com assembladores e desassembladores devidamente programados, o motor poderia até remodelar a sua estrutura fundamental muito depois de ter deixado o tanque onde foi criado.

Resumindo: assembladores replicantes copiar-se-ão a si próprios por toneladas e fabricarão depois outros produtos — computadores, motores-foguetão, cadeiras, e tudo o mais. Fabricarão desassembladores capazes de decompor rochas para extrair matéria-prima. Construirão coletores solares para fornecer energia. Embora minúsculos, construirão em grande escala. Equipas de nanomáquinas na natureza constroem baleias, e sementes replicam maquinaria e organizam átomos em vastas estruturas de celulose, edificando sequoias gigantes. Nada há de verdadeiramente surpreendente em fazer crescer um motor-foguetão num tanque especialmente preparado. Na verdade, silvicultores equipados com as sementes de assembladores apropriadas poderiam fazer crescer naves espaciais a partir do solo, do ar e da luz do sol.

Os montadores poderão fabricar virtualmente qualquer coisa a partir de materiais comuns, sem mão-de-obra humana, substituindo fábricas fumegantes por sistemas tão limpos quanto florestas. Transformarão a tecnologia e a economia desde as suas raízes, abrindo um novo mundo de possibilidades. Serão, de facto, motores de abundância.

CAPÍTULO 5

Máquinas Pensantes

O mundo está¹ no limiar de uma segunda Era da computação. As novas tecnologias que agora saem dos laboratórios estão a começar a transformar o computador de uma máquina de calcular incrivelmente rápida num dispositivo que imita os processos de pensamento humano, dando às máquinas a capacidade de raciocinar, fazer julgamentos e até mesmo aprender. Esta "inteligência artificial" já está a executar tarefas que antes eram consideradas como exigindo inteligência humana...

— BUSINESS WEEK

OS COMPUTADORES saíram das salas dos fundos e dos laboratórios para ajudarem na escrita, nos cálculos e no entretenimento, tanto em casa como nos escritórios. Estas máquinas realizam tarefas simples e repetitivas, mas outras, ainda confinadas aos laboratórios, fazem muito mais. Investigadores na área da inteligência artificial afirmam que os computadores podem tornar-se inteligentes — e cada vez menos pessoas discordam. Para compreendermos o nosso futuro, precisamos perceber se a inteligência artificial é tão impossível como antes parecera voar até à Lua.

Máquinas pensantes não precisam de se parecer com seres humanos — nem na forma, nem na função, nem nas faculdades mentais. De facto, alguns sistemas de inteligência artificial

mostrarão poucos traços do típico licenciado em humanidades; em vez disso, funcionarão apenas como motores poderosos de concepção (design). No entanto, compreender como as mentes humanas evoluíram a partir da matéria inconsciente lançará luz sobre o modo como as máquinas podem vir a pensar. As mentes, tal como outras formas de ordem, evoluíram por variação e seleção.

As mentes atuam. Não é necessário aderir ao behaviorismo de Skinner para reconhecer a importância do comportamento — inclusive daquele comportamento interno a que chamamos pensamento. O RNA, ao replicar-se em tubos de ensaio, mostra como a noção de propósito pode aplicar-se (como uma espécie de atalho conceptual) até mesmo a moléculas completamente desprovidas de mente. Não possuem nervos nem músculos, mas evoluíram de modo a "comportar-se" de maneiras que favorecem a sua replicação. A variação e a seleção moldaram o comportamento simples de cada molécula, o qual permanece fixo durante toda a sua "vida".

Moléculas individuais de RNA não se adaptam, mas as bactérias sim. A competição favoreceu bactérias que se adaptam à mudança — por exemplo, ajustando a mistura de enzimas digestivas consoante os alimentos disponíveis. Ainda assim, esses mecanismos de adaptação são eles próprios fixos: as moléculas alimentares atuam como gatilhos que ativam interruptores genéticos, tal como o ar frio aciona um termóstato.

Algumas bactérias utilizam também uma forma primitiva de orientação por tentativa e erro. Bactérias deste tipo tendem a nadar

em linha reta, e têm apenas "memória" suficiente para distinguir se as condições estão a melhorar ou a piorar ao longo do seu trajeto. Se sentem que as condições estão a melhorar, mantêm-se na mesma direção. Se percebem que estão a piorar, param, rodopiam e partem numa direção aleatória, geralmente diferente. Testam direções e favorecem as boas descartando as más. E, como este comportamento as faz convergir para zonas mais ricas em moléculas alimentares, prosperaram. As planárias (vermes achatados), embora desprovidas de cérebro, demonstram verdadeira capacidade de aprendizagem. Conseguem aprender a escolher o caminho correto num simples labirinto em T. Experimentam virar à esquerda ou à direita e, gradualmente, selecionam o comportamento — ou formam o hábito — que lhes traz melhores resultados. Trata-se da seleção do comportamento pelas suas consequências, fenómeno a que os psicólogos behavioristas chamam "a Lei do Efeito". Os genes em evolução destas espécies de vermes geraram indivíduos com comportamentos também em evolução.

Ainda assim, vermes treinados para percorrer labirintos (ou até os pombos de Skinner, treinados para bicar quando uma luz se acende a verde) não demonstram qualquer sinal do pensamento reflexivo que associamos à mente. Organismos que se adaptam apenas através da simples Lei do Efeito aprendem apenas por tentativa e erro, variando e selecionando comportamentos reais — não antecipam nem decidem conscientemente. No entanto, a seleção natural favoreceu frequentemente organismos capazes de pensar, e o pensamento não é algo mágico. Como sublinha Daniel Dennett, da Universidade de Tufts², os genes evoluídos podem

dotar os cérebros animais com modelos internos do funcionamento do mundo (um pouco à semelhança dos modelos usados nos sistemas de engenharia assistida por computador). Esses animais podem então "imaginar" várias ações e consequências, evitando aquelas que "parecem" perigosas e realizando as que "parecem" seguras e vantajosas. Ao testar ideias nesses modelos internos, podem poupar o esforço — e o risco — de testar as ações no mundo exterior.

Dennett aponta ainda que a própria Lei do Efeito pode remodelar esses modelos internos. Assim como os genes podem dar origem a comportamentos em evolução, também podem dar origem a modelos mentais em evolução. Organismos flexíveis conseguem variar os seus modelos e prestar mais atenção às versões que melhor orientam a ação. Todos sabemos o que é experimentar algo e aprender com o que resulta. Os modelos não precisam de ser instintivos; podem evoluir ao longo de uma só vida.

Todavia, animais sem linguagem raramente transmitem os seus novos entendimentos. Estes desaparecem com o cérebro que os produziu, pois, os modelos mentais aprendidos não ficam gravados nos genes. Ainda assim, até animais sem fala conseguem imitar-se mutuamente, o que dá origem a memes e culturas. Uma macaca, no Japão, inventou uma maneira de usar água para separar os grãos da areia; outras rapidamente aprenderam a fazer o mesmo. Nas culturas humanas, com a sua linguagem e imagens, modelos valiosos sobre o funcionamento do mundo podem sobreviver aos seus criadores e espalhar-se por todo o planeta.

Num nível ainda mais elevado, uma mente (e "mente" já é, neste ponto, um nome adequado) pode manter padrões em evolução para julgar se as partes de um modelo — as ideias de uma visão do mundo — parecem suficientemente fiáveis para orientar a ação. Assim, a mente seleciona os seus próprios conteúdos, incluindo as suas regras de seleção. As regras de juízo que filtram os conteúdos da ciência evoluíram desta forma.

À medida que o comportamento, os modelos e os critérios de conhecimento evoluem, também os objetivos podem evoluir. Aquilo que traz benefícios, conforme julgado por algum critério mais básico, acaba por começar a parecer bom; e então torna-se um fim em si mesmo. A honestidade compensa, e acaba por se tornar um princípio de ação valorizado. À medida que o pensamento e os modelos mentais orientam a ação e o próprio pensamento, adotamos o raciocínio claro e os modelos precisos como objetivos por si só. A curiosidade cresce, e com ela, o amor pelo conhecimento pelo próprio prazer de conhecer. A evolução dos objetivos dá assim origem tanto à ciência como à ética. Como escreveu Charles Darwin, "o estágio mais elevado possível da cultura moral é quando reconhecemos que devemos controlar os nossos pensamentos." Alcançamos isto também por variação e seleção, concentrando-nos nos pensamentos de valor e deixando que outros escapem da atenção.

Marvin Minsky, do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, vê a mente como uma espécie de sociedade³: um sistema evolutivo de agências comunicantes, cooperantes e concorrentes, cada uma composta por agentes ainda mais simples. Ele descreve o

pensamento e a ação em termos da atividade dessas agências. Algumas agências conseguem fazer pouco mais do que guiar uma mão para agarrar uma chávena; outras (muito mais complexas) guiam o sistema da fala à medida que este escolhe palavras numa situação delicada. Não estamos conscientes de dirigir os nossos dedos para envolverem uma chávena de determinada maneira. Delegamos essas tarefas a agentes competentes, e raramente reparamos neles, a não ser quando falham. Todos sentimos impulsos contraditórios e dizemos palavras involuntárias; são sintomas de discórdia entre as agências da mente. A nossa consciência disto faz parte do processo autorregulador pelo qual as agências mais gerais da mente gerem as restantes.

Os memes podem ser vistos como agentes da mente formados através do ensino e da imitação. Para sentir que duas ideias estão em conflito, você tem de ter incorporado ambas como agentes na sua mente — ainda que uma seja antiga, forte e apoiada por aliados, e a outra uma ideia-agente nova que talvez não sobreviva à sua primeira batalha. Por causa da nossa autoconsciência superficial, muitas vezes perguntamo-nos de onde veio uma ideia que está na nossa cabeça. Algumas pessoas imaginam que esses pensamentos e sentimentos provêm diretamente de agências exteriores às suas próprias mentes; tendem a acreditar em cabeças assombradas.

Na Roma antiga, acreditava-se em "génios", espíritos bons e maus que acompanhavam a pessoa desde o berço até à sepultura, trazendo sorte ou azar. Atribuía-se sucessos notáveis a um "génio" especial. E ainda hoje, aqueles que não compreendem como

os processos naturais geram novidade veem o gênio como uma forma de magia. Mas na realidade, os genes em evolução criaram mentes que expandem o conhecimento variando padrões de ideias e selecionando entre eles. Com variação rápida e seleção eficaz, orientadas por conhecimento herdado ou transmitido por outros, por que não haveriam tais mentes de revelar aquilo a que chamamos genialidade? Ver a inteligência como um processo natural torna a ideia de máquinas inteligentes menos surpreendente. E sugere também como elas poderão funcionar.

1. Inteligência de Máquina

Uma definição de dicionário para "máquina" é: "Qualquer sistema ou dispositivo, como um computador eletrônico, que executa ou auxilia na execução de uma tarefa humana."⁴ Mas exatamente quantas tarefas humanas serão as máquinas capazes de executar? O cálculo foi em tempos uma habilidade mental além das capacidades das máquinas, um domínio reservado aos inteligentes e instruídos. Hoje, ninguém pensaria em chamar a uma calculadora de bolso uma inteligência artificial; o cálculo passou a parecer um procedimento "meramente" mecânico.

Ainda assim, a ideia de construir computadores comuns já foi, outrora, chocante. Por volta de meados do século XIX, Charles Babbage construiu calculadoras mecânicas e parte de um computador mecânico programável⁵; no entanto, enfrentou dificuldades financeiras e de construção. Um tal Dr. Young não ajudou em nada: argumentou que seria mais barato investir o dinheiro e usar os juros para pagar a calculadores humanos.

Também o Astrónomo Real Britânico, Sir George Airy, foi pouco recetivo — uma entrada no seu diário afirma: "A 15 de Setembro, o Sr. Goulburn... pediu a minha opinião sobre a utilidade da máquina de calcular de Babbage... Respondi, entrando plenamente na matéria, e dando a minha opinião de que era inútil."

A máquina de Babbage estava adiantada em relação ao seu tempo — o que significa que, ao construí-la, os mecânicos foram forçados a fazer avançar a arte da fabricação de peças de precisão. E, de facto, ela não teria excedido grandemente a velocidade de um calculador humano experiente — mas teria sido mais fiável e mais fácil de melhorar.

A história dos computadores e da inteligência artificial (conhecida como IA) assemelha-se à do voo no ar e no espaço. Até há pouco tempo, as pessoas descartavam ambas as ideias como impossíveis — normalmente querendo dizer que não sabiam como as realizar, ou que ficariam incomodadas se alguém o conseguisse. E até hoje, a IA não teve ainda uma demonstração simples e conclusiva, nenhum equivalente funcional de um avião a voar ou de uma aterragem na Lua. Avançou bastante, mas as pessoas continuam a mudar as suas definições de inteligência.

Apesar das notícias sensacionalistas sobre "cérebros eletrónicos gigantes", poucas pessoas chamaram inteligentes aos primeiros computadores. De facto, o próprio nome "computador" sugere uma mera máquina aritmética. No entanto, em 1956, em Dartmouth, durante a primeira conferência mundial sobre inteligência artificial, os investigadores Alan Newell e Herbert Simon apresentaram o

Logic Theorist, um programa capaz de provar teoremas de lógica simbólica. Nos anos seguintes, programas de computador passaram a jogar xadrez e a ajudar químicos a determinar estruturas moleculares. Dois programas médicos, CASNET e MYCIN (o primeiro centrado na medicina interna, o segundo na diagnose e tratamento de infeções), obtiveram desempenhos impressionantes. Segundo o *Handbook of Artificial Intelligence*⁶, foram “avaliados, em testes experimentais, como atuando a níveis de peritos humanos nos respetivos domínios.” Um programa chamado PROSPECTOR localizou, no estado de Washington, um depósito de molibdénio no valor de milhões de dólares.

Estes chamados “sistemas periciais” (ou expert systems) têm sucesso apenas em áreas de competência estritamente limitadas, mas teriam espantado os programadores de computadores dos anos 1950. Hoje, no entanto, poucas pessoas os consideram uma verdadeira inteligência artificial: a IA tem sido um alvo em constante movimento. A passagem da *Business Week* citada anteriormente mostra apenas que os computadores já podem ser programados com conhecimento suficiente, e executar truques suficientemente sofisticados, para que algumas pessoas se sintam à vontade em chamá-los inteligentes. Anos a ver robôs fictícios e computadores falantes na televisão, pelo menos, tornaram a ideia da IA familiar.

A principal razão pela qual se tem declarado a IA impossível tem sido sempre a noção de que “as máquinas” são intrinsecamente estúpidas — uma ideia que começa agora a dissipar-se. As máquinas do passado eram, de facto, objetos brutos e desajeitados,

que realizavam trabalhos simples e de força bruta. Mas os computadores lidam com informação, seguem instruções complexas e podem ser instruídos a modificar as suas próprias instruções. Podem experimentar e aprender. Não contêm engrenagens e óleo, mas sim traçados de fios e padrões evanescentes de energia elétrica. Como sugere Douglas Hofstadter⁷ (através de uma personagem num diálogo sobre IA): “Por que não deixas que a palavra ‘máquina’ evoque imagens de padrões de luz dançante, em vez de escavadoras gigantes a vapor?”

Críticos de ocasião, confrontados com a ideia de inteligência artificial, apontam frequentemente para a estupidez dos computadores atuais — como se isso provasse algo sobre o futuro. (Talvez uma máquina futura se pergunte se tais críticos exibiram, de facto, pensamento genuíno.) Esta objeção é irrelevante — locomotivas a vapor não voavam, embora tenham demonstrado princípios mecânicos mais tarde utilizados em motores de aviões. Do mesmo modo, os vermes rastejantes de há eras não mostravam inteligência perceptível e, no entanto, os nossos cérebros utilizam neurónios muito semelhantes aos deles.

Críticos mais casuais evitam também pensar seriamente sobre a IA ao declarar que nunca poderemos construir máquinas mais inteligentes do que nós próprios. Esquecem-se do que a história revela. Os nossos ancestrais distantes e sem fala conseguiram dar origem a entidades de maior inteligência através da evolução genética — e fizeram-no sem sequer pensar nisso. Mas nós estamos a pensar nisso, e os memes da tecnologia evoluem muito mais rapidamente do que os genes da biologia. Podemos, com

segurança, criar máquinas com uma capacidade mais humana de aprender e organizar conhecimento⁸.

Parece haver apenas uma ideia que poderia sustentar a impossibilidade de fazer padrões de pensamento dançar em novas formas de matéria. Trata-se da ideia de materialismo mental — o conceito de que a mente é uma substância especial, um “material pensante” mágico, de algum modo inalcançável por imitação, duplicação ou utilização tecnológica. Os psicobiólogos não veem qualquer evidência dessa substância, nem sentem necessidade do materialismo mental para explicar a mente. Como a complexidade do cérebro ultrapassa a total compreensão humana, parece suficientemente complexa para conter uma mente. Com efeito, se uma única pessoa pudesse compreender totalmente um cérebro, isso tornaria o cérebro menos complexo do que a mente dessa pessoa. Se todos os bilhões de pessoas da Terra cooperassem simplesmente para observar a atividade de um único cérebro humano, cada uma teria de monitorizar dezenas de milhares de sinapses ativas em simultâneo — claramente uma tarefa impossível. Para uma única pessoa tentar compreender os padrões intermitentes do cérebro como um todo, seria cinco mil milhões de vezes mais absurdo. Dado que o mecanismo do nosso cérebro ultrapassa tão massivamente a capacidade da nossa mente de o compreender, esse mesmo mecanismo parece suficientemente complexo para conter a mente em si.

2. Alvo de Turing

Num artigo de 1950 sobre a inteligência das máquinas, o matemático britânico Alan Turing escreveu:

Acredito que, até ao final do século, o uso das palavras e a opinião educada em geral terão evoluído de tal forma que será possível falar de máquinas a pensar sem que isso suscite contradição.⁹

Mas tudo dependerá daquilo a que chamamos pensar. Alguns defendem que apenas os seres humanos pensam, e que os computadores não podem ser pessoas; depois recostam-se, satisfeitos com a sua lógica circular.

Contudo, nesse mesmo artigo, Turing questionou os critérios que usamos para julgar a inteligência humana, sugerindo que, na prática, avaliamos frequentemente a inteligência de alguém com base na qualidade da sua conversação. Propôs então o que chamou de jogo da imitação — hoje amplamente conhecido como o teste de Turing. Imagine-se numa sala, a comunicar por um terminal com uma pessoa e com um computador, ambos localizados em salas separadas. Escreve mensagens; tanto a pessoa como o computador respondem. Cada um tenta comportar-se como um ser humano inteligente. Após uma prolongada “conversa por teclado” com ambos — talvez abordando temas como literatura, arte, o estado do tempo, ou mesmo a experiência sensorial do paladar matinal — poderá acontecer que não consiga distinguir qual é o humano e qual

é a máquina. Se uma máquina conseguir manter esse nível de conversa de forma consistente, Turing propõe que deveríamos considerá-la verdadeiramente inteligente. E mais: teríamos de reconhecer que essa máquina possui um vasto conhecimento sobre os seres humanos.

Para fins práticos, não precisamos perguntar: “Poderá uma máquina ter autoconsciência — isto é, consciência?” De facto, os críticos que afirmam que as máquinas não podem ser conscientes nunca parecem conseguir definir com clareza o que querem dizer com “consciência”. A autoconsciência evoluiu para orientar o pensamento e a ação — não para embelezar a nossa humanidade. Precisamos estar conscientes dos outros, das suas capacidades e inclinações, para podermos planejar interações que os envolvam. Da mesma forma, precisamos estar conscientes de nós próprios, das nossas capacidades e tendências, para podermos planejar em relação a nós mesmos. Não há qualquer mistério metafísico especial na autoconsciência. Aquilo a que chamamos o eu responde a impressões do resto da mente, coordenando algumas das suas atividades. Isto torna-o nada mais (e nada menos) do que uma parte específica dos padrões de pensamento interativos. A ideia de que o eu seja um padrão inserido numa substância mental especial (distinta da substância mental do cérebro) nada explica sobre a consciência — apenas adia o problema.

Uma máquina a tentar passar o teste de Turing reivindicará, naturalmente, possuir autoconsciência. Os biocaninos ferrenhos (ou biochauvinistas, como alguns os chamam) responderão apenas que está a mentir ou está confusa. Enquanto se recusarem a definir

claramente o que entendem por consciência, não poderão jamais ser refutados. No entanto, independentemente de a chamarmos consciente ou não, uma máquina inteligente continuará a agir de forma inteligente — e são essas ações que terão impacto sobre nós. Talvez, um dia, venham a envergonhar os biochauvinistas até ao silêncio, não com armas, mas com argumentos apaixonados e uma brilhante campanha de relações públicas.

Nenhuma máquina consegue atualmente passar o teste de Turing, e é pouco provável que alguma o consiga num futuro próximo. Por isso, parece sensato perguntar se há sequer uma boa razão para tentar: talvez possamos obter mais frutos da investigação em Inteligência Artificial (IA) se esta for orientada por outros objetivos.

Façamos uma distinção entre dois tipos de inteligência artificial — embora um sistema possa eventualmente exibir ambos¹⁰. O primeiro tipo é a IA técnica, concebida para interagir com o mundo físico. Os esforços neste domínio conduzem ao desenvolvimento da engenharia automatizada e da investigação científica assistida por máquinas. O segundo tipo é a IA social, orientada para interagir com mentes humanas. Os esforços aqui visam criar máquinas capazes de passar o teste de Turing.

Os investigadores que trabalham em sistemas de IA social¹¹ acabarão inevitavelmente por aprender muito sobre a mente humana, e os seus sistemas terão, sem dúvida, grande valor prático, uma vez que todos podemos beneficiar de assistência e aconselhamento inteligente. Contudo, a engenharia automatizada

baseada em IA técnica terá provavelmente um impacto mais profundo na corrida tecnológica — incluindo a corrida rumo à nanotecnologia molecular. E é possível que um sistema avançado de engenharia automatizada seja mais fácil de desenvolver do que uma máquina capaz de passar o teste de Turing, pois esta não só deve possuir conhecimento e inteligência, como também deve imitar o conhecimento e a inteligência humana — o que constitui um desafio específico e mais exigente.

Como Turing questionou:

Não poderão as máquinas realizar algo que mereça ser descrito como pensar, ainda que seja muito diferente daquilo que um ser humano faz?¹²

Embora alguns escritores e políticos se recusem a reconhecer a inteligência das máquinas até que se deparem com uma máquina conversadora capaz de passar o teste de Turing, muitos engenheiros reconhecerão a inteligência sob outras formas.

3. Motores do Projeto (Design)

Estamos bem encaminhados rumo à engenharia automatizada. Os engenheiros do conhecimento têm comercializado sistemas periciais (ou sistemas especialistas) que auxiliam as pessoas a lidar com problemas práticos. Os programadores desenvolveram sistemas de desenho assistido por computador que incorporam conhecimento sobre formas e movimento, tensões e deformações,

circuitos eletrônicos, fluxo de calor, e sobre a forma como as ferramentas moldam o metal. Os projetistas usam estes sistemas para ampliar os seus modelos mentais, acelerando a evolução de projetos ainda por construir. Juntos, projetistas e computadores formam sistemas inteligentes, semiartificiais.

Os engenheiros dispõem de uma vasta gama de sistemas computacionais para auxiliar o seu trabalho. Num dos extremos do espectro, utilizam os ecrãs de computador apenas como pranchetas digitais. Um pouco mais adiante, usam sistemas capazes de descrever peças em três dimensões e de calcular as suas respostas ao calor, à tensão, à corrente elétrica, e assim por diante. Alguns desses sistemas conhecem também o funcionamento de equipamentos de fabrico controlados por computador, permitindo aos engenheiros efetuar testes simulados de instruções que mais tarde irão comandar as máquinas reais que fabricam as peças. Mas o extremo mais avançado deste espectro envolve o uso de computadores não apenas para registar e testar projetos, mas para os gerar autonomamente.

Os programadores desenvolveram as suas ferramentas mais impressionantes para uso na própria indústria informática. O software de conceção de chips (circuitos integrados) é um exemplo. Atualmente, os chips contêm muitos milhares de transístores e fios condutores. Antes, os projetistas precisavam de vários meses para desenvolver um circuito com determinada função e para distribuir meticulosamente as suas muitas partes pela superfície do chip. Hoje, frequentemente podem delegar essa tarefa a um chamado compilador de silício. Fornecida uma especificação funcional do chip,

estes sistemas de software podem produzir um projeto detalhado — pronto a ser fabricado — com pouca ou nenhuma intervenção humana.

Todos estes sistemas dependem inteiramente do conhecimento humano, recolhido e codificado com esforço. Os sistemas de projeto automatizado mais flexíveis da atualidade podem ajustar um projeto proposto à procura de melhorias, mas não aprendem nada que possa ser aplicado ao próximo projeto. Mas o EURISKO é diferente. Desenvolvido pelo Professor Douglas Lenat¹³ e colaboradores na Universidade de Stanford, o EURISKO foi concebido para explorar novos domínios de conhecimento. É guiado por heurísticas — fragmentos de conhecimento que sugerem ações plausíveis a seguir ou ações implausíveis a evitar; na prática, várias “regras de ouro” (ou regras práticas). Usa heurísticas para sugerir temas de trabalho, outras heurísticas para propor abordagens, e ainda outras para avaliar os resultados. Há heurísticas que procuram padrões nos resultados, propõem novas heurísticas e avaliam o valor tanto das novas como das antigas. Deste modo, o EURISKO evolui comportamentos mais eficazes, modelos internos mais sofisticados, e regras mais apuradas para escolher entre esses modelos. O próprio Lenat descreve esta variação e seleção de heurísticas e conceitos em termos de “mutação” e “seleção”, sugerindo uma metáfora cultural e social para compreender a sua interação interna.

Uma vez que as heurísticas evoluem e competem no EURISKO, faz sentido esperar o aparecimento de parasitas — o que, de facto, aconteceu em abundância. Uma heurística gerada pela própria

máquina, por exemplo, atingiu a mais alta classificação de valor ao alegar ter sido codescobridora de todas as novas conjecturas valiosas. O Professor Lenat tem trabalhado de perto com o EURISKO, melhorando o seu sistema imunitário mental, fornecendo-lhe heurísticas destinadas a eliminar parasitas e a evitar linhas de raciocínio absurdas.

O EURISKO foi utilizado para explorar áreas como a matemática elementar, programação, evolução biológica, jogos, projeto de circuitos integrados tridimensionais, limpeza de derrames de petróleo, canalização e, naturalmente, o próprio domínio das heurísticas. Em alguns desses campos, surpreendeu os seus criadores com ideias inovadoras, incluindo novos dispositivos eletrónicos para a emergente tecnologia de circuitos integrados tridimensionais.

Os resultados de um torneio ilustram o poder de uma equipa composta por humano e IA. Traveller TCS¹⁴ é um jogo futurista de guerra naval, jogado segundo duzentas páginas de regras que especificam restrições de projeto, custo e desempenho para a frota ("TCS" significa Trillion Credit Squadron). O Professor Lenat forneceu ao EURISKO essas regras, um conjunto de heurísticas iniciais e um programa capaz de simular uma batalha entre duas frotas. Ele relata que "o sistema passou então a conceber frota após frota, usando o simulador como mecanismo de seleção natural, à medida que evoluía projetos cada vez mais eficazes." O programa corria durante toda a noite, a desenhar, testar e extrair lições dos resultados. Pela manhã, Lenat seleccionava os projetos mais

promissores e ajudava o sistema a avançar. Ele atribui cerca de 60% dos resultados a si próprio e 40% ao EURISKO.

Lenat e o EURISKO participaram no torneio nacional Traveller TCS de 1981 com uma frota de aspeto estranho. Os restantes concorrentes riram-se... e depois perderam. A frota Lenat/EURISKO venceu todas as rondas, sagrando-se campeã nacional. Como Lenat observa: “Esta vitória torna-se ainda mais significativa pelo facto de que ninguém ligado ao programa alguma vez tinha jogado este jogo antes do torneio, nem sequer o tinha visto ser jogado, e não houve rondas de treino.”

Em 1982, os organizadores do torneio alteraram as regras. Lenat e o EURISKO voltaram a participar, desta vez com uma frota muito diferente. Os restantes concorrentes voltaram a rir-se... e voltaram a perder. Lenat e o EURISKO tornaram-se campeões nacionais pela segunda vez.

Em 1983, os organizadores avisaram Lenat de que, se voltasse a participar e vencesse de novo, o torneio seria cancelado. Lenat retirou-se.

O EURISKO e outros programas de Inteligência Artificial demonstram que os computadores não precisam de se limitar a tarefas aborrecidas e repetitivas — desde que lhes seja fornecida a programação adequada. Eles são capazes de explorar possibilidades e descobrir ideias novas que surpreendem os seus próprios criadores. O EURISKO tem limitações¹⁵, mas aponta para um novo

estilo de parceria, no qual um sistema de IA e um especialista humano contribuem, ambos, com conhecimento e criatividade para um processo de concepção.

Nos próximos anos, sistemas semelhantes transformarão a engenharia. Os engenheiros trabalharão em parceria criativa com as suas máquinas, utilizando software derivado dos atuais sistemas de concepção assistida por computador (CAD) para realizar simulações, e recorrendo a sistemas evolutivos semelhantes ao EURISKO para sugerir projetos a simular. O engenheiro sentar-se-á diante de um ecrã para introduzir os objetivos do processo de concepção e desenhar esboços das propostas. O sistema responderá refinando os projetos, testando-os e apresentando alternativas, acompanhadas de explicações, gráficos e diagramas. O engenheiro, então, fará novas sugestões ou alterações, ou formulará uma nova tarefa — até que um sistema completo de hardware esteja projetado e simulado.

À medida que estes sistemas de engenharia automatizada forem melhorando, realizarão cada vez mais trabalho, cada vez mais depressa. Com o tempo, o engenheiro limitar-se-á a propor objetivos e a selecionar entre boas soluções apresentadas pela máquina. Cada vez menos terá de escolher peças, materiais e configurações. Gradualmente, os engenheiros poderão propor objetivos mais gerais e esperar que soluções adequadas surjam de forma quase natural. Tal como o EURISKO passou horas a evoluir frotas através do simulador Traveller TCS, os sistemas de engenharia automatizada evoluirão, no futuro, aviões de

passageiros com máxima segurança e eficiência — ou então aviões e mísseis militares com a melhor capacidade de dominar os céus.

Tal como o EURISKO já inventou dispositivos eletrônicos, os futuros sistemas de engenharia automatizada inventarão máquinas moleculares e dispositivos eletrônicos moleculares, assistidos por software de simulação molecular. Estes avanços na engenharia automatizada amplificarão o fenómeno de antecipação de projetos descrito anteriormente. Assim, a engenharia automatizada não apenas acelerará o avanço do montador molecular (assembler), como também aumentará o salto tecnológico que se seguirá.

Eventualmente, sistemas de software serão capazes de criar projetos arrojados sem qualquer ajuda humana. A maioria das pessoas chamará a esses sistemas inteligentes? Isso pouco importa.

4. A Corrida da Inteligência Artificial

Empresas e governos de todo o mundo apoiam o desenvolvimento da Inteligência Artificial (IA), porque esta promete vantagens comerciais e militares. Os Estados Unidos contam com numerosos laboratórios universitários dedicados à IA, bem como uma série de novas empresas com nomes como Machine Intelligence Corporation, Thinking Machines Corporation, Teknowledge e Cognitive Systems Incorporated. Em outubro de 1981¹⁶, o Ministério do Comércio e Indústria do Japão anunciou um programa de dez anos, no valor de 850 milhões de dólares, para

desenvolver hardware e software de IA avançados. Com este investimento, os investigadores japoneses pretendem desenvolver sistemas capazes de realizar mil milhões de inferências lógicas por segundo. No outono de 1984¹⁷, a Academia de Ciências de Moscovo anunciou um esforço semelhante, com duração de cinco anos e um orçamento de 100 milhões de dólares. Já em outubro de 1983, o Departamento de Defesa dos EUA lançou o Strategic Computing Program, um programa de cinco anos com um financiamento de 600 milhões de dólares, cujo objetivo é desenvolver máquinas capazes de ver, raciocinar, compreender a fala e auxiliar na gestão de combates. Como relata Paul Wallich na IEEE Spectrum¹⁸, “a Inteligência Artificial é considerada por muitos como uma das pedras angulares da próxima geração da tecnologia informática; todos os esforços internacionais conferem-lhe um lugar de destaque nas suas listas de prioridades.”

A IA avançada surgirá passo a passo, e cada passo trará consigo novos conhecimentos e capacidades acrescidas. Tal como acontece com a tecnologia molecular (e com muitas outras tecnologias), tentativas de travar os avanços numa determinada cidade, região ou país resultarão, no máximo, em deixar que outros assumam a dianteira. Mesmo um sucesso milagroso em suspender toda a investigação de IA visível à escala global apenas serviria para adiá-la — permitindo que, com o tempo, e à medida que os computadores se tornam mais baratos, o seu amadurecimento ocorra em segredo, longe do escrutínio público. Só um Estado mundial com um poder e estabilidade imensos poderia travar verdadeiramente a investigação em IA em todo o lado e para sempre — uma “solução” de perigos horrendos, tendo em conta os

abusos que já ocorreram mesmo sob poderes meramente nacionais. A IA avançada parece, pois, inevitável. E, se quisermos desenvolver uma visão realista do futuro, não podemos ignorá-la.

Num certo sentido, a Inteligência Artificial será a ferramenta suprema, pois ajudará a construir todas as demais ferramentas possíveis. Sistemas de IA avançada poderiam afastar os seres humanos do palco da existência, ou poderiam ajudar-nos a construir um mundo novo e melhor. Agressores poderiam usá-los para fins de conquista, ou defensores clarividentes poderiam empregá-los para estabilizar a paz. Poderiam até ajudar-nos a controlar a própria IA. A mão que embala o berço da IA poderá muito bem vir a governar o mundo.

Tal como no caso dos montadores moleculares (assemblers), será necessária visão de futuro e uma estratégia cuidadosa para utilizar esta nova tecnologia de forma segura e sensata. As questões envolvidas são complexas e estão entrelaçadas com tudo — desde os detalhes da tecnologia molecular, ao emprego e à economia, até à própria base filosófica dos direitos humanos. No entanto, as questões mais fundamentais dizem respeito ao que a IA pode realmente fazer.

5. Seremos Suficientemente Inteligentes?

Apesar do exemplo da evolução dos seres humanos, os críticos podem ainda argumentar que a nossa inteligência limitada pode, de algum modo, impedir-nos de programar máquinas genuinamente

inteligentes. Este argumento parece frágil — equivale, no fundo, a dizer que, como o crítico não consegue imaginar como se poderia ter sucesso, então ninguém mais será capaz de o fazer. Ainda assim, poucos negarão que programar computadores para igualarem as capacidades humanas exigirá, de facto, novas compreensões da psicologia humana¹⁹. Embora o caminho da programação rumo à IA pareça aberto, o nosso conhecimento não justifica ainda a confiança sólida que engenheiros prudentes tinham (décadas antes do Sputnik) na possibilidade de alcançar a Lua com foguetes — ou a que temos hoje na possibilidade de construir montadores (assemblers) através do projeto de proteínas. Programar uma Inteligência Artificial genuína, embora constitua uma forma de engenharia, exigirá nova ciência. E isso coloca a questão para além de qualquer previsão segura.

Contudo, precisamos de uma previsão precisa. As pessoas que se agarram a dúvidas reconfortantes acerca da IA parecem estar condenadas a sofrer de imagens radicalmente erradas do futuro. Felizmente, a engenharia automatizada escapa a parte do peso do preconceito biochauvinista. A maioria das pessoas sente-se menos perturbada com a ideia de máquinas a projetar outras máquinas do que com a ideia de sistemas de IA verdadeiramente generalistas. Para além disso, a engenharia automatizada já provou funcionar — o que resta é apenas expandi-la. Ainda assim, se sistemas mais gerais têm grande probabilidade de surgir, seria insensato deixá-los fora dos nossos cálculos. Haverá alguma forma de contornar a questão da nossa capacidade de projetar programas inteligentes?

Nos anos 50, muitos investigadores em IA concentraram-se em simular funções cerebrais através da simulação de neurónios. No entanto, os investigadores que desenvolveram programas baseados em palavras e símbolos progrediram mais rapidamente, e o foco da investigação em IA mudou, em consequência disso. Ainda assim, a ideia básica da simulação neuronal mantém-se válida, e a tecnologia molecular torná-la-á mais prática. Mais do que isso: esta abordagem parece garantir resultados, pois não requer compreensões fundamentais novas sobre a natureza do pensamento.

Eventualmente, os neurobiólogos utilizarão máquinas moleculares de tamanho viral²⁰ para estudar a estrutura e a função do cérebro, célula a célula e molécula a molécula, sempre que necessário. Embora os investigadores em IA possam vir a extrair revelações úteis sobre a organização do pensamento com os avanços resultantes na ciência do cérebro, a simulação neuronal pode ter êxito mesmo sem tais compreensões. Os compiladores traduzem programas de computador de uma linguagem para outra sem compreenderem como estes funcionam. As fotocopiadoras transferem padrões de palavras sem os lerem. Do mesmo modo, os investigadores poderão copiar os padrões neuronais do cérebro para outro meio, sem necessidade de compreenderem a sua organização a um nível superior.

Depois de compreenderem como funcionam os neurónios, os engenheiros poderão desenhar e construir dispositivos análogos baseados em nanoeletrónica e nanomáquinas avançadas²¹. Estes interagirão como os neurónios, mas funcionarão de forma mais

rápida. Embora complexos, os neurónios parecem suficientemente simples para que uma mente os compreenda e um engenheiro os possa imitar. De facto, os neurobiólogos já aprenderam muito sobre a sua estrutura e função, mesmo sem o auxílio de maquinaria à escala molecular para explorar os seus mecanismos internos.

Com este conhecimento, os engenheiros poderão construir sistemas de IA rápidos e competentes, mesmo sem compreenderem o cérebro e sem necessitarem de programação sofisticada. Terão apenas de estudar a estrutura neuronal do cérebro e ligar neurónios artificiais de modo a formar o mesmo padrão funcional. Se conseguirem construir corretamente todas as partes — incluindo a forma como estas se articulam para formar o todo —, então também o todo funcionará corretamente. A atividade “neuronal” fluirá segundo os padrões que chamamos pensamento, mas a um ritmo mais rápido, porque todas as partes operarão mais depressa.

6. Acelerando a Corrida Tecnológica

Sistemas avançados de inteligência artificial parecem não só possíveis como inevitáveis — mas que efeitos terão? Ninguém pode responder a isto de forma exaustiva, mas um dos efeitos da engenharia automatizada é evidente: acelerará o nosso avanço rumo aos limites do possível.

Para compreendermos o que nos espera, precisamos de ter uma ideia de quão rapidamente poderão pensar esses sistemas

avancados de IA. Os computadores atuais possuem apenas uma fração diminuta da complexidade do cérebro, e ainda assim já conseguem executar programas que imitam aspetos significativos do comportamento humano. Contudo, diferem totalmente do cérebro no seu estilo fundamental de operação, o que torna quase inútil qualquer comparação física direta. O cérebro realiza uma enorme quantidade de processos em simultâneo, mas de forma relativamente lenta; a maioria dos computadores modernos realiza apenas uma tarefa de cada vez, mas a uma velocidade estonteante.

Ainda assim, é possível imaginar hardware de IA concebido para imitar o cérebro não só em função, mas também em estrutura. Isto poderá resultar de uma abordagem baseada na simulação neural ou da evolução de programas de IA concebidos para correrem em hardware com uma organização semelhante à do cérebro. De uma forma ou de outra, podemos usar analogias com o cérebro humano para estimar uma velocidade mínima dos sistemas de IA construídos com montadores (assemblers) avançados.

As sinapses neuronais respondem a sinais em milésimos de segundo; os interruptores eletrónicos experimentais²² respondem cem milhões de vezes mais depressa (e os interruptores nanoeletrónicos serão ainda mais rápidos). Os sinais neuronais viajam a menos de cem metros por segundo; os sinais eletrónicos viajam um milhão de vezes mais depressa. Esta comparação grosseira de velocidades sugere que dispositivos eletrónicos com estrutura cerebral poderão funcionar cerca de um milhão de vezes mais depressa do que cérebros constituídos por neurónios — à velocidade limitada apenas pelos sinais eletrónicos.

Naturalmente, esta estimativa é tosca. Uma sinapse neural é mais complexa do que um simples interruptor; pode alterar a sua resposta aos sinais através da modificação da sua estrutura. Com o tempo, sinapses podem formar-se e desaparecer. Estas mudanças nas fibras e nas conexões do cérebro são a expressão física das alterações mentais de longo prazo que designamos como aprendizagem. Foi este fenómeno que levou o Professor Robert Jastrow²³, de Dartmouth, a descrever o cérebro como um tear encantado, que tece e retece os seus padrões neurais ao longo de toda a vida.

Para imaginar um dispositivo semelhante ao cérebro, mas com flexibilidade comparável, visualize os seus circuitos eletrónicos rodeados por nanocomputadores mecânicos e montadores (assemblers), com um por cada "interruptor" equivalente a uma sinapse. Assim como a maquinaria molecular de uma sinapse responde aos padrões de atividade neural modificando a estrutura da própria sinapse, também os nanocomputadores irão responder a padrões de atividade, dirigindo a nanomáquina para modificar a estrutura do interruptor. Com a programação adequada, e com comunicação entre os nanocomputadores que simule sinais químicos, tal dispositivo deverá comportar-se quase exatamente como um cérebro.

Apesar da sua complexidade, o dispositivo será compacto. Os nanocomputadores serão menores que as sinapses, e os fios construídos por montadores serão mais finos do que os axónios e dendrites do cérebro. Fios finos e interruptores pequenos permitirão circuitos compactos, e circuitos compactos acelerarão o fluxo dos

padrões eletrônicos, ao encurtar as distâncias que os sinais terão de percorrer. Parece que uma estrutura similar ao cérebro caberá em menos de um centímetro cúbico.²⁴ Percursos mais curtos dos sinais, combinados com uma transmissão mais rápida, resultam num dispositivo mais de dez milhões de vezes mais rápido que um cérebro humano.

Só problemas de arrefecimento poderão limitar estas máquinas a velocidades médias mais baixas. Imagine um projeto conservador, um milhão de vezes mais rápido que um cérebro, dissipando um milhão de vezes mais calor²⁵. O sistema consiste num bloco construído por montadores, feito de safira do tamanho de uma chávena de café, permeado por canais de arrefecimento revestidos de circuitos. Um tubo de água de alta pressão, com diâmetro igual, está fixado no topo²⁶, forçando a água fria a circular pelos canais até um tubo de drenagem semelhante na base.

Cabos robustos de energia e feixes de canais de dados por fibra óptica saem das laterais. Os cabos fornecem quinze megawatts de energia elétrica. O tubo de drenagem transporta o calor resultante numa corrente de três toneladas por minuto de água fervente. Os feixes de fibra óptica transmitem tanta informação quanto um milhão de canais de televisão. Eles asseguram a comunicação com outros sistemas de IA, com simuladores de engenharia e com sistemas de montagem que constroem os projetos para testes finais. A cada dez segundos, o sistema consome quase dois quilowatt-dias de energia elétrica (equivalente hoje a cerca de um dólar). A cada dez segundos, o sistema completa tanto trabalho de projeto quanto um engenheiro humano que trabalhe oito horas

diárias durante um ano (no valor de dezenas de milhares de dólares). Em apenas uma hora, executa o trabalho de vários séculos. Apesar de toda essa atividade, o sistema funciona num silêncio interrompido apenas pelo murmúrio da água de arrefecimento.

Isto responde à questão da pura velocidade do pensamento, mas e quanto à sua complexidade? O desenvolvimento da Inteligência Artificial dificilmente ficará estagnado na complexidade de uma única mente humana. Como ressalta John McCarthy²⁷, do laboratório de IA de Stanford, se conseguimos colocar o equivalente a uma mente humana dentro de um crânio metálico, podemos igualmente alojar o equivalente a dez mil mentes cooperantes num edifício. (E uma grande central elétrica moderna poderia fornecer energia suficiente para que cada uma delas pensasse pelo menos dez mil vezes mais rápido que uma pessoa.) À ideia de inteligências de engenharia rápidas, soma-se a ideia de equipas de engenharia rápidas.

Os sistemas de IA de engenharia serão retardados nas suas tarefas pela necessidade de realizar experimentos, mas não tanto quanto se poderia esperar. Hoje, engenheiros devem realizar muitos testes porque a tecnologia convencional é indomável. Quem pode prever exatamente como um novo tipo de liga metálica se comportará ao ser forjada e dobrada dez milhões de vezes? Pequenas fissuras fragilizam o metal, mas detalhes do processamento determinam a sua natureza e efeitos.

Contudo, uma vez que os montadores (assemblers) fabricarão objetos com especificações rigorosas, as imprevisibilidades da tecnologia convencional serão evitadas. Os projetistas (humanos ou IA) apenas realizarão experiências quando esta for mais rápida ou econômica do que o cálculo, ou — em casos mais raros — quando faltarem conhecimentos fundamentais.

Sistemas de IA com acesso a nanomáquinas realizarão numerosos experimentos rapidamente. Projetarão dispositivos em segundos, e os montadores replicantes construirão sem os atrasos habituais (encomenda de peças especiais, transporte, etc.) que dificultam os projetos atuais. Equipamentos experimentais na escala de um montador, nanocomputador ou célula viva levarão apenas minutos a ser construídos, e nanomanipuladores executarão um milhão de movimentos por segundo. Executar um milhão de experimentos comuns simultaneamente será fácil. Assim, apesar dos atrasos inevitáveis dos testes, os sistemas automáticos de engenharia farão a tecnologia avançar com uma velocidade impressionante.

Do passado ao futuro, o padrão provável de evolução da capacidade parece ser este: ao longo de eões, a vida progrediu num avanço longo e lento, marcado pela evolução genética. Mentes com linguagem aceleraram esse ritmo, impulsionadas pela flexibilidade dos memes. A invenção dos métodos da ciência e da tecnologia acelerou ainda mais esse progresso, forçando a evolução mais rápida dos memes. O aumento da riqueza, da educação e da população — bem como a melhoria das ferramentas físicas e

intelectuais — continuou essa tendência acelerada ao longo do nosso século.

A automação da engenharia acelerará ainda mais o ritmo. O desenho assistido por computador (CAD) vai melhorar, ajudando engenheiros humanos a gerar e testar ideias com maior rapidez. Sucessores do EURISKO reduzirão o tempo de desenvolvimento ao sugerir projetos e completar os detalhes das inovações humanas. Num dado momento, sistemas de engenharia totalmente automatizados ultrapassarão os humanos por si próprios.

Paralelamente, a tecnologia molecular se desenvolverá e amadurecerá, impulsionada pelos avanços da engenharia automatizada. Assim, sistemas de IA construídos por montadores (assemblers) trarão uma engenharia ainda mais rápida, evoluindo ideias tecnológicas num ritmo ditado por sistemas um milhão de vezes mais velozes que o cérebro humano. A velocidade do progresso tecnológico então saltará de forma vertiginosa: num espaço breve, muitas áreas da tecnologia avançarão até aos limites impostos pelas leis naturais. Nesses campos, o avanço cessará, repousando num elevado platô de realização.

Esta transformação é um cenário vertiginoso. Para além dela, se sobrevivermos, haverá um mundo onde montadores replicantes poderão fabricar qualquer coisa que lhes seja ordenada, sem necessidade de trabalho humano. Ainda para além, se sobrevivermos, existirão sistemas de engenharia automatizados capazes de orientar montadores para fabricar dispositivos próximos dos limites do possível, perto da perfeição técnica final.

Eventualmente, alguns sistemas de IA terão tanto grande capacidade técnica quanto a habilidade social necessária para compreender a fala e os desejos humanos. Colocados à frente do controlo da energia, dos materiais e dos montadores, tais sistemas poderiam ser chamados apropriadamente de “máquinas génio”. Tal como sugerem as lendas árabes e o senso comum universal, devemos levar a sério os perigos de tais motores de criação.

Rompimentos decisivos na IA técnica e social ainda levarão anos a acontecer. Como Marvin Minsky disse, “As máquinas modestamente inteligentes do futuro próximo prometem apenas trazer a riqueza e o conforto de servos incansáveis, obedientes e baratos.”²⁸ A maioria dos sistemas hoje chamados “IA” não pensa nem aprende; são apenas um produto grosseiro das habilidades de especialistas, preservadas, embaladas e distribuídas para consulta.

Mas a verdadeira IA vai chegar. Ignorá-la é viver num mundo de fantasia. Esperar pela IA não é ser otimista nem pessimista: como sempre, o otimismo dos pesquisadores é o pessimismo dos tecnofóbicos. Se não nos prepararmos para a sua chegada, sistemas de IA social poderão representar uma ameaça grave — pense nos danos causados pela mera inteligência humana de terroristas e demagogos. De modo semelhante, sistemas de IA técnica podem desestabilizar o equilíbrio militar mundial, dando a um lado uma vantagem súbita e massiva. Com a preparação adequada, porém, a inteligência artificial poderá ajudar a construir um futuro que funcione — para a Terra, para as pessoas e para o avanço da inteligência no universo. O capítulo 12 sugerirá uma

abordagem para este desafio, como parte da questão mais ampla de gerir a transformação que os montadores e a IA trarão.

Por que discutir os perigos já hoje? Porque não é cedo demais para começar a desenvolver instituições capazes de lidar com estas questões. A IA técnica está a emergir neste momento, e cada avanço acelerará a corrida tecnológica. A inteligência artificial é apenas uma das muitas tecnologias poderosas que devemos aprender a gerir, cada uma delas acrescentando uma complexa mistura de ameaças e oportunidades.

CAPÍTULO 6

O Mundo Para Lá da Terra

Aquela taça invertida a que chamamos Céu; onde rastejando, presos, vivemos e morremos.

— The Rubáiyát of Omar Khayyam

A TERRA é apenas uma pequena parte do mundo, e o resto do mundo será importante para o nosso futuro. Em termos de energia, materiais e espaço para crescimento, o espaço é praticamente tudo. No passado, os sucessos no espaço corresponderam regularmente às previsões da engenharia. No futuro, uma fronteira espacial aberta ampliará o mundo humano. Os avanços na inteligência artificial e na nanotecnologia desempenharão um papel crucial.

As pessoas levaram séculos a reconhecer o espaço como uma fronteira. Os nossos antepassados viam o céu noturno como uma cúpula negra salpicada de pequenas faíscas — um espetáculo de luzes divino. Não podiam imaginar viagens espaciais, porque nem sequer sabiam que o espaço exterior existia.

Hoje sabemos que o espaço existe, mas poucas pessoas compreendem ainda o seu valor. Isso não é surpreendente. As nossas mentes e culturas evoluíram neste planeta, e apenas começámos a assimilar a ideia de uma fronteira para além do céu.

Só neste século é que visionários como Hermann Oberth e Robert Goddard demonstraram que os foguetes podiam atingir o espaço. Tinham confiança nisso porque sabiam o suficiente sobre combustível, motores, depósitos e estruturas para calcular o que os foguetões de múltiplos estágios podiam alcançar. No entanto, em 1921, um editorialista do *New York Times* ridicularizou Goddard pela ideia de que foguetes poderiam voar no espaço sem ar para se impulsionarem, e ainda em 1956 o Astrónomo Real da Grã-Bretanha declarou com desdém que “as viagens espaciais são um perfeito disparate.” Isso só mostrava que editorialistas e astrónomos eram os peritos errados para se consultar sobre tecnologia espacial. Em 1957, o Sputnik orbitou a Terra, seguido em 1961 por Yuri Gagarin. Em 1969, o mundo viu pegadas na Lua.

Pagámos, no entanto, um preço pela ignorância. Como os pioneiros da tecnologia espacial não tinham forma de expor os seus argumentos publicamente, foram obrigados a argumentar pontos básicos vezes sem conta (“Sim, os foguetões funcionarão no vácuo... Sim, eles vão mesmo alcançar a órbita...”). Ocupados a defender os fundamentos do voo espacial, tiveram pouco tempo para discutir as suas consequências. Assim, quando o Sputnik surpreendeu o mundo e embaraçou os Estados Unidos, as pessoas estavam desprevenidas: não tinha havido um debate público alargado para moldar uma estratégia para o espaço.

Alguns dos pioneiros tinham uma visão clara do que fazer: construir uma estação espacial e uma nave reutilizável, depois avançar até à Lua ou aos asteroides para obter recursos. Mas o ruído dos políticos atordoados abafou rapidamente essas sugestões,

e os políticos norte-americanos clamaram por um objetivo grandioso e fácil de compreender. Assim nasceu o Projeto Apollo — a corrida para fazer aterrar um cidadão norte-americano no local mais próximo onde pudesse fincar uma bandeira. O Projeto Apollo passou ao lado da construção de uma estação espacial e de um vaivém espacial, optando em vez disso por construir mísseis gigantes capazes de atingir a Lua num único salto. O projeto foi glorioso, deu aos cientistas alguma informação, e trouxe grandes retornos através de avanços tecnológicos — mas, no essencial, foi uma manobra vazia. Os contribuintes perceberam isso, os congressistas perceberam isso, e o programa espacial definhou.

Durante o Projeto Apollo, antigos sonhos dominaram o imaginário público — sonhos simples e românticos de colonizar outros planetas. Depois, os instrumentos robóticos desfizeram o sonho de uma Vénus coberta de selvas, revelando a realidade de um forno planetário, de alta pressão e venenoso. Apagaram as linhas que os astrónomos terrestres haviam desenhado em Marte, levando com elas tanto os canais como os marcianos. No seu lugar surgiu um Marte de crateras, desfiladeiros e poeira seca soprada pelo vento. Mais próximo do Sol do que Vénus, encontrava-se a rocha abrasada de Mercúrio; para lá de Marte, em direção às estrelas, estendia-se um domínio de escombros e gelo. Os planetas variavam entre mortos e mortíferos, e o sonho de novas Terras recuou até às estrelas distantes. O espaço parecia um beco sem saída.

1. O Novo Programa Espacial

Um novo programa espacial ergueu-se das ruínas do antigo. Uma nova geração de defensores, engenheiros e empreendedores do espaço visa agora fazer do espaço a fronteira que sempre deveria ter sido — um lugar de desenvolvimento e utilização, e não de gestos políticos vazios. Confiam no sucesso porque o desenvolvimento espacial não exige descobertas revolucionárias em ciência ou tecnologia. De facto, a espécie humana poderia conquistar o espaço utilizando apenas as tecnologias de há vinte anos — e, evitando voos meramente simbólicos, poderíamos provavelmente fazê-lo com lucro. As atividades espaciais não têm de ser dispendiosas.

Considere-se o elevado custo de atingir a órbita atualmente — milhares de dólares por quilograma. De onde provém esse custo? Para um espectador num lançamento de vaivém espacial, abalado pelo estrondo e maravilhado pelas chamas, a resposta parece óbvia: o combustível deve custar uma fortuna. Até as companhias aéreas gastam cerca de metade dos seus custos operacionais diretos em combustível. Um foguetão assemelha-se a um avião comercial — é feito de alumínio e recheado de motores, sistemas de controlo e eletrónica —, mas o combustível constitui quase toda a sua massa quando está na plataforma de lançamento. Assim, poder-se-ia esperar que o combustível representasse mais de metade do custo operacional de um foguetão. Mas essa expectativa está errada. Nas missões à Lua, o custo do combustível necessário para alcançar a órbita foi inferior a um milhão de dólares — apenas alguns dólares por quilograma entregue em órbita, uma fração de

um por cento do custo total. Mesmo hoje, o combustível continua a ser uma parte insignificante do custo dos voos espaciais.

Então, por que razão o voo espacial é tão mais caro do que o voo aéreo? Em parte, porque as naves espaciais não são produzidas em série; isso obriga os fabricantes a recuperar os custos de conceção com a venda de apenas algumas unidades, construídas quase artesanalmente, a um custo elevadíssimo. Além disso, a maioria das naves espaciais é descartada após um único uso, e mesmo os vaivéns são lançados apenas algumas vezes por ano — o seu custo não pode ser distribuído por vários voos diários durante anos, como acontece com os aviões comerciais. Por fim, os custos dos centros espaciais são atualmente repartidos por apenas alguns lançamentos por mês, enquanto os grandes aeroportos diluem os seus custos por muitos milhares. Tudo isto conspira para tornar cada voo espacial assustadoramente caro.

Contudo, estudos realizados pela Boeing Aerospace Company — a empresa que tornou o transporte aéreo a jato acessível a grande parte do mundo — mostram que uma frota de vaivéns totalmente reutilizáveis, operados e mantidos como aviões comerciais, poderia reduzir o custo de acesso à órbita em mais de cinquenta vezes. A chave não está em nova tecnologia, mas nas economias de escala e numa mudança no estilo de gestão.

O espaço oferece vastas oportunidades industriais. São bem conhecidas as vantagens de posicionar satélites de observação e comunicação em órbita. Os futuros satélites de comunicação serão suficientemente potentes para se ligarem a dispositivos portáteis

na Terra, oferecendo o auge do serviço telefónico móvel. Empresas já se preparam para tirar partido da ausência de gravidade a fim de realizar processos delicados de separação e fabricar fármacos melhorados; outras planeiam cultivar cristais eletrónicos de maior qualidade. Nos anos anteriores ao domínio das fábricas moleculares (assemblers), os engenheiros utilizarão o ambiente espacial para expandir as capacidades da tecnologia de materiais em grande escala. A indústria espacial proporcionará um mercado crescente para os serviços de lançamento, reduzindo os custos de acesso ao espaço. Por sua vez, a queda dos custos estimulará ainda mais o crescimento da indústria espacial. O transporte de foguetes para a órbita terrestre tornar-se-á, eventualmente, económico.

Os planeadores e empreendedores espaciais já estão a olhar para além da órbita terrestre, para os recursos do sistema solar. No espaço profundo, porém, os foguetes rapidamente se tornam demasiado caros para o transporte de carga — consomem combustível que também teve de ser transportado para o espaço por outros foguetes. Os foguetes que queimam combustível são tão antigos como os fogos-de-artifício chineses, muito mais antigos do que "*The Star-Spangled Banner*". Evoluíram por razões naturais: compactos, potentes e úteis do ponto de vista militar, são capazes de perfurar a atmosfera e vencer a gravidade. Contudo, os engenheiros espaciais conhecem alternativas¹.

Os veículos não necessitam de grandes explosões de potência para se moverem no vácuo sem atrito do espaço. Forças pequenas podem empurrar lentamente um veículo até atingir velocidades enormes. Como a energia tem massa, a luz solar que incide sobre

um espelho fino — uma vela solar — proporciona tal força. A atração gravitacional do Sol constitui outra. Juntas, a pressão da luz e a gravidade podem transportar uma nave por todo o sistema solar e trazê-la de volta. Apenas o calor nas proximidades do Sol e o atrito das atmosferas planetárias limitarão a viagem, forçando as velas a manterem-se afastadas desses obstáculos.

A NASA já estudou velas solares concebidas para serem transportadas por foguetões até ao espaço, mas estas devem ser suficientemente pesadas e resistentes para sobreviver ao stress do lançamento e da abertura. Eventualmente, os engenheiros construirão as velas diretamente no espaço, utilizando estruturas de tração de baixa massa para suportar espelhos feitos de película metálica fina. O resultado será a "vela de luz"², uma classe de vela solar de desempenho superior. Após um ano de aceleração contínua, uma vela de luz pode atingir uma velocidade de cem quilómetros por segundo, deixando para trás os mais velozes foguetões da atualidade.

Se imaginarmos uma rede de filamentos de fibra de grafite, uma teia de aranha giratória com quilómetros de diâmetro e espaços do tamanho de campos de futebol entre os fios, estaremos próximos da estrutura de uma vela de luz. Se visualizarmos esses espaços preenchidos por painéis refletores feitos de folha de alumínio mais fina do que uma bolha de sabão, teremos uma boa noção do seu aspeto: inúmeros painéis refletores justapostos a formar um vasto mosaico espelhado e ondulante. Agora imaginemos uma carga suspensa dessa teia, como um paraquedista pendurado no seu

paraquedas, enquanto a força centrífuga mantém o espelho esticado e plano no vazio — e teremos quase a imagem completa.

Para construirmos velas de luz utilizando tecnologia convencional (bulk technology), teremos de aprender a fabricá-las no espaço; os seus vastos refletores serão demasiado frágeis para sobreviver ao lançamento e ao processo de desdobramento. Será necessário construir estruturas de andaimes, fabricar refletores de película fina e operar braços robóticos controlados remotamente no espaço. No entanto, os planificadores espaciais já pretendem dominar a construção, a fabricação e a robótica para outras aplicações no espaço. Se construirmos as velas de luz nas fases iniciais do desenvolvimento espacial, esse esforço servirá de treino para essas competências, sem exigir o lançamento de grandes quantidades de material. Apesar da sua vastidão, a estrutura de suporte (juntamente com os materiais para várias velas) será suficientemente leve para ser transportada para a órbita com um ou dois voos do vaivém espacial.

Uma instalação de produção de velas construirá velas a baixo custo. Uma vez fabricadas, as velas serão baratas de utilizar: terão poucas peças móveis críticas, pouca massa e consumo zero de combustível. Serão completamente diferentes dos foguetões na forma, na função e nos custos operacionais. Na verdade, os cálculos sugerem que os custos poderão diferir por um factor de cerca de mil — a favor das velas de luz.

Hoje em dia, a maioria das pessoas vê o restante sistema solar como vasto e inacessível. É, de facto, vasto; tal como na Terra,

levará meses a ser circundado por vela. Contudo, a aparente inacessibilidade não se deve tanto à distância como ao custo do transporte por foguetão.

As velas de luz podem quebrar essa barreira de custo, abrindo as portas do sistema solar. Tornarão outros planetas mais fáceis de alcançar, mas isso não os tornará muito mais úteis: continuarão a ser desertos mortais. A gravidade dos planetas impedirá as velas de luz de ir até às suas superfícies e constituirá também um entrave à indústria planetária. Estações espaciais rotativas podem simular gravidade, se necessário, mas estações fixas na superfície de planetas não a podem evitar. Pior ainda, as atmosferas planetárias bloqueiam a energia solar, espalham poeira, corroem metais, aquecem frigoríficos, arrefecem fornos e derrubam estruturas. Mesmo a Lua, sem atmosfera, gira sobre si mesma, bloqueando a luz solar metade do tempo, e tem gravidade suficiente para prender as velas de luz, impedindo qualquer esperança de fuga. As velas de luz são rápidas e incansáveis, mas não são fortes.

O grande e duradouro valor do espaço reside nos seus recursos de matéria, energia e espaço físico. Os planetas ocupam espaço e bloqueiam energia. Os recursos materiais que oferecem estão colocados de forma inconveniente. Os asteroides, por contraste, são montanhas voadoras de recursos que percorrem órbitas que cruzam todo o sistema solar³. Alguns cruzam a órbita da Terra; alguns chegaram mesmo a colidir com ela, criando crateras. A mineração dos asteroides parece prática. Podemos precisar de foguetes ruidosos para transportar coisas da Terra para o espaço, mas os meteoritos provam que rochas vulgares podem cair do espaço — e,

tal como o vaivém espacial, objetos que caem do espaço não têm de se incendiar durante a descida. Entregar pacotes de materiais de um asteroide até um alvo de aterragem, como uma planície salgada, terá um custo reduzido. Mesmo os asteroides pequenos são grandes à escala humana: contêm milhares de milhões de toneladas de recursos. Alguns asteroides contêm água e uma substância semelhante ao xisto betuminoso. Outros contêm rochas relativamente comuns. Outros ainda contêm um metal que possui elementos raros na crosta terrestre — elementos que afundaram para além do nosso alcance durante a formação do núcleo metálico da Terra: este aço meteórico é uma liga forte e resistente de ferro, níquel e cobalto, com quantidades valiosas de metais do grupo da platina e ouro. Um fragmento com um quilómetro de diâmetro desta substância (e há muitos) contém metais preciosos no valor de vários biliões (milhões de milhões) de dólares, misturados com níquel e cobalto suficientes para abastecer a indústria terrestre durante muitos anos.

O Sol inunda o espaço com energia facilmente captável. Uma estrutura com um quilómetro quadrado, equipada com refletores de película metálica, poderá recolher mais de mil milhões de watts de luz solar, sem qualquer interferência de nuvens ou da noite. No clima imutável do espaço, o mais frágil dos coletores será tão duradouro como uma barragem hidroelétrica⁴. Dado que o Sol emite, num microssegundo, tanta energia quanto a humanidade consome num ano inteiro, a energia não precisa de ser escassa durante muito tempo.

Por fim, o próprio espaço oferece lugar para viver. Em tempos, via-se a vida no espaço em termos planetários. Imaginavam-se cidades com cúpulas construídas em planetas; planetas mortos lentamente transformados em mundos semelhantes à Terra; e planetas semelhantes à Terra alcançados após viagens de anos até outras estrelas. Mas os planetas são pacotes completos, que em geral oferecem a gravidade errada, a atmosfera errada, o comprimento do dia errado, e a localização errada.

O espaço livre oferece um local de construção superior para assentamentos. O Professor Gerard O'Neill⁵, da Universidade de Princeton, chamou a atenção pública para esta ideia, ajudando a revitalizar o interesse pelo espaço após o desânimo do pós-Apollo. Demonstrou que materiais de construção comuns — como o aço e o vidro — poderiam ser usados para construir cilindros habitáveis no espaço, com quilômetros de comprimento e circunferência. No seu projeto, terra sob os pés protege os habitantes da radiação natural do espaço, tal como o ar protege os habitantes da Terra. A rotação produz uma aceleração equivalente à gravidade terrestre, e amplos espelhos e painéis envidraçados inundam o interior com luz solar. Basta acrescentar solo, rios, vegetação e imaginação, e as paisagens interiores poderão rivalizar com os melhores vales da Terra como locais para viver. Com apenas os recursos dos asteroides, seremos capazes de construir o equivalente prático a mil novas Terras. Ao adaptar a tecnologia atual, poderíamos abrir a fronteira espacial. A perspectiva é encorajadora. Mostra-nos um caminho evidente para ultrapassar os limites terrestres ao crescimento, dissipando um dos medos que tem ensombrado a nossa visão do futuro. A promessa da fronteira espacial pode,

assim, mobilizar a esperança humana — um recurso de que necessitaremos em abundância, se quisermos enfrentar os outros problemas.

2. Espaço e Tecnologia Avançada

Ao adaptarmos a tecnologia atual, poderíamos, de facto, abrir a fronteira espacial — mas não o faremos. Seguindo o percurso previsto pelo movimento espacial atual, a civilização humana demoraria décadas a estabelecer-se de forma firme no espaço. Antes disso, avanços decisivos na tecnologia abrirão novos caminhos.

Atualmente, as equipas de engenheiros levam tipicamente entre cinco a dez anos a desenvolver um novo sistema espacial, gastando ao longo do processo dezenas a milhares de milhões de dólares. Estes atrasos e custos de engenharia tornam o progresso dolorosamente lento. Nos próximos anos, porém, os sistemas de conceção assistida por computador evoluirão para sistemas de engenharia automatizada. À medida que isso acontecer, os atrasos e custos de engenharia irão diminuir — e depois despenhar-se; os sistemas de fabrico controlados por computador reduzirão ainda mais os custos totais. Chegará o dia em que o projeto e a manufatura automatizados tornarão o desenvolvimento de sistemas espaciais mais de dez vezes mais rápido e barato. O nosso progresso no espaço disparará.

Nessa altura, os colonos espaciais olharão para o nosso programa espacial atual como a chave do desenvolvimento espacial? Talvez não. Terão testemunhado mais progresso técnico em poucos anos do que os engenheiros espaciais anteriores conseguiram em várias décadas. É bem possível que concluem que a Inteligência Artificial e a robótica fizeram mais pelo avanço espacial do que todo um exército de engenheiros da NASA.

A descoberta dos assemblers (montadores moleculares) e a engenharia automatizada combinar-se-ão para gerar avanços que farão os nossos atuais esforços espaciais parecer pitorescos. No Capítulo 4, descrevi como os assemblers replicadores serão capazes de construir um motor-foguetão leve e resistente com muito pouco trabalho humano. Com métodos semelhantes, construiremos naves espaciais inteiras de baixo custo e desempenho extraordinário. Quilo por quilo, os seus materiais estruturais à base de diamante terão cerca de cinquenta vezes a resistência (e catorze vezes a rigidez) do alumínio utilizado no vaivém espacial atual; veículos construídos com estes materiais poderão ser mais de 90% mais leves do que veículos similares hoje em dia. Uma vez no espaço, estes veículos abrirão coletores solares para recolher energia abundante. Usando essa energia para alimentar assemblers e disassemblers⁶, reconstruir-se-ão em pleno voo para se adaptarem a condições variáveis ou ao capricho dos passageiros. Hoje, viajar no espaço é um desafio. Amanhã, será fácil e conveniente.

Dado que a nanotecnologia se presta à criação de coisas minúsculas, consideremos a mais pequena nave espacial tripulada: o fato espacial. Forçados a usar materiais frágeis, pesados e

passivos, os engenheiros constroem atualmente fatos espaciais volumosos e desajeitados. Observar um fato espacial avançado servirá para ilustrar algumas das capacidades da nanotecnologia.

Imagine que está a bordo de uma estação espacial, girando para simular a gravidade normal da Terra. Após uma breve instrução, é-lhe entregue um fato para experimentar: ali está ele pendurado na parede, um objeto acinzentado, com aspeto de borracha, com um capacete transparente. Pega nele, sente o seu peso considerável, despe-se e entra por uma abertura na parte frontal.

O fato parece mais macio do que a borracha mais suave, mas apresenta uma superfície interior escorregadia. Entra-se nele com facilidade e a abertura sela-se ao simples toque. Proporciona uma cobertura justa à pele, como uma luva fina de couro em volta dos dedos, engrossando à medida que sobe pelo braço até se tornar tão espesso quanto a palma da mão na zona do tronco. Nas costas, mal se nota uma pequena mochila. À volta da cabeça, quase invisível, está o capacete. Abaixo do pescoço, a superfície interior do fato envolve a pele com um toque leve e uniforme que, ao fim de pouco tempo, se torna quase impercetível.

Levantando-se, você caminha pela cabine, experimentando os movimentos. Salta nas pontas dos pés e não sente qualquer peso extra do fato. Dobrar-se e esticar-se é fácil, sem restrições, sem enrugamentos, sem pontos de pressão. Ao esfregar os dedos uns contra os outros, sente a mesma sensibilidade do toque a descoberto — embora ligeiramente mais espessa. Ao respirar, o ar sabe a limpo e fresco. Na verdade, parece que poderia esquecer

que está a usar um fato. E o mais impressionante é que se sente igualmente confortável quando sai para o vácuo do espaço.

O fato consegue tudo isto — e mais ainda — através de uma atividade complexa no interior de uma estrutura cuja textura é quase tão intrincada quanto a de um tecido vivo. O dedo de uma luva com apenas um milímetro de espessura tem espaço para mil camadas de nanotecnologia ativa, cada uma com a espessura de um micrómetro. Um pedaço do tamanho da ponta de um dedo tem capacidade para mil milhões de nanocomputadores mecânicos, restando ainda 99,9% do volume disponível para outros componentes.

Em particular, isto deixa espaço para uma estrutura ativa. A camada intermédia do material⁷ do fato contém uma trama tridimensional de fibras à base de diamante, atuando de forma semelhante a músculos artificiais, mas com a capacidade de empurrar além de puxar (como descrito nas Notas). Estas fibras ocupam grande parte do volume e conferem ao material do fato uma resistência comparável à do aço. Alimentadas por micromotores elétricos e controladas por nanocomputadores, dão ao material do fato uma força flexível e adaptável, permitindo-lhe esticar-se, contrair-se e dobrar-se conforme necessário. Quando o fato parecia macio, anteriormente, era porque tinha sido programado para se comportar como tal. O fato não tem qualquer dificuldade em manter a sua forma no vácuo; tem força suficiente para evitar expandir-se como um balão. Do mesmo modo, não tem dificuldade em suportar o seu próprio peso e mover-se de acordo com os teus movimentos — de forma rápida, fluida e sem

resistência. Esta é uma das razões pelas quais quase parece que não está lá.

Os seus dedos parecem quase descobertos porque sente a textura daquilo que toca. Isto acontece porque sensores de pressão revestem toda a superfície do fato, enquanto a estrutura ativa reveste o seu interior: a luva deteta a forma daquilo que toca — e o padrão detalhado da pressão que exerce — e transmite o mesmo padrão de textura à sua pele. O processo também funciona em sentido inverso, transmitindo para o exterior o padrão detalhado das forças exercidas pela sua pele no interior da luva. Assim, a luva finge que não existe, e a sua pele sente-se quase nua.

O fato possui a força do aço e a flexibilidade do seu próprio corpo. Se alterar os controlos do fato, ele continuará a acompanhar os seus movimentos, mas com uma diferença: em vez de simplesmente transmitir as forças que exerce, passa a amplificá-las por um factor de dez. Da mesma forma, quando algo lhe roça, o fato transmite apenas um décimo da força para o interior⁸. Está agora pronto para um combate de luta livre com um gorila.

O ar fresco que respira pode não parecer surpreendente; a mochila contém uma reserva de ar e outros consumíveis. No entanto, passados alguns dias no exterior, sob a luz do Sol, o ar não se esgotará: tal como uma planta, o fato absorve a luz solar e o dióxido de carbono que expira, produzindo oxigénio fresco. E também como uma planta (ou um ecossistema inteiro), decompõe outros resíduos em moléculas simples e volta a reorganizá-las nos padrões moleculares de alimentos frescos e saudáveis. De facto, o

fato manter-te-á confortável, respirando e bem alimentado praticamente em qualquer lugar do sistema solar interior⁹.

E mais ainda: o fato é durável. Consegue tolerar a falha de inúmeras nanomáquinas, porque possui muitas outras prontas a assumir a carga. O espaço entre as fibras ativas oferece margem suficiente para que montadores e desmontadores se movimentem e reparem dispositivos danificados. O fato repara-se a si mesmo tão rapidamente quanto se desgasta.

Dentro dos limites do possível, o fato poderia incluir muitas outras funcionalidades. Um grão de material, menor do que a cabeça de um alfinete, poderia conter o texto de todos os livros alguma vez publicados, para exibição num ecrã desdobrável. Outro grão poderia ser uma “semente”, contendo os planos de construção para uma gama de dispositivos superior ao total que a humanidade construiu até hoje¹⁰ — juntamente com montadores autorreplicantes capazes de fabricar qualquer um (ou todos) esses dispositivos.

Mais ainda, sistemas técnicos de inteligência artificial avançada, como os descritos no capítulo anterior, poderiam projetar o fato de manhã e tê-lo construído até à tarde¹¹.

Tudo o que hoje conseguimos fazer no espaço com tecnologia volumosa será rapidamente e de forma dramática ultrapassado assim que a nanotecnologia molecular e a engenharia automatizada estiverem disponíveis. Em especial, construiremos montadores

replicantes que funcionarão no espaço¹². Estes replicadores utilizarão energia solar, como fazem as plantas, e com ela converterão detritos de asteróides em cópias de si próprios e em produtos úteis para os humanos. Com eles, conquistaremos os recursos do sistema solar.

Nesta altura, a maioria dos leitores terá notado que este cenário, tal como certas discussões anteriores, soa a ficção científica. Alguns poderão sentir-se entusiasmados, outros talvez alarmados por verem que estas possibilidades futuras, de facto, possuem essa qualidade. Contudo, há quem sinta que “soar a ficção científica” é, por si só, motivo suficiente para rejeição. Este sentimento é comum — e merece ser analisado.

A tecnologia e a ficção científica têm, desde há muito, uma relação curiosa. Ao imaginarem tecnologias futuras, os autores de ficção científica foram guiados em parte pela ciência, em parte pelos anseios humanos, e em parte pela procura de mercado por histórias bizarras. Algumas dessas imaginações acabam por se tornar realidade, porque ideias que parecem plausíveis e interessantes na ficção revelam-se, por vezes, possíveis e atraentes na realidade. Além disso, quando cientistas e engenheiros antecipam uma possibilidade dramática — como os voos espaciais movidos a foguetes —, é comum que escritores de ficção científica agarrem essa ideia e a popularizem.

Mais tarde, quando os avanços da engenharia aproximam essas possibilidades da concretização, outros autores analisam os factos e descrevem os cenários. Estas descrições, a menos que sejam

bastante abstratas, acabam por soar a ficção científica. As possibilidades futuras parecerão frequentemente ficção de hoje — do mesmo modo que robôs, naves espaciais e computadores se assemelham à ficção de ontem. Como poderia ser de outro modo? Tecnologias novas e dramáticas soam a ficção científica porque os autores de ficção científica, apesar das suas frequentes fantasias, não são cegos — e têm um interesse profissional nessa área.

Com frequência, os autores de ficção científica ficcionalizam (ou seja, falsificam) o conteúdo científico das suas histórias para “explicar” as tecnologias dramáticas. Alguns pensadores pouco rigorosos agrupam todas as descrições de avanços técnicos radicais com essa pseudociência — e rejeitam tudo em bloco. Isto é lamentável. Quando os engenheiros projetam capacidades futuras, testam as suas ideias, fazendo-as evoluir para se conformarem com o melhor entendimento que temos das leis da natureza. Os conceitos que daí resultam devem ser claramente distinguidos das ideias moldadas para satisfazer as exigências da ficção de banca de aeroporto. As nossas vidas dependerão dessa distinção.

Muitas coisas continuarão a ser impossíveis, mesmo com a nanotecnologia molecular. Nenhum fato espacial, por mais extraordinário que seja, será capaz de voar indefinidamente a velocidades tremendas, sobreviver a grandes explosões, atravessar paredes, ou sequer manter-se fresco indefinidamente numa sala quente e isolada. Temos ainda um longo caminho a percorrer antes de alcançarmos os limites do possível — mas esses limites existem. Este será, no entanto, um tema explorado mais adiante.

3. Abundância

Os recursos espaciais unem-se aos montadores replicantes e aos sistemas de engenharia automatizada para consolidar o argumento de um futuro de grande abundância material. O significado disto torna-se mais claro ao examinarmos os custos. Os custos refletem os limites dos nossos recursos e capacidades; custos elevados indicam recursos escassos e objetivos difíceis. Os profetas da escassez, na prática, previram custos de recursos em forte subida e, com eles, um determinado tipo de futuro. Contudo, os custos dos recursos dependem sempre da tecnologia. Infelizmente, os engenheiros que tentam prever o custo das tecnologias futuras deparam-se geralmente com uma teia de detalhes e incertezas impossível de desfazer. Este problema tem obscurecido a nossa compreensão do futuro.

A perspectiva dos montadores replicantes, da engenharia automatizada e dos recursos espaciais corta este nó górdio da previsão de custos. Hoje, o custo dos produtos inclui os custos de mão-de-obra, capital, matérias-primas, energia, terra, eliminação de resíduos, organização, distribuição, tributação e projeto. Para perceber como os custos totais irão mudar, consideremos estes elementos um a um.

Mão-de-obra. Os montadores replicantes não precisarão de mão-de-obra para se construir, uma vez que o primeiro existir. Para que servem as mãos humanas na operação de um montador? Além disso, com dispositivos robóticos de vários tamanhos para montar peças em sistemas maiores, todo o processo de fabrico — desde a

montagem molecular até à construção de arranha-céus — poderia estar isento de custos de mão-de-obra.

Capital. Os sistemas baseados em montadores, se devidamente programados, serão eles próprios capital produtivo. Juntamente com máquinas robóticas maiores, serão capazes de construir praticamente qualquer coisa, incluindo cópias de si mesmos. Como este capital autorreplicante poderá duplicar-se muitas vezes por dia, só a procura e os recursos disponíveis limitarão a sua quantidade. O capital, enquanto tal, praticamente não terá custo.

Matérias-primas. Como as máquinas moleculares organizarão os átomos da melhor forma possível, uma pequena quantidade de material pode ir muito longe. Elementos comuns como hidrogénio, carbono, azoto, oxigénio, alumínio e silício parecem os melhores para construir a maior parte das estruturas, veículos, computadores, roupas e assim por diante: são leves e formam ligações fortes. Como a terra e o ar contêm estes elementos em abundância, as matérias-primas podem ser extremamente baratas.

Energia. Os montadores poderão funcionar com energia química ou elétrica. Os sistemas construídos por montadores irão converter energia solar em energia química, tal como as plantas, ou energia solar em energia elétrica, tal como as células solares. As células solares existentes já são mais eficientes do que as plantas. Com montadores replicantes a construir coletores solares, o combustível e a energia elétrica terão um custo muito reduzido.

Terreno. Os sistemas de produção baseados em montadores ocuparão pouco espaço. A maior parte poderia caber num armário (ou num dedal, ou num orifício de alfinete); sistemas maiores poderiam ser colocados no subsolo ou no espaço, caso alguém queira algo que exija uma quantidade pouco estética de espaço. Os sistemas de produção baseados em montadores tornarão máquinas de escavação e naves espaciais económicas.

Eliminação de resíduos. Os sistemas de montadores serão capazes de manter o controlo dos átomos que utilizam, tornando a produção tão limpa quanto um pomar de macieiras em crescimento, ou mesmo mais limpa. Se o pomar se mantiver demasiado sujo ou feio, poderemos deslocá-lo totalmente para fora da Terra¹³.

Organização. Atualmente, a produção fabril requer organização para coordenar hordas de trabalhadores e gestores. As máquinas de produção baseadas em montadores não terão pessoas, simplesmente ficarão a produzir coisas feitas por encomenda. A sua programação inicial providenciará toda a organização e informação necessárias para fabricar uma vasta gama de produtos.

Distribuição. Com veículos automáticos a circular em túneis feitos por máquinas de escavação baratas, a distribuição não precisará de consumir mão-de-obra nem de degradar a paisagem. Com montadores em casa e na comunidade, haverá menos necessidade de distribuição desde logo.

Tributação. A maior parte dos impostos retira uma percentagem fixa do preço e, por isso, acrescenta uma percentagem fixa ao custo. Se o custo for negligenciável, o imposto também o será. Além disso, governos com os seus próprios replicadores e matérias-primas terão menos razões para taxar as pessoas.

Projeto (Design). Os pontos acima convergem para um argumento de custos de produção muito baixos. Sistemas técnicos de IA, ao evitarem o custo da mão-de-obra de engenharia, eliminarão virtualmente os custos do projeto. Estes sistemas de IA serão eles próprios baratos de produzir e operar, sendo construídos por montadores e não tendo outra inclinação senão conceber coisas.

Em suma, no final de uma longa série de desenvolvimentos lucrativos nas tecnologias informáticas e moleculares, o custo de conceber e produzir coisas cairá drasticamente. Referi acima as matérias-primas "baratíssimas", e de facto, os montadores poderão fabricar quase tudo a partir de terra e luz solar. Os recursos do espaço, porém, transformarão o conceito de "baratíssimo" em "baratíssimo-ao-quadrado": o solo fértil tem valor no ecossistema da Terra, mas os detritos dos asteroides vêm de um deserto morto e árido. Da mesma forma, os montadores no espaço funcionarão com a energia solar barata.

Os recursos do espaço são vastos. Um só asteroide poderia enterrar os continentes da Terra com um quilómetro de profundidade em matérias-primas. O espaço absorve

99,999999955% da luz do Sol que não incide sobre a Terra, a maior parte da qual se perde no vazio interestelar.

O espaço contém matéria, energia e espaço suficiente para projetos de dimensão colossal, incluindo vastos assentamentos espaciais. Sistemas baseados em replicadores poderão construir mundos do tamanho de continentes, semelhantes aos cilindros do Dr. O'Neill, mas feitos de materiais resistentes à base de carbono. Com estes materiais e a água das luas geladas do sistema solar exterior, poderemos criar não apenas terras no espaço, mas também mares inteiros, mais largos e profundos do que o Mediterrâneo. Construídos com energia e matérias-primas do espaço, estas novas e amplas terras e mares custarão quase nada à Terra e aos seus habitantes em termos de recursos. O principal requisito será programar o primeiro replicador, mas os sistemas de IA ajudarão nessa tarefa. O maior problema será decidir o que queremos.

Como escreveu Konstantin Tsiolkovsky¹⁴, perto da viragem do século, "O Homem não permanecerá sempre na Terra; a busca pela luz e pelo espaço levará a penetrar os limites da atmosfera, timidamente no início, mas no fim a conquistar todo o espaço solar." Ao espaço morto traremos vida.

E os replicadores dar-nos-ão os recursos para alcançar as estrelas. Uma vela luminosa (lightsail), propulsionada apenas pela luz solar, rapidamente se encontrará a navegar na escuridão — mais rápida do que qualquer foguete moderno, mas ainda assim tão lentamente que levaria milénios a atravessar o abismo interestelar.

Contudo, podemos construir um imenso conjunto de lasers a orbitar o Sol e, com ele, emitir um feixe de luz que se projete para além do nosso sistema solar¹⁵, impelindo a vela em direção à velocidade da luz. A travessia, então, levará apenas alguns anos.

Parar, porém, apresenta um problema. Freeman Dyson, de Princeton, sugere o uso de campos magnéticos para travar na ténue e ionizada matéria entre as estrelas¹⁶. Robert Forward, dos Laboratórios de Investigação Hughes, propõe refletir a luz laser na vela, redirecionando-a ao longo do trajeto da vela para desacelerar uma vela mais pequena que venha atrás¹⁷. De um modo ou de outro (e há muitas outras possibilidades), as estrelas estão ao nosso alcance.

Durante muito tempo, no entanto, o sistema solar proporcionará espaço mais do que suficiente. A região próxima da Terra contém espaço para terras com uma área um milhão de vezes superior à da Terra¹⁸. Nada precisará impedir a emigração, nem as visitas de regresso à pátria. Não teremos dificuldades em alimentar energeticamente esse sistema de transporte — a luz solar que incide sobre a Terra, em apenas dez minutos, fornece energia suficiente para colocar toda a população atual em órbita¹⁹. As viagens espaciais e os assentamentos no espaço tornar-se-ão ambos baratos. Se fizermos um uso sábio da tecnologia molecular, os nossos descendentes hão-de perguntar-se o que nos manteve tão confinados à Terra durante tanto tempo — e em tamanha pobreza.

4. A Sociedade da Soma Positiva

Pode parecer que o custo de tudo — até da terra, se não se desejar milhares de quilómetros de rocha sob os pés — cairá para quase nada. Em certo sentido, isto é praticamente verdade; noutro sentido, é completamente falso. As pessoas continuarão a valorizar a matéria, a energia, a informação e o serviço humano genuíno, pelo que tudo continuará a ter o seu custo. E, a longo prazo, enfrentaremos limites reais ao crescimento, pelo que o custo dos recursos não pode ser ignorado.

Ainda assim, se sobrevivermos, os replicadores e os recursos espaciais trarão uma longa era em que os limites genuínos de recursos ainda não nos apertam — uma Era em que, segundo os padrões atuais, até mesmo uma riqueza imensa parecerá virtualmente gratuita. Isto pode parecer bom demais para ser verdade, mas a natureza (como de costume) não estabelece os seus limites com base nos sentimentos humanos. Os nossos antepassados achavam que falar com alguém do outro lado do mar (a muitos meses de viagem de veleiro) seria bom demais para ser verdade, mas os cabos submarinos e os satélites intercontinentais tornaram isso possível.

Mas há uma outra resposta, menos agradável, para aqueles que acham que os montadores são demasiado bons para ser verdade: os montadores também ameaçam trazer perigos e armas mais perigosas do que qualquer coisa alguma vez vista. Se a nanotecnologia pudesse ser evitada, mas não controlada, então as pessoas sensatas evitá-la-iam. Contudo, a corrida tecnológica trará

inevitavelmente os montadores a partir da biotecnologia, tal como trouxe as naves espaciais a partir dos mísseis. As vantagens militares por si só serão suficientes para tornar o avanço quase inevitável. Os montadores são inevitáveis — mas talvez controláveis.

O nosso desafio é evitar os perigos, mas isso exigirá cooperação, e teremos mais probabilidade de cooperar se compreendermos o quanto temos a ganhar com isso. A perspetiva do espaço e dos montadores replicantes pode ajudar-nos a eliminar alguns antigos e perigosos memes.

A vida humana foi, em tempos, como um jogo de soma zero. A humanidade vivia perto do seu limite ecológico e tribo combatia tribo pelo espaço vital. No que dizia respeito a pastagens, terras agrícolas e territórios de caça, mais para um grupo significava menos para outro. Como o ganho de um correspondia aproximadamente à perda do outro, os benefícios líquidos somavam zero. No entanto, as pessoas que cooperavam noutros assuntos prosperavam, e assim os nossos antepassados aprenderam não apenas a conquistar, mas também a cooperar e a construir.

Quando se trata de impostos, transferências sociais e batalhas judiciais, mais para uns ainda significa menos para outros. Acrescentamos riqueza total lentamente, mas redistribuímo-la rapidamente. Em qualquer dia, os nossos recursos parecem fixos, e isso dá origem à ilusão de que a vida é um jogo de soma zero. Esta ilusão sugere que a cooperação ampla é inútil, porque o nosso ganho terá de resultar da perda de algum oponente.

A história do progresso humano prova que o jogo mundial pode ser de soma positiva. O crescimento económico acelerado ao longo dos últimos séculos mostra que os ricos podem enriquecer enquanto os pobres também enriquecem. Apesar do crescimento populacional (e da ideia de dividir um bolo fixo), a riqueza média per capita no mundo, incluindo no Terceiro Mundo, tem vindo a crescer continuamente. Flutuações económicas, recuos locais e a tendência natural dos meios de comunicação para focar as más notícias — tudo isto contribui para obscurecer os factos sobre o crescimento económico, mas os registos públicos são suficientemente claros. Os recursos do espaço e os montadores replicantes acelerarão esta tendência histórica para lá dos sonhos dos economistas, lançando a raça humana num novo mundo.

CAPÍTULO 7

Motores de Cura

Uma das coisas que distingue a nossa de todas as gerações anteriores é que vimos os nossos átomos.

— KARL K. DARROW, O Renascimento da Física

Usaremos a tecnologia molecular para promover a saúde porque o corpo humano é feito de moléculas. Os doentes, os idosos e os feridos sofrem todos com padrões desorganizados de átomos, quer desorganizados por vírus invasores, pelo passar do tempo ou por colisões com automóveis. Dispositivos capazes de reorganizar átomos poderão colocá-los na ordem certa. A nanotecnologia trará um avanço fundamental na medicina.

Atualmente, os médicos contam principalmente com a cirurgia e os medicamentos para tratar doenças. Os cirurgiões evoluíram desde suturar feridas e amputar membros até reparar corações e reimplantar membros. Com microscópios e instrumentos delicados, conseguem unir vasos sanguíneos e nervos extremamente finos. No entanto, nem o melhor microcirurgião consegue cortar e suturar estruturas de tecidos mais finas. Os bisturis e os fios de sutura modernos são simplesmente demasiado grosseiros para reparar capilares, células e moléculas. Consideremos uma "cirurgia delicada" do ponto de vista de uma célula: uma lâmina enorme

desce em queda, cortando às cegas por entre a maquinaria molecular de uma multidão de células, dizimando milhares. Depois, um grande obelisco mergulha entre a multidão dividida, arrastando um cabo tão longo como um comboio de mercadorias para unir novamente a multidão. Do ponto de vista de uma célula, mesmo a cirurgia mais delicada, realizada com instrumentos de precisão e grande perícia, continua a ser um ato de carnificina. Apenas a capacidade das células de abandonar os mortos, reorganizar-se e multiplicar-se torna a cura possível.

Contudo, como muitos acidentados paraplégicos sabem demasiado bem, nem todos os tecidos regeneram.

A terapia medicamentosa, ao contrário da cirurgia, atua sobre as estruturas mais finas das células. As moléculas dos medicamentos são dispositivos moleculares simples. Muitas delas afetam moléculas específicas dentro das células. As moléculas de morfina, por exemplo, ligam-se a determinados recetores nas células cerebrais, influenciando os impulsos nervosos que sinalizam a dor. A insulina, os betabloqueadores e outros fármacos atuam noutros recetores. Mas as moléculas dos medicamentos atuam sem direção. Uma vez libertas no corpo, vagueiam e colidem aleatoriamente em solução, até que, por acaso, se encontrem com a molécula-alvo, encaixem e se fixem, influenciando a sua função.

Os cirurgiões conseguem ver os problemas e planejar ações, mas usam ferramentas grosseiras; as moléculas dos medicamentos atuam ao nível molecular, mas são demasiado simples para sentir, planejar e atuar. No entanto, máquinas moleculares dirigidas por

nanocomputadores oferecerão aos médicos uma nova opção. Estas combinarão sensores, programas e ferramentas moleculares para formar sistemas capazes de examinar e reparar os componentes fundamentais das células individuais. Trarão o controle cirúrgico para o domínio molecular.

Estes dispositivos moleculares avançados ainda levarão anos a chegar, mas investigadores movidos por necessidades médicas já estão a estudar máquinas moleculares e engenharia molecular. Os melhores medicamentos atuam sobre máquinas moleculares específicas de formas específicas. A penicilina, por exemplo, mata certas bactérias ao bloquear a nanomáquina que utilizam para construir as suas paredes celulares, tendo, contudo, pouco efeito sobre as células humanas.

Os bioquímicos estudam máquinas moleculares tanto para aprender a construí-las como para aprender a destruí-las. Por todo o mundo (e especialmente no Terceiro Mundo), uma variedade repugnante de vírus, bactérias, protozoários, fungos e vermes parasitam a carne humana. Tal como a penicilina, medicamentos seguros e eficazes para essas doenças seriam aqueles que bloqueassem a maquinaria molecular do parasita, sem danificar a maquinaria molecular humana. O Dr. Seymour Cohen, professor de ciências farmacológicas na SUNY (Stony Brook, Nova Iorque), defende que os bioquímicos devem estudar sistematicamente a maquinaria molecular desses parasitas¹. Uma vez determinado o formato e a função de uma máquina proteica vital, os bioquímicos poderiam muitas vezes desenhar uma molécula com a forma adequada para a bloquear e inutilizar. Tais medicamentos poderiam

libertar a humanidade de horrores ancestrais como a esquistossomose e a lepra, e de outros mais recentes como a SIDA.

As empresas farmacêuticas já estão a redesenhar moléculas com base no conhecimento do seu modo de funcionamento. Investigadores da empresa Upjohn desenharam e produziram moléculas modificadas de vasopressina, uma hormona constituída por uma cadeia curta de aminoácidos². A vasopressina aumenta o trabalho realizado pelo coração e diminui a taxa a que os rins produzem urina; isto provoca um aumento da pressão arterial. Os investigadores conceberam moléculas de vasopressina modificadas que afetam mais os recetores nos rins do que os do coração, o que lhes confere efeitos médicos mais específicos e controláveis. Mais recentemente, desenharam uma molécula de vasopressina modificada que se liga aos recetores renais sem produzir um efeito direto, bloqueando assim e inibindo a ação da vasopressina natural.

As necessidades médicas impulsionarão este trabalho, encorajando os investigadores a avançar mais na direção do desenho de proteínas e da engenharia molecular. Pressões médicas, militares e económicas empurram-nos todas na mesma direção. Mesmo antes da revolução dos montadores moleculares (assemblers), a tecnologia molecular trará avanços impressionantes na medicina; as tendências atuais da biotecnologia garantem-no. No entanto, esses avanços continuarão a ser, em geral, pontuais e difíceis de prever, explorando cada qual algum detalhe da bioquímica. Mais tarde, quando aplicarmos montadores e sistemas técnicos de IA à medicina, ganharemos capacidades mais amplas e fáceis de antecipar.

Para compreender estas capacidades, consideremos as células e os seus mecanismos de autorreparação. Nas células do seu corpo, a radiação natural e os químicos nocivos partem moléculas, produzindo fragmentos moleculares reativos. Estes podem ligar-se indevidamente a outras moléculas num processo chamado ligação cruzada (cross-linking). Assim como balas e manchas de cola danificariam uma máquina, a radiação e os fragmentos reativos danificam as células, tanto ao partir as máquinas moleculares como ao emperrá-las.

Se as suas células não conseguissem reparar-se a si mesmas, os danos rapidamente as matariam ou fariam funcionar descontroladamente ao danificarem os seus sistemas de controlo. Mas a evolução favoreceu organismos com máquinas capazes de resolver este problema. O sistema de fábrica autorreplicante, descrito no capítulo 4, reparava-se a si próprio substituindo as partes danificadas; as células fazem o mesmo. Enquanto o DNA da célula permanecer intacto, ela pode fabricar fitas sem erros que instruem os ribossomas a montar novas máquinas proteicas.

Infelizmente para nós, o próprio DNA também sofre danos, resultando em mutações. As enzimas de reparação compensam parcialmente ao detetarem e corrigirem certos tipos de danos no DNA. Estas reparações ajudam as células a sobreviver, mas os mecanismos de reparação existentes são demasiado simples para corrigir todos os problemas, seja no DNA ou noutras partes. Os erros acumulam-se, contribuindo para o envelhecimento e a morte das células — e das pessoas.

1. Vida, Mente e Máquinas

Faz sentido descrever as células como “máquinas”, estejam elas em autorreparação ou não? Sendo que somos feitos de células, isso poderia parecer reduzir os seres humanos a “simples máquinas”, o que conflita com uma compreensão holística da vida.

Mas uma definição de dicionário para holismo é “a teoria de que a realidade é constituída por organismos ou totalidades unificadas que são maiores do que a simples soma das suas partes.”³ Isto aplica-se certamente às pessoas: uma soma mais simples das nossas partes assemelhar-se-ia a um hambúrguer, desprovido de mente e vida.

O corpo humano inclui cerca de dez mil bilhões bilhões de partes proteicas, e nenhuma máquina tão complexa merece o rótulo de “simples”. Qualquer descrição breve de um sistema tão complexo não pode deixar de ser grosseiramente incompleta, mas ao nível celular uma descrição em termos de maquinaria faz sentido. As moléculas têm peças móveis simples, e muitas funcionam como tipos familiares de máquinas. As células, consideradas como um todo, podem parecer menos mecânicas, mas os biólogos acham útil descrevê-las em termos de maquinaria molecular.

Os bioquímicos desvendaram aquilo que foram os mistérios centrais da vida, e começaram a preencher os detalhes. Rastreamos como as máquinas moleculares partem as moléculas dos alimentos nos seus blocos de construção e depois reconstroem essas partes

para construir e renovar o tecido. Muitos detalhes da estrutura das células humanas permanecem desconhecidos (células individuais contêm milhares de milhões de grandes moléculas de milhares de tipos diferentes), mas os bioquímicos mapearam todas as partes de alguns vírus. Laboratórios bioquímicos exibem frequentemente um grande gráfico mural que mostra como os principais blocos moleculares circulam através das bactérias. Os bioquímicos compreendem grande parte do processo da vida em detalhe, e aquilo que não compreendem parece operar segundo os mesmos princípios. O mistério da hereditariedade tornou-se a indústria da engenharia genética. Até o desenvolvimento embrionário e a memória estão a ser explicados em termos de alterações na bioquímica e na estrutura celular.

Nas últimas décadas, a própria qualidade da nossa ignorância mudou. Antes, os biólogos olhavam para o processo da vida e perguntavam-se: “Como é isto possível?” Hoje, compreendem os princípios gerais da vida e, ao estudarem um processo vivo específico, perguntam frequentemente: “Das muitas formas possíveis, qual terá a natureza escolhido?” Em muitos casos, os seus estudos reduziram as explicações concorrentes a uma só. Certos processos biológicos — a coordenação das células para formar embriões em crescimento, cérebros que aprendem e sistemas imunitários que reagem — continuam a desafiar a imaginação. No entanto, isto não se deve a algum mistério profundo sobre o funcionamento das suas partes, mas sim à imensa complexidade de como as suas muitas partes interagem para formar um todo.

As células obedecem às mesmas leis naturais que descrevem o restante do mundo. Máquinas proteicas, no ambiente molecular adequado, funcionarão quer permaneçam numa célula ativa quer o resto da célula tenha sido desfeito e lavado dias antes. As máquinas moleculares nada sabem de “vida” ou “morte”.

Os biólogos — quando se dão ao trabalho — por vezes definem a vida como a capacidade de crescer, replicar-se e responder a estímulos. Mas, por esse critério, um sistema inconsciente de fábricas replicantes poderia qualificar-se como vida, enquanto uma inteligência artificial consciente, modelada com base no cérebro humano, talvez não o fizesse. Os vírus estão vivos ou são “meramente” máquinas moleculares elaboradas? Nenhuma experiência pode responder a isso, porque a natureza não traça uma linha entre o vivo e o não vivo. Biólogos que trabalham com vírus perguntam antes pela sua viabilidade: “Funcionará este vírus, se lhe dermos oportunidade?” As etiquetas de “vida” e “morte” na medicina dependem das capacidades médicas: os médicos perguntam: “Este paciente funcionará, se fizermos tudo ao nosso alcance?” Outrora, os médicos declaravam um paciente morto quando o coração parava; hoje, declaram-no morto quando desistem de restaurar a atividade cerebral. Os avanços na medicina cardíaca alteraram essa definição uma vez; os avanços na medicina cerebral voltarão a mudá-la.

Assim como algumas pessoas se sentem desconfortáveis com a ideia de que máquinas possam pensar, outras sentem desconforto com a ideia de que máquinas estejam na base do nosso próprio pensamento. A palavra “máquina” parece evocar novamente a

imagem errada — uma ideia de metal bruto e ruidoso — em vez de sinais a cintilar através de um tecido em constante mudança feito de fibras neuronais, uma tapeçaria viva mais intrincada do que aquilo que a mente que ela incorpora consegue inteiramente compreender. As verdadeiras máquinas semelhantes a máquinas no cérebro têm tamanho molecular, menores do que as mais finas fibras.

O todo não tem de se assemelhar às suas partes. Um bloco sólido em nada se assemelha a uma fonte dançante, e, no entanto, uma coleção de moléculas sólidas e disformes forma a água fluida. De forma semelhante, milhares de milhões de máquinas moleculares compõem as fibras neuronais e as sinapses; milhares de fibras e sinapses formam uma célula neural; milhares de milhões de células neurais constituem o cérebro, e o cérebro em si incorpora a fluidez do pensamento.

Dizer que a mente é “apenas máquinas moleculares” é como dizer que a Mona Lisa é “apenas pinceladas de tinta”. Tais afirmações confundem as partes com o todo, e confundem a matéria com o padrão que ela corporiza. Não somos menos humanos por sermos feitos de moléculas.

2. De Medicamentos a Máquinas de Reparação Celular

Sendo feitos de moléculas, e tendo uma preocupação humana com a nossa saúde, iremos aplicar máquinas moleculares à tecnologia biomédica. Os biólogos já utilizam anticorpos para

marcar proteínas, enzimas para cortar e emendar ADN, e seringas virais (como o fago T4) para injetar ADN editado em bactérias. No futuro, utilizarão nanomáquinas construídas por montadores moleculares para investigar e modificar células.

Com ferramentas como desassembladores (disassemblers), os biólogos poderão estudar as estruturas celulares com um detalhe molecular absoluto. A seguir, catalogarão as centenas de milhares de tipos de moléculas existentes no corpo e mapearão a estrutura das centenas de tipos de células. Tal como os engenheiros elaboram listas de componentes e desenham esquemas técnicos para um automóvel, assim também os biólogos descreverão as peças e estruturas dos tecidos saudáveis. Nessa altura, contarão com o apoio de sistemas técnicos sofisticados de Inteligência Artificial⁴.

Os médicos têm como objetivo tornar os tecidos saudáveis, mas com medicamentos e cirurgia só conseguem, na melhor das hipóteses, incentivar os tecidos a autorrepararem-se. As máquinas moleculares permitirão reparações mais diretas, inaugurando uma nova Era na medicina.

Para reparar um automóvel, o mecânico começa por aceder ao conjunto defeituoso, identifica e remove as peças danificadas e, por fim, reconstrói ou substitui essas peças. A reparação celular seguirá os mesmos passos fundamentais — tarefas que os sistemas vivos já demonstram ser possíveis.

Acesso. Os glóbulos brancos saem da corrente sanguínea e deslocam-se através dos tecidos, e os vírus penetram nas células. Os biólogos até conseguem introduzir agulhas nas células sem as matar. Estes exemplos demonstram que é viável para as máquinas moleculares acederem e entrarem nas células.

Reconhecimento. Os anticorpos e as fibras caudais do fago T4 — e, na verdade, todas as interações bioquímicas específicas — demonstram que os sistemas moleculares podem reconhecer outras moléculas pelo toque.

Desmontagem. As enzimas digestivas (e outros químicos ainda mais agressivos) mostram que os sistemas moleculares conseguem desmontar moléculas danificadas.

Reconstrução. As células replicantes demonstram que os sistemas moleculares podem construir ou reconstruir todas as moléculas presentes numa célula.

Remontagem. A natureza também mostra que moléculas separadas podem ser novamente reunidas⁵. A maquinaria do fago T4, por exemplo, automonta-se a partir de uma solução, aparentemente com a ajuda de uma única enzima⁶. As células replicantes demonstram que os sistemas moleculares conseguem montar todos os sistemas encontrados numa célula.

Assim, a natureza demonstra todas as operações básicas necessárias para realizar reparações, a nível molecular, nas células.

Além disso, como descrevi no Capítulo 1, os sistemas baseados em nanomáquinas serão, em geral, mais compactos e mais capazes do que os encontrados na natureza. Os sistemas naturais mostram-nos apenas os limites inferiores do que é possível — tanto na reparação celular como em tudo o resto.

3. Máquinas de Reparação de Células

Resumindo, com a tecnologia molecular e a Inteligência Artificial técnica, seremos capazes de compilar descrições completas, ao nível molecular, de tecidos saudáveis, e construiremos máquinas capazes de entrar nas células, de sentir e modificar as suas estruturas.

As máquinas de reparação celular terão um tamanho comparável ao das bactérias e vírus, mas os seus componentes, mais compactos, permitir-lhes-ão ser mais complexas. Deslocar-se-ão através dos tecidos como os glóbulos brancos, e entrarão nas células como os vírus — ou poderão abrir e fechar as membranas celulares com o cuidado de um cirurgião. Dentro de uma célula, uma máquina de reparação começará por avaliar a situação, examinando o conteúdo e a atividade celular, e só depois tomará uma ação. As primeiras máquinas de reparação celular serão altamente especializadas, capazes de reconhecer e corrigir apenas um tipo específico de desordem molecular, como uma deficiência enzimática ou um tipo de dano no ADN. Mais tarde (mas não muito mais tarde, graças à contribuição da IA técnica avançada no trabalho de conceção), estas máquinas serão programadas com capacidades mais generalistas.

Máquinas de reparação mais complexas necessitarão de nanocomputadores para as orientar. Um computador mecânico com um micrómetro de largura, como o descrito no Capítulo 1, caberá em 1/1000 do volume de uma célula típica, e conterá mais informação do que o ADN da própria célula. Num sistema de reparação, estes computadores dirigirão outros mais pequenos e simples, os quais, por sua vez, guiarão as máquinas responsáveis por examinar, desmontar e reconstruir estruturas moleculares danificadas.

Ao atuarem molécula por molécula, estrutura por estrutura, estas máquinas serão capazes de reparar células inteiras. Ao atuarem célula por célula e tecido por tecido — com o auxílio de dispositivos maiores, quando necessário — conseguirão reparar órgãos inteiros. Ao atuarem num corpo humano, órgão por órgão, restaurarão a saúde. Como estas máquinas moleculares terão a capacidade de construir moléculas e células a partir do zero, conseguirão reparar mesmo células danificadas até ao ponto de total inatividade. Deste modo, as máquinas de reparação celular trarão uma revolução fundamental: libertarão a medicina da sua dependência exclusiva da autorreparação como único caminho para a cura.

Para visualizar uma máquina de reparação celular avançada, imagine-a — e a célula — aumentadas até os átomos terem o tamanho de berlindes. Nesta escala, as ferramentas mais pequenas da máquina de reparação têm pontas do tamanho das pontas dos seus dedos; uma proteína de tamanho médio, como a hemoglobina, tem o tamanho de uma máquina de escrever; e um ribossoma é do

tamanho de uma máquina de lavar roupa. Um único dispositivo de reparação contém um computador simples do tamanho de um pequeno caminhão, juntamente com muitos sensores de tamanho proteico, vários manipuladores do tamanho de ribossomas, e componentes para memória e propulsão. Um volume total com dez metros de diâmetro — o tamanho de uma casa de três andares — contém todas estas peças e mais. Com peças do tamanho de berlindes a preencher este volume, a máquina de reparação consegue realizar operações complexas.

Mas este dispositivo de reparação não atua isoladamente. Tal como os seus inúmeros irmãos, está ligado a um computador maior por meio de canais mecânicos de dados com a largura do seu braço. Nesta escala, um computador de um micrómetro cúbico, com uma grande memória, ocupa um volume com trinta andares de altura e tão largo como um campo de futebol. Os dispositivos de reparação transmitem-lhe informações, e ele devolve instruções gerais. Objetos tão grandes e complexos continuam a ser suficientemente pequenos: nesta escala, a própria célula tem um quilómetro de diâmetro, contendo mil vezes o volume de um computador de um micrómetro cúbico, ou um milhão de vezes o volume de um único dispositivo de reparação. As células são espaçosas.

Serão estas máquinas capazes de fazer tudo o que for necessário para reparar as células? As máquinas moleculares existentes demonstram a capacidade de viajar através dos tecidos, entrar nas células, reconhecer estruturas moleculares e assim por diante, mas outros requisitos também são importantes. As máquinas de

reparação funcionarão com rapidez suficiente? Se funcionarem, desperdiçarão tanta energia ao ponto de queimar o doente?

As reparações mais extensas não podem exigir muito mais trabalho do que construir uma célula de raiz. No entanto, a maquinaria molecular que atua dentro de um volume celular faz rotineiramente exatamente isso, construindo uma nova célula em dezenas de minutos (nas bactérias) a algumas horas (nos mamíferos). Isto indica que a maquinaria de reparação que ocupa uma pequena percentagem do volume de uma célula será capaz de completar até mesmo reparações extensas num tempo razoável — dias ou semanas, no máximo. As células podem poupar esse espaço. Até as células cerebrais ainda podem funcionar quando um resíduo inerte chamado lipofuscina (aparentemente um produto de dano molecular) preenche mais de dez por cento do seu volume⁷.

Alimentar os dispositivos de reparação será fácil: as células contêm naturalmente substâncias químicas que alimentam as nanomáquinas. A natureza também mostra que as máquinas de reparação podem ser arrefecidas: as células do seu corpo retrabalham-se continuamente e os animais jovens crescem rapidamente sem se cozinhare. Lidar com o calor de um nível semelhante de atividade por parte das máquinas de reparação não será um problema — ou pelo menos não será muito, se uma semana de suor for o preço da saúde.

Todas estas comparações entre as máquinas de reparação e os mecanismos biológicos existentes levantam a questão de saber se

estas máquinas serão capazes de melhorar o funcionamento da própria Natureza. A reparação do ADN oferece um exemplo claro.

Tal como uma “máquina de reparação de livros” analfabeta poderia reconhecer e reparar uma página rasgada, também as enzimas de reparação celulares conseguem reconhecer e reparar quebras e ligações cruzadas no ADN. No entanto, corrigir erros ortográficos (ou mutações) exigiria a capacidade de leitura. A Natureza não dispõe de tais mecanismos, mas eles serão fáceis de construir. Imaginemos três moléculas de ADN idênticas, cada uma com a mesma sequência de nucleótidos. Agora imaginemos que cada uma dessas cadeias sofreu mutações, com alguns nucleótidos alterados em locais dispersos. Cada cadeia continua a parecer normal, considerada isoladamente. Contudo, uma máquina de reparação poderá compará-las entre si, segmento a segmento, e identificar qualquer nucleótido que não coincida com os seus equivalentes. Alterar esse nucleótido discordante para coincidir com os outros dois permitirá então reparar o dano.

Este método falhará se duas cadeias sofrerem mutações no mesmo local. Imaginemos que o ADN de três células humanas foi severamente danificado — com milhares de mutações, cada célula passou a apresentar uma alteração em cada milhão de nucleótidos. A probabilidade de o nosso procedimento de correção a três cadeias falhar num dado ponto será então de cerca de uma em um milhão de milhões. No entanto, se compararmos cinco cadeias simultaneamente, essa probabilidade desce para uma em um milhão de milhões de milhões, e assim por diante⁸. Um dispositivo

que compare múltiplas cadeias tornará a probabilidade de erro incorrigível praticamente nula.

Na prática, as máquinas de reparação compararão moléculas de ADN provenientes de várias células, gerarão cópias corrigidas e utilizarão estas cópias como referência para revisão e reparação do ADN em todo o tecido⁹. Ao comparar várias cadeias, as máquinas de reparação superarão dramaticamente as enzimas reparadoras da Natureza.

Outros tipos de reparação exigirão informações diferentes, tanto sobre células saudáveis como sobre as diferenças entre estas e uma célula danificada específica. Os anticorpos identificam proteínas através do contato físico, e anticorpos adequadamente selecionados conseguem geralmente distinguir duas proteínas pelas suas formas e propriedades de superfície distintas. As máquinas de reparação identificarão as moléculas de modo semelhante¹⁰. Com um computador adequado e uma base de dados suficientemente rica, estas máquinas serão capazes de identificar proteínas através da leitura das respectivas sequências de aminoácidos.

Vejamos agora um sistema de reparação complexo e altamente capaz¹¹. Um volume de dois micrómetros cúbicos — cerca de 2/1000 do volume de uma célula típica — será suficiente para albergar um sistema de base de dados central capaz de:

1. Identificar rapidamente qualquer uma das cem mil proteínas humanas, analisando uma curta sequência de aminoácidos.
2. Identificar todas as outras moléculas complexas que ocorrem normalmente nas células.
3. Registrar o tipo e a posição de cada molécula de grande porte existente na célula.

Cada um dos dispositivos de reparação mais pequenos (possivelmente milhares dentro de uma célula) incluirá um computador de menor capacidade. Cada um destes computadores será capaz de realizar mais de mil operações computacionais no tempo que uma enzima típica leva a alterar uma única ligação molecular, pelo que a velocidade de processamento disponível parece ser mais do que suficiente. Como cada computador estará em comunicação com um computador de maior capacidade e com a base de dados central, também a memória disponível parece adequada¹². As máquinas de reparação celular disporão, assim, tanto das ferramentas moleculares de que necessitam como de "cérebros" suficientes para decidir como as utilizar.

Tamanha sofisticação será desnecessária (ou um "excesso de cura"?) para muitos problemas de saúde. Dispositivos que se limitem a reconhecer e destruir um determinado tipo de célula, por exemplo, serão suficientes para curar um cancro. Instalar uma rede de computadores em cada célula pode parecer tão

desproporcionado como cortar manteiga com uma motosserra — mas dispor de uma motosserra oferece a certeza de que até a manteiga mais rija poderá ser cortada. Parece preferível exagerar do que omitir, quando o objetivo é descrever os limites do que é possível na medicina.

4. Algumas Curas

As aplicações médicas mais simples das nanomáquinas não envolverão reparação, mas sim destruição seletiva. Os cancros são um exemplo; as doenças infecciosas, outro. O objetivo é simples: basta reconhecer e destruir os replicadores perigosos — sejam bactérias, células cancerígenas, vírus ou vermes. De modo semelhante, crescimentos anómalos e depósitos nas paredes arteriais causam grande parte das doenças cardíacas; máquinas que os reconheçam, desfaçam e removam irão desobstruir as artérias, permitindo um fluxo sanguíneo mais normal. A destruição seletiva também curará doenças como o herpes, em que um vírus insere os seus genes no ADN da célula hospedeira. Um dispositivo de reparação entrará na célula, lerá o seu ADN e removerá a adição que se lê "herpes".

Reparar moléculas danificadas e entrelaçadas (cross-linked) será igualmente relativamente simples. Perante uma proteína danificada com ligações cruzadas, uma máquina de reparação celular começará por a identificar, analisando curtas sequências de aminoácidos, e depois consultará a sua estrutura correta numa base de dados. A máquina comparará então a proteína com esse modelo, aminoácido por aminoácido. Tal como um revisor deteta erros

ortográficos e caracteres estranhos (caract#res), identificará qualquer aminoácido alterado ou ligações cruzadas indevidas. Corrigindo estas falhas, restituirá uma proteína normal, pronta para desempenhar a sua função na célula.

As máquinas de reparação também irão auxiliar a cicatrização. Após um enfarte do miocárdio, o tecido cicatricial substitui o músculo morto. As máquinas de reparação estimularão o coração a gerar novo músculo, reajustando os mecanismos de controlo celular. Ao removerem o tecido cicatricial e orientarem o crescimento de novo tecido, guiarão a regeneração do coração.

Esta lista poderia continuar, problema após problema (Envenenamento por metais pesados? — Detetar e remover os átomos metálicos), mas a conclusão é fácil de resumir: as perturbações físicas resultam de átomos mal organizados; as máquinas de reparação serão capazes de os reorganizar adequadamente, restaurando a saúde do corpo. Em vez de se elaborar uma lista interminável de doenças curáveis (da artrite, bursite, cancro e dengue à febre-amarela, "calafrios de zinco" e volta ao início), faz mais sentido investigar os limites do que as máquinas de reparação celular podem fazer. Esses limites existem.

Consideremos, por exemplo, o acidente vascular cerebral (AVC), como um problema que danifica o cérebro. A prevenção será direta: Está um vaso sanguíneo no cérebro a enfraquecer, a dilatar-se e prestes a rebentar? Então, reposicioná-lo e guiar o crescimento de fibras de reforço. Há coágulos anómalos que ameaçam obstruir a circulação? Dissolvê-los e normalizar o sangue e o revestimento dos

vasos sanguíneos para evitar uma recorrência. Danos neurológicos moderados provocados por um AVC também serão reparáveis: se a circulação reduzida tiver prejudicado a função, mas não destruído a estrutura celular, então restaura-se a circulação e reparam-se as células, usando as suas estruturas como modelo para restaurar o tecido ao seu estado anterior. Isto não só restaurará a função de cada célula, como preservará as memórias e competências incorporadas nos padrões neuronais dessa zona do cérebro.

As máquinas de reparação serão ainda capazes de regenerar tecido cerebral novo mesmo quando os danos tiverem obliterado esses padrões. Contudo, o paciente perderá memórias e competências na medida em que estas estavam alojadas nessa parte do cérebro. Se os padrões neuronais únicos forem verdadeiramente obliterados, então nem as máquinas de reparação celular os poderão restaurar — tal como um conservador de arte não pode restaurar uma tapeçaria a partir de cinzas revolvidas. A perda de informação pela destruição da estrutura impõe o limite mais importante e fundamental à reparação do tecido.

Outras tarefas estarão para além das capacidades das máquinas de reparação celular, por razões distintas — manter a saúde mental, por exemplo. Naturalmente, estas máquinas serão capazes de corrigir alguns problemas. O pensamento perturbado, por vezes, tem causas bioquímicas, como se o próprio cérebro se estivesse a drogar ou a envenenar, e outros problemas derivam de danos no tecido. Mas muitos distúrbios têm pouco a ver com a saúde das células nervosas e tudo a ver com a saúde da mente.

Uma mente e o tecido do seu cérebro são como um romance e o papel do livro que o contém. Tinta entornada ou danos provocados por uma inundação podem danificar o livro, tornando difícil a leitura do romance. Máquinas de reparação de livros poderiam, ainda assim, restaurar a “saúde física” removendo a tinta estranha ou secando e reparando as fibras de papel danificadas. Esses tratamentos, porém, nada fariam pelo conteúdo do livro, que, num sentido real, é não físico. Se o livro fosse um romance barato com enredo bolorento e personagens vazias, as reparações necessárias não seriam à tinta e ao papel, mas ao romance em si. Isto exigiria não reparações físicas, mas mais trabalho do autor — talvez com algum aconselhamento.

Do mesmo modo, remover venenos do cérebro e reparar as suas fibras nervosas dissipará algumas névoas mentais, mas não reescreverá o conteúdo da mente. Essa transformação só pode ser feita pelo próprio paciente, com esforço; todos nós somos autores das nossas mentes. No entanto, como a mente muda a si mesma ao modificar o cérebro, possuir um cérebro saudável ajudará ao pensamento claro mais do que possuir um bom papel ajuda à escrita de qualidade.

Leitores familiarizados com computadores talvez prefiram pensar em termos de hardware e software. Uma máquina poderá reparar o hardware de um computador sem compreender ou alterar o seu software.

Tais máquinas podem interromper a atividade do computador, mas deixar intactos os padrões na memória, prontos a funcionar

novamente. Nos computadores com o tipo certo de memória (chamada “não volátil”), os utilizadores fazem isto simplesmente desligando a corrente. No cérebro, o processo parece mais complexo, mas poderão existir vantagens médicas em induzir um estado semelhante.

5. Anestesia Plus

Os médicos já interrompem e reiniciam a consciência ao interferirem na atividade química que sustenta a mente. Ao longo da vida ativa, máquinas moleculares no cérebro processam moléculas. Algumas desmontam açúcares, combinam-nos com oxigénio e capturam a energia libertada. Outras bombeiam iões de sal através das membranas celulares; outras ainda constroem pequenas moléculas e libertam-nas para sinalizar outras células. Estes processos constituem o metabolismo do cérebro — o conjunto total da sua atividade química. Juntamente com os seus efeitos elétricos, esta atividade metabólica sustenta os padrões mutáveis do pensamento.

Os cirurgiões cortam pessoas com bisturis. Em meados do século XIX, aprenderam a usar substâncias químicas que interferem no metabolismo cerebral, bloqueando o pensamento consciente e impedindo os pacientes de protestarem vigorosamente contra serem cortados. Estas substâncias químicas são os anestésicos. As suas moléculas entram e saem livremente do cérebro, permitindo aos anestesistas interromper e reiniciar a consciência humana.

Há muito tempo que se sonha com a descoberta de uma substância capaz de interferir no metabolismo de todo o corpo — uma substância que possa interromper completamente o metabolismo durante horas, dias ou anos. O resultado seria uma condição de biostase (*biostasis*, de *bio*, significando vida, e *stasis*, significando paragem ou estado estável). Um método para induzir uma biostase reversível poderia ajudar astronautas em longas viagens espaciais, permitindo poupar alimentos e evitar o tédio — ou até servir como uma forma de “viagem no tempo” unidirecional. Na medicina, a biostase proporcionaria uma anestesia profunda, dando aos médicos mais tempo para agir. Quando ocorressem emergências longe de ajuda médica, um bom procedimento de biostase serviria como um tratamento de primeiros socorros universal: estabilizaria a condição do paciente e impediria que as máquinas moleculares se descontrolassem, danificando os tecidos.

No entanto, ninguém descobriu ainda uma substância capaz de parar todo o metabolismo da mesma forma que os anestésicos param a consciência — isto é, de maneira reversível, bastando lavar o fármaco dos tecidos do paciente. Contudo, a biostase reversível tornar-se-á possível quando as máquinas de reparação estiverem disponíveis.

Para compreender como funcionaria uma das abordagens, imagine que a corrente sanguínea transporta dispositivos moleculares simples até aos tecidos, onde estes entram nas células. Aí, bloqueiam a maquinaria molecular do metabolismo — tanto no cérebro como noutras partes do corpo — e ligam as estruturas internas com ligações cruzadas estabilizadoras. Outros dispositivos

moleculares entram então em ação, deslocando a água e compactando-se solidamente em torno das moléculas da célula. Estes passos interrompem o metabolismo e preservam as estruturas celulares. Dado que serão utilizadas máquinas de reparação celular para reverter este processo, ele pode causar danos moleculares moderados sem provocar prejuízos duradouros. Com o metabolismo suspenso e as estruturas celulares mantidas firmemente no lugar, o paciente repousará silenciosamente, sem sonhos e sem mudanças, até que as máquinas de reparação restabeleçam a vida ativa.

Se um paciente neste estado fosse entregue a um médico dos nossos dias, ignorante das capacidades das máquinas de reparação celular, as consequências seriam provavelmente nefastas. Perante a ausência de sinais vitais, o médico concluiria que o paciente estaria morto, e tornaria essa conclusão uma realidade ao “prescrever” uma autópsia, seguida de sepultamento ou cremação.

Mas o nosso paciente imaginário vive numa Era em que a biostase é compreendida como uma mera interrupção da vida, e não como o seu fim. Quando o contrato do paciente indicar “acordame!” (ou quando as reparações estiverem concluídas, ou a viagem interestelar tiver terminado), o médico responsável inicia a reanimação. As máquinas de reparação penetram nos tecidos do paciente, removendo o material de empacotamento em torno das suas moléculas e substituindo-o por água. Em seguida, eliminam as ligações cruzadas, reparam quaisquer moléculas ou estruturas danificadas e restabelecem as concentrações normais de sais, açúcar no sangue, ATP, entre outros. Por fim, desbloqueiam a

maquinaria metabólica. Os processos metabólicos interrompidos são retomados, o paciente boceja, espreguiça-se, senta-se, agradece ao médico, verifica a data e sai pela porta.

6. Da Função à Estrutura

A reversibilidade da biostase e a irreversibilidade dos danos causados por um AVC grave ajudam a ilustrar de que forma as máquinas de reparação celular irão transformar a medicina. Hoje em dia, os médicos apenas conseguem ajudar os tecidos a curarem-se a si mesmos. Por essa razão, têm de tentar preservar a função do tecido. Se os tecidos não conseguirem funcionar, também não conseguirão regenerar-se. Pior ainda, se não forem preservados, entra-se num processo de deterioração que acaba por obliterar a própria estrutura. É como se as ferramentas de um mecânico só funcionassem num motor em funcionamento.

As máquinas de reparação celular alteram este requisito central: deixa de ser essencial preservar a função e passa a ser essencial preservar a estrutura. Como referi anteriormente ao discutir o AVC, as máquinas de reparação poderão restaurar a função cerebral — com a memória e as competências intactas — apenas se a estrutura distintiva do tecido neural permanecer intacta. A biostase envolve precisamente a preservação da estrutura neural, bloqueando deliberadamente a sua função.

Tudo isto decorre diretamente da natureza molecular das reparações. Médicos que utilizam apenas bisturis e medicamentos

não conseguem reparar células, tal como alguém que tenha apenas uma picareta e uma lata de óleo não conseguirá reparar um relógio de precisão. Em contraste, dispor de máquinas de reparação e de nutrientes comuns será como ter as ferramentas de um relojoeiro e um fornecimento ilimitado de peças sobressalentes. As máquinas de reparação celular mudarão a medicina na sua base.

7. Do Tratamento de Doenças ao Estabelecimento da Saúde

Os investigadores médicos estudam atualmente as doenças, procurando muitas vezes formas de as prevenir ou reverter, bloqueando uma etapa-chave no processo patológico. O conhecimento resultante tem ajudado bastante os médicos: hoje prescrevem insulina para compensar a diabetes, anti-hipertensores para prevenir AVCs, penicilina para curar infeções, e assim por diante numa lista impressionante. As máquinas moleculares auxiliarão o estudo das doenças, mas tornarão a compreensão das doenças muito menos importante. As máquinas de reparação tornarão mais importante a compreensão da saúde.

O corpo pode estar doente de mais maneiras do que pode estar saudável. O tecido muscular saudável, por exemplo, varia em relativamente poucos aspetos: pode ser mais forte ou mais fraco, mais rápido ou mais lento, ter este ou aquele antigénio, e por aí fora. O tecido muscular danificado pode variar em todas essas dimensões, mas também sofrer de qualquer combinação de distensões, ruturas, infeções virais, vermes parasitas, contusões,

perfurações, envenenamentos, sarcomas, doenças degenerativas ou anomalias congénitas. De forma semelhante, embora os neurónios estejam entrelaçados em tantos padrões quanto há cérebros humanos, as sinapses e dendrites individuais existem apenas dentro de uma gama modesta de formas — se estiverem saudáveis.

Uma vez que os biólogos tenham descrito as moléculas, células e tecidos normais, as máquinas de reparação adequadamente programadas serão capazes de curar mesmo doenças desconhecidas. Uma vez descrito o intervalo de estruturas que (por exemplo) um fígado saudável pode apresentar, as máquinas de reparação que examinem um fígado disfuncional apenas terão de procurar diferenças e corrigi-las. Máquinas que desconheçam um novo veneno e os seus efeitos ainda assim o reconhecerão como corpo estranho e irão removê-lo. Em vez de combaterem um milhão de doenças estranhas, as máquinas de reparação avançadas irão estabelecer um estado de saúde.

Desenvolver e programar máquinas de reparação celular exigirá grande esforço, conhecimento e competência. As máquinas de reparação com amplas capacidades parecem mais fáceis de construir do que de programar. Os seus programas terão de conter conhecimento detalhado sobre centenas de tipos de células e centenas de milhares de tipos de moléculas presentes no corpo humano. Terão de ser capazes de mapear estruturas celulares danificadas e decidir como as corrigir¹³. Quanto tempo levará a desenvolver tais máquinas e programas? À primeira vista, o estado atual da bioquímica e a sua taxa de progresso poderiam sugerir que

só a recolha do conhecimento básico levará séculos. Mas devemos estar atentos à ilusão de que os avanços ocorrerão de forma isolada.

As máquinas de reparação surgirão numa vaga de outras tecnologias. Os montadores (assemblers) que as construirão serão utilizados primeiro para criar instrumentos de análise da estrutura celular. Mesmo um pessimista poderá concordar que biólogos e engenheiros humanos equipados com essas ferramentas poderiam construir e programar máquinas avançadas de reparação celular num século de trabalho contínuo. Um pessimista confiante e visionário poderá afirmar que levaria mil anos. Um cético verdadeiramente convicto poderá declarar que a tarefa exigiria um milhão de anos. Muito bem: sistemas técnicos de inteligência artificial — um milhão de vezes mais rápidos do que cientistas e engenheiros — desenvolverão então máquinas avançadas de reparação celular num único ano civil¹⁴.

8. Uma Doença Chamada "Envelhecimento"

O envelhecimento é natural, mas também o eram a varíola e os nossos esforços para a prevenir. Conquistámos a varíola, e parece que iremos conquistar o envelhecimento.

A longevidade aumentou durante o século passado, mas sobretudo porque uma melhor higiene e o uso de fármacos reduziram as doenças bacterianas. A esperança de vida básica do ser humano aumentou pouco.

Ainda assim, os investigadores têm feito progressos no sentido de compreender e abrandar o processo de envelhecimento. Identificaram algumas das suas causas, como as ligações cruzadas descontroladas. Desenvolveram tratamentos parciais, como os antioxidantes e os inibidores de radicais livres. Propuseram e estudaram outros mecanismos de envelhecimento, como “relógios” dentro das células e alterações no equilíbrio hormonal do corpo. Em experiências laboratoriais, fármacos e dietas especiais aumentaram a esperança de vida de ratos entre 25 a 45 por cento¹⁵.

Este tipo de trabalho continuará; à medida que a geração do baby boom envelhece, espera-se um boom na investigação sobre o envelhecimento. Uma empresa de biotecnologia, a Senetek da Dinamarca, especializa-se em investigação sobre o envelhecimento. Em Abril de 1985, foi noticiado que a Eastman Kodak e a ICN Pharmaceuticals se associaram numa parceria de 45 milhões de dólares para produzir Isoprinosina e outros medicamentos com potencial para prolongar a vida¹⁶. Os resultados da investigação antienvelhecimento convencional poderão, nas próximas duas décadas, aumentar substancialmente a longevidade humana — e melhorar a saúde dos mais velhos. Mas quanto poderão realmente os fármacos, a cirurgia, o exercício e a dieta prolongar a vida? Por agora, essas estimativas permanecem no domínio da especulação. Só novo conhecimento científico poderá resgatar tais previsões do reino da adivinhação, porque dependem de nova ciência¹⁷, e não apenas de nova engenharia.

Com máquinas de reparação celular, no entanto, o potencial de extensão da vida torna-se claro. Elas serão capazes de reparar

células enquanto as suas estruturas distintivas permanecerem intactas, e de substituir células que tenham sido destruídas. Em ambos os casos, restaurarão a saúde. O envelhecimento não é fundamentalmente diferente de qualquer outro distúrbio físico; não é um efeito mágico da passagem do tempo sobre uma misteriosa força vital. Ossos frágeis, pele enrugada, baixa atividade enzimática, cicatrização lenta, fraca memória e tudo o mais resultam de maquinaria molecular danificada, desequilíbrios químicos e estruturas desorganizadas. Ao restaurar todas as células e tecidos do corpo a uma estrutura jovem, as máquinas de reparação irão restaurar a saúde da juventude.

As pessoas que sobreviverem intactas até à época das máquinas de reparação celular terão a oportunidade de recuperar a saúde da juventude e de a manter quase durante o tempo que desejarem. Nada pode fazer com que uma pessoa (ou qualquer outra coisa) dure para sempre, claro, mas, salvo acidentes graves, aqueles que assim o quiserem viverão durante muito, muito tempo.

À medida que uma tecnologia se desenvolve, chega um momento em que os seus princípios se tornam claros e, com eles, muitas das suas consequências. Os princípios da astronáutica estavam já claros na década de 1930, e com eles a consequência inevitável da viagem espacial. Preencher os detalhes implicou conceber e testar tanques, motores, instrumentos e assim por diante. No início da década de 1950, muitos desses detalhes eram já conhecidos. O antigo sonho de voar até à Lua tornara-se um objetivo plausível, algo para o qual se podia planear.

Os princípios das máquinas moleculares estão já claros, e com eles a consequência inevitável das máquinas de reparação celular. Preencher os detalhes implicará conceber ferramentas moleculares, montadores (assemblers), computadores e afins — mas muitos dos detalhes das máquinas moleculares existentes já são hoje conhecidos. O antigo sonho de alcançar saúde e longevidade tornou-se um objetivo que se pode planejar.

A investigação médica está a conduzir-nos, passo a passo, por um caminho em direção à maquinaria molecular. A competição global para criar melhores materiais, eletrónica e ferramentas bioquímicas está a empurrar-nos na mesma direção. As máquinas de reparação celular levarão anos a ser desenvolvidas, mas estão no horizonte, pela frente.

Elas trarão muitas capacidades — tanto para o bem como para o mal. Um breve momento de reflexão sobre replicadores militares com capacidades semelhantes às das máquinas de reparação celular é suficiente para evocar possibilidades nauseantes. Mais adiante descreverei como poderemos evitar tais horrores, mas primeiro parece sensato considerar os alegados benefícios das máquinas de reparação celular. O seu bem aparente será mesmo um bem? De que modo poderá a vida longa afetar o mundo?

CAPÍTULO 8

Vida Longa num Mundo Aberto

O longo hábito de viver indis põe-nos para morrer.

— Sir THOMAS BROWNE

AS MÁQUINAS DE REPARAÇÃO CELULAR levantam questões relativas ao valor de prolongar a vida humana. Estas não são as questões habituais da ética médica contemporânea, que frequentemente envolvem dilemas colocados por tratamentos escassos, dispendiosos e de eficácia limitada. São, antes, questões que dizem respeito ao valor de vidas longas e saudáveis alcançadas por meios económicos.

Para as pessoas que valorizam a vida humana e gostam de viver, tais questões podem nem necessitar de resposta. Mas, após uma década marcada por preocupações com o crescimento populacional, a poluição e o esgotamento dos recursos, muitas pessoas poderão questionar a desejabilidade do prolongamento da vida; tais preocupações fomentaram a disseminação de memes pró-morte. Esses memes devem ser reavaliados, pois muitos têm raízes numa visão do mundo obsoleta. A nanotecnologia transformará muito mais do que apenas a esperança de vida humana.

Ganharemos os meios não só para nos curarmos a nós próprios, mas também para curar a Terra das feridas que lhe infligimos. Como salvar vidas aumentará o número de seres vivos, o prolongamento da vida levanta questões sobre o impacto de haver mais pessoas. A nossa capacidade de regenerar o planeta diminuirá uma das causas dessa controvérsia.

Ainda assim, as próprias máquinas de reparação celular irão, com certeza, provocar polémica. Elas abalam pressupostos tradicionais sobre os nossos corpos e sobre os nossos futuros — o que faz com que a dúvida seja reconfortante. Exigirão várias descobertas científicas de grande importância — o que torna fácil duvidar da sua viabilidade. Dado que a possibilidade (ou impossibilidade) de máquinas de reparação celular levanta questões relevantes, faz sentido considerar as possíveis objeções que poderão ser levantadas.

1. Por Que *Não* Máquinas de Reparação de Células?

Que tipo de argumento poderia sugerir que as máquinas de reparação celular são impossíveis? Um argumento bem-sucedido teria de realizar algumas contorções mentais curiosas. Teria de sustentar, de algum modo, que máquinas moleculares não podem construir nem reparar células, ao mesmo tempo que reconhece que as máquinas moleculares nos nossos corpos o fazem todos os dias. Um dilema cruel para o cético convicto! É verdade que as máquinas artificiais terão de fazer o que as naturais não conseguem, mas isso não implica que tenham de fazer algo qualitativamente novo. Tanto os dispositivos de reparação naturais como os artificiais terão de

alcançar, identificar e reconstruir estruturas moleculares. Conseguiremos, por exemplo, melhorar as enzimas naturais de reparação de ADN apenas comparando várias cadeias de ADN em simultâneo — o que demonstra que a natureza claramente não descobriu todos os truques. Dado que este exemplo invalida qualquer argumento geral de que as máquinas de reparação não podem superar a natureza, parece difícil construir um bom caso contra elas.

Ainda assim, duas questões merecem uma resposta direta. Primeiro: por que razão deveremos esperar alcançar uma vida longa nas próximas décadas, quando as pessoas tentam — e falham — há milénios? Segundo: se de facto conseguimos usar máquinas de reparação celular para prolongar a vida, então por que é que a natureza (que repara células há milhares de milhões de anos) ainda não as aperfeiçoou?

2. AS PESSOAS TENTARM — E FALHARAM

Durante séculos, a humanidade ansiou por escapar à brevidade da vida. De tempos a tempos, surgia um Ponce de León ou um curandeiro a prometer uma poção milagrosa, mas nunca funcionou. Estas estatísticas de fracasso convenceram algumas pessoas de que, como todas as tentativas falharam, todas falharão sempre. Dizem: “Envelhecer é natural” — e para elas, isso basta como justificação. Os avanços médicos poderão ter abalado estas convicções, mas esses avanços reduziram sobretudo a mortalidade precoce, sem realmente estender o limite máximo da longevidade.

Mas agora os bioquímicos começaram a estudar as máquinas que constroem, reparam e controlam as células. Aprenderam a montar vírus e a reprogramar bactérias. Pela primeira vez na história, estamos a examinar as nossas moléculas e a desvendar os segredos moleculares da vida. Parece inevitável que os engenheiros moleculares venham a combinar o conhecimento bioquímico com máquinas moleculares avançadas, aprendendo assim a reparar tecidos danificados e a rejuvenescer a sua estrutura. Não há nada de estranho nisto — o que seria estranho, isso sim, seria que tais conhecimentos e capacidades poderosos não resultassem em transformações dramáticas. As imensas estatísticas de fracassos passados são simplesmente irrelevantes, porque nunca antes tentámos construir máquinas de reparação celular.

3. A NATUREZA TENTOU — E FALHOU

A natureza tem vindo a construir máquinas de reparação celular. A evolução tem experimentado com animais multicelulares durante centenas de milhões de anos, e, ainda assim, todos os animais envelhecem e morrem — porque as nanomáquinas da natureza reparam as células de forma imperfeita. Por que haveriam ser possíveis melhorias?

Os ratos amadurecem em poucos meses, e envelhecem e morrem em cerca de dois anos — no entanto, os seres humanos evoluíram para viver mais de trinta vezes esse tempo. Se o prolongamento da vida fosse o principal objetivo da evolução, então os ratos também viveriam mais tempo. Mas a durabilidade tem custos¹: reparar células exige investimento de energia, materiais e

máquinas de reparação. Os genes dos ratos conduzem os seus corpos a investir num crescimento rápido e em reprodução, e não numa autorreparação minuciosa. Um rato que demorasse a atingir a maturidade reprodutiva correria maior risco de ser comido por um gato antes disso. Os genes dos ratos prosperaram tratando os corpos dos ratos como descartáveis. Do mesmo modo, os genes humanos também descartam os seres humanos, embora apenas após uma vida dezenas de vezes mais longa do que a de um rato.

Mas os reparos defeituosos não são a única causa do envelhecimento. Os genes transformam células-ovo em adultos através de um padrão de desenvolvimento que avança a um ritmo relativamente constante. Este padrão é bastante consistente porque a evolução raramente altera um projeto básico. Tal como o padrão fundamental do sistema ADN-RNA-proteína ficou cristalizado há vários milhares de milhões de anos, também o padrão de sinais químicos e respostas dos tecidos que guia o desenvolvimento dos mamíferos se fixou há muitos milhões de anos. Esse processo parece incluir um “relógio”, programado para correr a velocidades diferentes em diferentes espécies, e um programa que eventualmente se esgota.

Seja qual for a causa do envelhecimento, a evolução teve poucas razões para a eliminar. Se os genes criassem indivíduos capazes de se manter saudáveis durante milénios, isso traria pouco benefício na sua “tentativa” de replicação. A maioria dos indivíduos morreria jovem de fome, predação, acidentes ou doenças. Como observou Sir Peter Medawar, um gene que beneficie os jovens (mais numerosos) mas prejudique os velhos (mais escassos) replicar-se-

á eficazmente, espalhando-se assim pela população². Se se acumularem genes suficientes com este perfil, os animais acabam por ficar programados para morrer.

Experiências do Dr. Leonard Hayflick sugerem que as células contêm “relógios” que contam as divisões celulares e fazem parar esse processo quando o número se torna demasiado elevado³. Um mecanismo deste tipo pode ser útil aos animais jovens⁴: se alterações cancerígenas fizerem uma célula dividir-se demasiado depressa, mas sem destruírem o seu relógio, então essa célula poderá formar um tumor de dimensão limitada. O relógio, assim, evitaria o crescimento ilimitado de um verdadeiro cancro. No entanto, esses mesmos relógios podem prejudicar os animais mais velhos ao impedirem a divisão de células normais, interrompendo a renovação dos tecidos⁵. O animal, por conseguinte, beneficiaria de menores taxas de cancro enquanto jovem, mas teria motivos de queixa se vivesse até à velhice. Contudo, os seus genes não ouvirão — terão já “saltado do navio”, na forma de cópias passadas à geração seguinte. Com máquinas de reparação celular, poderemos redefinir esses relógios. Nada indica que a evolução tenha aperfeiçoado os nossos corpos, mesmo segundo o critério bruto da sobrevivência e reprodução. Os engenheiros não ligam computadores com fibras lentas como os nervos, nem constroem máquinas a partir de proteínas moles — e por boas razões. A evolução genética (ao contrário da evolução memética) não tem conseguido saltar para novos materiais ou sistemas, limitando-se a refinar e expandir os antigos.

As máquinas de reparação das células ficam muito aquém dos limites do que é possível — nem sequer têm computadores a dirigi-las. A ausência de nanocomputadores nas células mostra apenas que os computadores não puderam (ou simplesmente não conseguiram) evoluir gradualmente a partir de outras máquinas moleculares. A natureza falhou em construir as melhores máquinas de reparação celular possíveis, mas há boas razões para isso.

4. Curar e Proteger a Terra

O fracasso dos sistemas biológicos da Terra em adaptarem-se à revolução industrial é também fácil de compreender. Da desflorestação às dioxinas, temos causado danos mais depressa do que a evolução consegue responder. À medida que procurámos mais alimentos, bens e serviços, o nosso uso de tecnologias em grande escala obrigou-nos a continuar a causar esses danos. Com a tecnologia do futuro, porém, poderemos fazer mais bem a nós próprios, causando simultaneamente menos mal ao planeta. Além disso, seremos capazes de construir máquinas de regeneração planetária para corrigir os estragos já feitos. As células não serão tudo o que quereremos reparar.

Consideremos o problema dos resíduos tóxicos. Estejam no ar, no solo ou na água, os resíduos preocupam-nos porque podem prejudicar os sistemas vivos. Mas quaisquer materiais que entrem em contato com a maquinaria molecular da vida podem, por sua vez, ser alcançados por outras formas de maquinaria molecular. Isto significa que poderemos conceber máquinas de limpeza

capazes de remover estes venenos onde quer que possam prejudicar a vida⁶.

Alguns resíduos, como a dioxina, são compostos por moléculas perigosas formadas por átomos inofensivos. As máquinas de limpeza poderão neutralizá-los reorganizando os seus átomos. Outros resíduos, como o chumbo e os isótopos radioativos, contêm átomos perigosos. As máquinas de limpeza recolherão esses átomos para eliminação através de vários métodos possíveis. O chumbo provém das rochas da Terra; os montadores (assemblers) poderão integrá-lo novamente nas rochas das minas de onde foi extraído. Os isótopos radioativos também poderão ser isolados dos organismos vivos, quer através da sua incorporação em formações rochosas estáveis, quer por meios mais drásticos. Utilizando sistemas de transporte espacial baratos e fiáveis, poderíamos enterrá-los na rocha morta e seca da Lua. Utilizando nanomáquinas, poderíamos selá-los em contentores autorreparáveis e autosselantes do tamanho de colinas, alimentados pela luz solar dos desertos. Estes seriam mais seguros do que qualquer rocha ou recipiente passivo.

Com montadores autorreplicantes, seremos até capazes de remover os milhares de milhões de toneladas de dióxido de carbono que a nossa civilização, baseada na queima de combustíveis, despejou na atmosfera. Os climatologistas preveem que o aumento dos níveis de dióxido de carbono, ao reter a energia solar, derreterá parcialmente as calotas polares, elevando o nível do mar e inundando as zonas costeiras algures a meio do próximo século. No entanto, montadores replicantes tornarão a energia solar

suficientemente barata para eliminar a necessidade de combustíveis fósseis⁷. Tal como as árvores, nanomáquinas alimentadas a energia solar poderão extrair dióxido de carbono do ar e separar o oxigénio⁸. Mas, ao contrário das árvores, poderão desenvolver raízes de armazenamento profundas e devolver o carbono às jazidas de carvão e campos petrolíferos de onde foi retirado.

As futuras máquinas de regeneração planetária ajudar-nos-ão também a reparar paisagens devastadas e restaurar ecossistemas danificados. A mineração rasgou e cavou a Terra; o descuido encheu-a de lixo. O combate aos incêndios florestais permitiu o crescimento excessivo do sub-bosque, substituindo a abertura majestosa das florestas antigas por mato denso que alimenta fogos mais perigosos. Usaremos robôs sofisticados e de baixo custo para reverter estes e outros efeitos. Capazes de mover pedras e solo, voltarão a moldar terrenos devastados. Capazes de remover vegetação indesejada e digeri-la, simularão os efeitos de limpeza dos incêndios florestais naturais, mas sem perigo nem destruição. Capazes de levantar e deslocar árvores, desbastarão áreas sobrepovoadas e reflorestarão colinas áridas. Faremos dispositivos do tamanho de esquilos com apetite por lixo antigo. Faremos dispositivos semelhantes a árvores, com raízes que se espalham profundamente e purificam o solo de pesticidas e excesso de acidez. Faremos pequenos dispositivos do tamanho de insetos, semelhantes a líquenes, que limpam superfícies e removem restos de tinta. Faremos todos os dispositivos de que precisarmos para limpar a confusão deixada pela civilização do século XX.

Depois da limpeza, reciclaremos a maioria destas máquinas, mantendo apenas aquelas que ainda forem necessárias para proteger o ambiente de uma civilização mais limpa baseada na tecnologia molecular. Estes dispositivos de uso mais duradouro irão complementar os ecossistemas naturais sempre que necessário, para equilibrar e curar os efeitos da presença humana. Para os tornar eficazes, inofensivos e discretos, será necessário um ofício que exija não apenas engenharia automatizada, mas também conhecimento da natureza e um sentido de arte.

Com a tecnologia de reparação celular, poderemos até trazer de volta algumas espécies aparentemente extintas. A *quagga* africana — um animal semelhante a uma zebra — extinguiu-se há mais de um século, mas uma pele de *quagga* preservada em sal sobreviveu num museu alemão. Alan Wilson, da Universidade da Califórnia em Berkeley, e os seus colaboradores usaram enzimas para extrair fragmentos de ADN a partir de tecido muscular ligado a essa pele⁹. Clonaram os fragmentos em bactérias, compararam-nos com o ADN da zebra e descobriram (como era de esperar) que os genes revelavam uma estreita relação evolutiva. Conseguiram também extrair e replicar ADN de uma pele de bisão com mais de um século e de mamutes com milhares de anos preservados no permafrost ártico. Este êxito está ainda muito longe de clonar uma célula ou organismo inteiro — clonar um único gene deixa cerca de 100.000 por clonar, e clonar todos os genes ainda não repara uma única célula — mas demonstra que o material hereditário destas espécies ainda sobrevive.

Como descrevi no capítulo anterior, máquinas capazes de comparar várias cópias danificadas de uma molécula de ADN poderão reconstruir o original intacto — e os milhares de milhões de células numa pele seca contêm milhares de milhões de cópias. A partir dessas cópias, poderemos reconstruir ADN sem danos e, em torno desse ADN, poderemos construir células intactas do tipo que desejarmos. Algumas espécies de insetos passam o Inverno sob a forma de células de ovo, para renascer com o calor da Primavera. Estas espécies “extintas” atravessarão o século XX sob a forma de células de pele e músculo, para depois serem convertidas em óvulos férteis e reavivadas por máquinas de reparação celular.

A Dra. Barbara Durrant, fisiologista reprodutiva do Jardim Zoológico de San Diego, está a preservar amostras de tecido de espécies ameaçadas num congelador criogénico. O retorno pode ser maior do que a maioria das pessoas atualmente imagina. Preservar apenas amostras de tecido não preserva a vida de um animal ou de um ecossistema, mas preserva o património genético da espécie em causa. Seríamos imprudentes se não aproveitássemos esta apólice de seguro contra a perda permanente de espécies. A perspetiva de máquinas de reparação celular, portanto, já afeta as nossas escolhas atuais.

A extinção não é um problema novo. Há cerca de 65 milhões de anos, a maioria das espécies então existentes desapareceu, incluindo todas as espécies de dinossauros. No “livro de pedra” da Terra, a história dos dinossauros termina numa página composta por uma fina camada de argila. Essa argila é rica em irídio, um

elemento comum em asteróides e cometas. A melhor teoria atual indica que uma explosão vinda do céu destruiu a biosfera terrestre. Com a energia de cem milhões de megatoneladas de TNT, espalhou poeira e um “Inverno asteroidal” por todo o planeta.

Desde que as células vivas se uniram para formar vermes, a Terra já sofreu cinco grandes extinções. Apenas há 34 milhões de anos — cerca de 30 milhões de anos após a morte dos dinossauros — uma camada de esferas vítreas sedimentou-se no fundo do mar. Acima dessa camada, os fósseis de muitas espécies desaparecem. Essas esferas congelaram a partir dos salpicos derretidos de um impacto.

A Cratera do Meteoro, no Arizona, testemunha uma explosão mais pequena e recente, com a força de uma bomba de quatro megatoneladas. E, tão recentemente quanto 30 de junho de 1908, uma bola de fogo rasgou o céu da Sibéria e arrasou a floresta numa área de cem quilómetros de diâmetro.

Como há muito se suspeita, os dinossauros morreram porque eram estúpidos. Não que fossem demasiado estúpidos para se alimentarem, caminharem ou protegerem os seus ovos — sobreviveram durante 140 milhões de anos — mas eram apenas demasiado estúpidos para construírem telescópios capazes de detetar asteróides, ou naves espaciais capazes de os desviar da colisão com a Terra. O espaço ainda tem mais rochas para nos lançar, mas estamos a dar sinais de ter inteligência suficiente para lidar com isso. Quando a nanotecnologia e a engenharia automatizada nos fornecerem uma tecnologia espacial mais

avançada, será fácil detetar e desviar asteróides; na verdade, já o poderíamos fazer com a tecnologia atualmente disponível. Podemos, ao mesmo tempo, curar a Terra e protegê-la.

5. Longevidade e Pressão Populacional

As pessoas procuram geralmente vidas longas e saudáveis, mas a perspectiva de um sucesso dramático pode ser inquietante. Será que uma maior longevidade poderá prejudicar a qualidade de vida? De que forma é que a possibilidade de uma vida prolongada afetará os problemas imediatos que enfrentamos? Embora a maioria dos efeitos não possa ser prevista, alguns são já discerníveis.

Por exemplo, à medida que as máquinas de reparação celular prolongarem a vida, aumentarão também a população. Se tudo o resto se mantivesse igual, mais pessoas significaria mais superlotação, poluição e escassez — mas tudo o resto não se manterá igual: os próprios avanços na engenharia automatizada e na nanotecnologia, que trarão as máquinas de reparação celular, ajudar-nos-ão também a curar a Terra, protegê-la e a viver de forma mais leve sobre ela. Seremos capazes de produzir os nossos bens essenciais e os nossos luxos sem poluir o ar, a terra ou a água. Poderemos obter recursos e fabricar objetos sem deixar cicatrizes na paisagem com minas ou entulhá-la com fábricas. Com montadores eficientes a fabricar produtos duráveis, produziremos bens de maior valor com menos desperdício. Mais pessoas poderão habitar a Terra, causando menos danos ao planeta — e umas às outras, se conseguirmos, de algum modo, usar as nossas novas capacidades com fins benéficos.

Se alguém visse o céu noturno como um muro negro e esperasse que a corrida tecnológica parasse de forma educada, seria natural temer que pessoas com vidas longas se tornassem um fardo para o "mundo pobre e sobrelotado dos nossos filhos". Este medo nasce da ilusão de que a vida é um jogo de soma nula, em que mais pessoas significam apenas dividir uma tarte pequena em fatias cada vez mais finas. No entanto, quando formos capazes de reparar células, também seremos capazes de construir montadores replicadores e naves espaciais de excelência. Os nossos "pobres" descendentes partilharão um mundo do tamanho do sistema solar, com matéria, energia e espaço habitável em quantidade tal que faz a Terra parecer minúscula.

Isto abrirá espaço suficiente para uma Era de crescimento e prosperidade sem precedentes. Contudo, o próprio sistema solar é finito, e as estrelas estão distantes. Na Terra, mesmo as indústrias mais limpas, baseadas em montadores moleculares, produzirão calor residual. A preocupação com a população e os recursos continuará a ser importante, pois o crescimento exponencial de replicadores (como os seres humanos) poderá eventualmente ultrapassar qualquer base de recursos finita.

Mas será que isto significa que deveríamos sacrificar vidas para adiar o colapso? Algumas pessoas poderão oferecer-se voluntariamente, mas pouco bem farão. Na verdade, o prolongamento da vida terá pouco impacto sobre o problema de base: o crescimento exponencial continuará a ser exponencial, quer as pessoas morram jovens ou vivam indefinidamente. Um mártir, ao morrer precocemente, poderia adiar a crise por uma fração de

segundo — mas uma pessoa moderadamente dedicada poderia contribuir mais ao juntar-se a um movimento de indivíduos longevos empenhados em resolver este problema de longo prazo. Afinal, muitos têm ignorado os limites do crescimento na Terra. Quem, senão os que vivem muito tempo, se preparará para os limites — mais firmes, mas mais distantes — do crescimento no mundo para além da Terra? Aqueles que se preocupam com os limites de longo alcance servirão melhor a humanidade permanecendo vivos, para manter viva essa preocupação.

A vida longa também levanta a ameaça da estagnação cultural. Se este fosse um problema inevitável da longevidade, não está claro o que se poderia fazer a respeito — metralhar os idosos por manterem opiniões firmes, talvez? Felizmente, dois fatores contribuirão para reduzir esse risco. Em primeiro lugar, num mundo com uma fronteira aberta, os mais jovens poderão partir, construir novos mundos, testar novas ideias e, depois, ou convencer os mais velhos a mudar, ou deixá-los para trás. Em segundo lugar, pessoas com muitos anos de vida serão jovens em corpo e cérebro. O envelhecimento abrandava tanto a aprendizagem como o pensamento, tal como abrandava outros processos físicos; o rejuvenescimento voltará a acelerá-los. Tal como músculos e tendões juvenis tornam os corpos mais flexíveis, talvez tecidos cerebrais jovens mantenham as mentes também mais flexíveis — mesmo quando saturadas de muitos anos de sabedoria.

6. Os Efeitos da Antecipação

A longevidade não será o maior dos problemas do futuro. Poderá até ajudar a resolvê-los.

Consideremos o seu efeito sobre a disposição das pessoas para iniciar guerras. O envelhecimento e a morte tornaram o massacre em combate mais aceitável: como escreveu Homero, pela voz de Sarpédon, herói de Troia:

Ó meu amigo, se pudéssemos, ao abandonar esta guerra, escapar à velhice e à morte, então eu não estaria aqui a combater na linha da frente; mas agora, como muitas são as formas de morte que pairam sobre nós e que ninguém pode esperar evitar, avancemos, pois, e demos glória a outros homens, ou ganhemo-la para nós mesmos.¹⁰

Contudo, se a esperança de escapar à velhice e à morte afastar as pessoas da guerra, será isso um bem? Poderá desencorajar guerras pequenas que, de outro modo, poderiam escalar até ao holocausto nuclear. Mas, da mesma forma, poderá enfraquecer a nossa determinação em defender-nos de uma opressão vitalícia — caso não tenhamos em conta quanto mais tempo de vida teremos para defender. A relutância dos outros em morrer por poder alheio ajudará.

As expectativas moldam sempre as ações. As nossas instituições e planos pessoais refletem a expectativa de que todos os adultos hoje vivos morrerão dentro de poucas décadas. Consideremos como essa crença alimenta o impulso de acumular, de ignorar o futuro em busca de um prazer fugaz. Consideremos como nos cega perante o porvir e obscurece os benefícios de longo prazo da cooperação. Erich Fromm escreve:

Se o indivíduo vivesse quinhentos ou mil anos, este conflito (entre os seus interesses e os da sociedade) talvez não existisse, ou pelo menos fosse consideravelmente reduzido. Poderia então viver e colher com alegria aquilo que semeou com sofrimento; o padecimento de um período histórico que dará fruto no seguinte poderia dar fruto também para ele.

Se as pessoas continuarão ou não a viver centradas no presente é uma questão secundária: o que importa é saber se poderá ocorrer uma mudança significativa para melhor.

A expectativa de uma vida longa num futuro melhor poderá, com efeito, tornar algumas doenças políticas menos letais. Os conflitos humanos são demasiado profundos e intensos para serem erradicados por uma simples mudança, mas a perspectiva de uma imensa prosperidade amanhã poderá pelo menos atenuar o ímpeto de lutar por migalhas hoje. O problema do conflito é imenso, e precisamos de toda a ajuda possível.

A perspetiva da deterioração pessoal e da morte sempre tornou os pensamentos sobre o futuro menos agradáveis. Visões de poluição, pobreza e aniquilação nuclear tornaram, nos últimos tempos, o futuro quase insuportável de imaginar. Contudo, com ao menos a esperança de um futuro melhor — e tempo para o saborear — talvez possamos encarar o porvir com maior boa vontade. Ao olharmos para a frente, veremos mais. Tendo um interesse pessoal, importamo-nos mais. Uma maior esperança e visão de futuro beneficiarão tanto o presente como as gerações futuras; melhorarão até as nossas hipóteses de sobrevivência.

Vidas prolongadas significarão mais pessoas, mas sem agravar significativamente o problema populacional do amanhã. A expectativa de vidas mais longas num mundo melhor trará benefícios reais, ao incentivar as pessoas a pensar mais no futuro. No geral, a longevidade — e a sua antecipação — parecem ser positivas para a sociedade, tal como encurtar a esperança de vida para trinta anos seria negativo. Muitas pessoas desejam vidas longas e saudáveis para si próprias. Quais são, então, as perspetivas para a geração atual?

7. Progresso na Extensão da Vida

Ouve Gilgamesh, Rei de Uruk¹¹:

Observei para lá da muralha e vi os corpos a flutuar no rio,
e esse será também o meu destino. Sei, de facto, que assim

será, pois aquele que é mais alto entre os homens não alcança os céus, e o maior não consegue abarcar a Terra.

Quatro milénios passaram desde que escribas sumérios gravaram em tábuas de argila *A Epopeia de Gilgamesh*, e os tempos mudaram. Homens com estatura comum já alcançaram os céus e orbitaram a Terra. Nós, da Era Espacial, da Era da Biotecnologia, da Era dos Avanços — ainda necessitamos desesperar perante a barreira dos anos? Ou aprenderemos a arte da extensão da vida a tempo de salvar a nós mesmos e aos que amamos da dissolução?

O ritmo dos avanços biomédicos oferece uma promessa tentadora. As principais doenças da velhice — doenças cardíacas, AVC e cancro — começaram a ceder ao tratamento. Os estudos sobre os mecanismos do envelhecimento começaram a dar frutos, e investigadores conseguiram prolongar a vida de animais. À medida que o conhecimento se acumula e as ferramentas geram novas ferramentas, os avanços parecem destinados a acelerar. Mesmo sem máquinas de reparação celular, temos razões para esperar progressos significativos no sentido de abrandar e até reverter parcialmente o envelhecimento.

Embora pessoas de todas as idades beneficiem destes avanços, os mais jovens beneficiarão mais. Aqueles que sobreviverem o tempo suficiente chegarão a uma época em que o envelhecimento será totalmente reversível — o mais tardar, na Era das máquinas avançadas de reparação celular. Então, se não antes, as pessoas tornar-se-ão mais saudáveis à medida que envelhecem,

melhorando como o vinho em vez de se estragarem como o leite. Poderão, se assim o desejarem, recuperar uma excelente saúde e viver por muito, muito tempo.

Nessa época, com os replicadores e os voos espaciais baratos, as pessoas terão tanto longas vidas como espaço e recursos para as desfrutar. Uma pergunta que pode surgir amargamente é: “Quando?... Qual será a última geração a envelhecer e morrer, e qual a primeira a triunfar?” Muitas pessoas partilham já a expectativa silenciosa de que o envelhecimento será um dia vencido. Mas estarão os que hoje vivem condenados por um acaso de nascimento prematuro? A resposta virá a ser tanto clara quanto surpreendente.

O caminho óbvio para uma vida longa consiste em viver o suficiente para ser rejuvenescido por máquinas de reparação celular. Avanços na bioquímica e na tecnologia molecular prolongarão a vida, e no tempo assim ganho prolongá-la-ão ainda mais. A princípio, recorreremos a fármacos, dieta e exercício para prolongar uma vida saudável. Dentro de algumas décadas, avanços na nanotecnologia trarão provavelmente as primeiras máquinas de reparação celular — e, com o auxílio da engenharia automatizada, essas primeiras máquinas poderão rapidamente ser seguidas por versões mais avançadas. As datas terão de permanecer meras suposições, mas uma estimativa serve melhor do que uma simples interrogação.

Imaginemos alguém com trinta anos de idade. Daqui a trinta anos, a biotecnologia terá avançado imensamente, e ainda assim essa pessoa terá apenas sessenta anos. Tabelas estatísticas — que

assumem nenhuma melhoria na medicina — indicam que um cidadão dos EUA com trinta anos pode hoje esperar viver quase mais cinquenta — ou seja, até aos anos 2030. Avanços relativamente rotineiros (do tipo já demonstrado em animais) parecem capazes de acrescentar anos, talvez décadas, à vida até 2030. Os simples inícios da tecnologia de reparação celular poderão estender a vida por várias décadas. Em suma, a medicina de 2010, 2020 e 2030 parece capaz de prolongar a vida do nosso trintão até aos anos 2040 ou 2050. Até lá, senão antes, os avanços médicos poderão permitir o rejuvenescimento efetivo. Assim, os que têm hoje menos de trinta anos (e talvez os consideravelmente mais velhos) podem, pelo menos de forma provisória, antever que a medicina ultrapasse o seu processo de envelhecimento e os conduza em segurança a uma Era de reparação celular, vigor e longevidade indefinida.

Se esta fosse toda a história, então a divisão entre os últimos na estrada rumo à morte precoce e os primeiros no caminho para a vida longa seria, talvez, o derradeiro fosso entre gerações. Além disso, uma incerteza corrosiva quanto ao destino de cada um daria motivo para empurrar toda esta questão para o calabouço subconsciente das especulações perturbadoras.

Mas será realmente esta a nossa situação? Parece haver outra forma de salvar vidas, uma baseada em máquinas de reparação celular, mas aplicável já hoje. Tal como descrito no capítulo anterior, essas máquinas serão capazes de curar tecidos desde que a sua estrutura essencial esteja preservada. A capacidade do tecido para metabolizar ou se reparar torna-se irrelevante; a discussão

sobre biostase ilustrou isso. A biostase, conforme descrita, utilizará dispositivos moleculares para suspender a função biológica e preservar a estrutura, entrelaçando as máquinas moleculares da célula entre si por meio de ligações cruzadas. Nanomáquinas inverterão esse processo de biostase ao reparar os danos moleculares, remover as ligações cruzadas e auxiliar as células (e, por conseguinte, os tecidos, órgãos e todo o corpo) a regressarem ao funcionamento normal.

Chegar a uma Era com máquinas avançadas de reparação celular parece ser a chave para a longevidade e a saúde, pois quase todos os problemas físicos serão então curáveis. Uma pessoa poderá alcançar essa Era mantendo-se viva e ativa durante todos os anos entre o presente e esse futuro — mas este é apenas o caminho mais óbvio, o que requer o mínimo de previsão.

Muitos pacientes, hoje, sofrem colapsos da função cardíaca enquanto as estruturas cerebrais que encerram a memória e a personalidade permanecem intactas. Nesses casos, não poderia a tecnologia médica atual interromper os processos biológicos de tal forma que a tecnologia médica do futuro os consiga reverter? Se assim for, então a maioria das mortes atualmente é diagnosticada de forma prematura — e desnecessária.

CAPÍTULO 9

Uma Porta para o Futuro

Londres, abril de 1773.

Para Jacques Dubourg¹.

As suas observações sobre as causas da morte e as experiências que propõe para trazer de volta à vida aqueles que parecem ter sido mortos por um raio demonstram igualmente a sua sagacidade e a sua humanidade. Parece que a doutrina da vida e da morte em geral ainda é pouco compreendida...

Gostaria que fosse possível... inventar um método de embalsamar as pessoas afogadas, de tal forma que pudessem ser trazidas de volta à vida em qualquer época, por mais distante que fosse; pois, tendo um desejo ardente de ver e observar o estado da América daqui a cem anos, preferiria ser mergulhado com alguns amigos num barril de Madeira até então, a uma morte comum, do que ser trazido de volta à vida pelo calor solar do meu querido país! Mas... com toda a probabilidade, vivemos num século muito pouco avançado e muito próximo da infância da ciência para ver tal arte levada à perfeição na nossa época...

Eu sou, etc.

— B. FRANKLIN.

BENJAMIN FRANKLIN desejava um procedimento para parar e reiniciar o metabolismo, mas na sua época tal procedimento era desconhecido. Viveremos nós num século suficientemente avançado para tornar a biostase uma realidade — para abrir um futuro de saúde a pacientes que, de outro modo, não teriam escolha senão a dissolução após a morte?

Podemos suspender o metabolismo de várias formas, mas para que a biostase seja útil, tem de ser reversível. Isto conduz-nos a uma situação curiosa: a possibilidade de colocar pacientes em biostase com as técnicas atuais depende inteiramente de as técnicas futuras conseguirem reverter esse processo. O procedimento tem duas partes, das quais precisamos apenas dominar uma.

Se a biostase puder manter um paciente inalterado durante anos, então essas técnicas futuras incluirão sistemas sofisticados de reparação celular. Devemos, portanto, avaliar o sucesso dos procedimentos atuais de biostase à luz das capacidades finais da medicina futura. Antes de as máquinas de reparação celular se tornarem uma possibilidade clara, essas capacidades — e, por conseguinte, os requisitos para uma biostase bem-sucedida — permaneciam profundamente incertas. Agora, os requisitos básicos parecem relativamente óbvios.

1. Os Requisitos Para a Biostase

As máquinas moleculares conseguem construir células a partir do zero, como demonstram as células em divisão. Conseguem igualmente construir órgãos e sistemas de órgãos desde o princípio, tal como o demonstram os embriões em desenvolvimento. Os médicos poderão recorrer à tecnologia de reparação celular para orientar o crescimento de novos órgãos a partir das próprias células do paciente. Isto oferece aos médicos modernos uma grande margem de manobra nos procedimentos de biostase: mesmo que danificassem ou descartassem a maioria dos órgãos de um

paciente, não causariam, ainda assim, danos irreversíveis. Os colegas do futuro, munidos de ferramentas mais avançadas, poderão reparar ou substituir os órgãos em causa. A maioria das pessoas ficaria satisfeita por receber um novo coração, rins renovados ou uma pele mais jovem².

Contudo, o cérebro é uma questão à parte. Um médico que permita a destruição do cérebro de um paciente está, na verdade, a permitir a destruição do próprio paciente como pessoa, independentemente do que possa acontecer ao resto do corpo. O cérebro contém os padrões da memória, da personalidade e do sentido do eu. Pacientes que sofrem um acidente vascular cerebral perdem apenas partes do cérebro, mas ainda assim sofrem danos que vão desde cegueira parcial a paralisia, perda da linguagem, diminuição da inteligência, alterações de personalidade, e até consequências mais graves. Os efeitos variam conforme a localização dos danos. Isto sugere que a destruição total do cérebro leva à cegueira total, paralisia, mudez e ausência de mente — quer o corpo continue a respirar ou não.

Como escreveu Voltaire:

Para ressuscitar — para voltar a ser a mesma pessoa que eras — é necessário ter a memória perfeitamente fresca e presente; pois é a memória que constitui a tua identidade. Se perderes a memória, como poderás ser o mesmo homem?

A anestesia interrompe a consciência sem perturbar a estrutura do cérebro, e os procedimentos de biostase deverão fazer o mesmo, apenas por um período mais prolongado. Isso levanta a questão da natureza das estruturas físicas que sustentam a memória e a personalidade.

A neurobiologia, tal como o bom senso esclarecido, concordam quanto à natureza fundamental da memória. À medida que formamos memórias e nos desenvolvemos como indivíduos, o nosso cérebro transforma-se. Essas transformações afetam o funcionamento do cérebro, alterando o seu padrão de atividade: quando recordamos, o nosso cérebro executa uma ação; quando agimos, pensamos ou sentimos, o nosso cérebro está em atividade. O cérebro opera através de maquinaria molecular. As alterações duradouras no seu funcionamento implicam mudanças igualmente duradouras nessa maquinaria — ao contrário da memória de um computador, o cérebro não foi concebido para ser apagado e recarregado de forma instantânea. A personalidade e a memória de longo prazo são duráveis.

Em todo o corpo, as alterações duradouras no funcionamento envolvem mudanças igualmente duradouras na maquinaria molecular. Quando os músculos se tornam mais fortes ou mais ágeis, os seus constituintes proteicos mudam em número e distribuição. Quando o fígado se adapta para lidar com o álcool, a sua composição proteica também se altera. Quando o sistema imunitário aprende a reconhecer um novo tipo de vírus da gripe, o conteúdo proteico volta a modificar-se. Dado que são as máquinas à base de proteínas que executam o trabalho real — movimentar

músculos, decompor toxinas e reconhecer vírus —, esta relação é natural e esperada.

No cérebro, as proteínas moldam as células nervosas, recobrem as suas superfícies, ligam umas células às outras, controlam as correntes iônicas de cada impulso neural, produzem as moléculas sinalizadoras usadas pelas células nervosas para comunicarem através das sinapses — e muito mais. Tal como as impressoras, ao imprimir palavras, deixam padrões de tinta no papel, as células nervosas, ao alterarem o seu comportamento, modificam os seus padrões proteicos. A impressão também deforma ligeiramente o papel, e as células nervosas mudam mais do que apenas as proteínas; contudo, a tinta no papel e as proteínas no cérebro são suficientes para tornar esses padrões evidentes. As mudanças envolvidas estão longe de ser subtis³. Os investigadores relatam que as alterações de longo prazo no comportamento das células nervosas envolvem "mudanças morfológicas marcantes"⁴ nas sinapses: estas alteram-se visivelmente em tamanho e estrutura.

Parece, pois, que a memória de longo prazo não é um padrão excessivamente delicado, pronto a evaporar-se do cérebro ao menor pretexto. A memória e a personalidade estão firmemente incorporadas na forma como as células cerebrais cresceram em conjunto, em padrões moldados ao longo de anos de experiência. A memória e a personalidade não são materiais, tal como os personagens de um romance também não o são; contudo, tal como estes, estão corporificadas na matéria. A memória e a personalidade não se dissipam com o último suspiro de um paciente. Na verdade, muitos pacientes recuperaram da chamada

"morte clínica", mesmo sem a ajuda de máquinas de reparação celular. Os padrões mentais apenas se perdem quando — e se — os médicos presentes permitem que o cérebro do paciente entre em decomposição. Isto volta a conceder uma considerável margem de manobra aos médicos nos procedimentos de biostase: regra geral, não é necessário interromper o metabolismo antes de cessarem as funções vitais⁵.

Parece, portanto, que preservar as estruturas celulares e os padrões proteicos do cérebro equivale a preservar a estrutura da mente e do eu. Os biólogos já sabem conservar tecidos com este nível de precisão. A tecnologia de ressuscitação ainda aguarda o desenvolvimento de máquinas de reparação celular, mas a tecnologia de biostase parece já estar solidamente encaminhada.

2. Métodos de Biostase

A ideia de que já possuímos técnicas de biostase pode parecer surpreendente, uma vez que raramente surgem novas capacidades poderosas de forma repentina. Na verdade, as técnicas são antigas — o que é novo é a compreensão da sua reversibilidade. Os biólogos desenvolveram as duas principais abordagens por outras razões.

Durante décadas, os biólogos utilizaram microscópios eletrônicos para estudar a estrutura das células e dos tecidos. Para preparar as amostras, recorrem a um processo químico chamado fixação, que serve para manter as estruturas moleculares estáticas. Um método bastante comum utiliza moléculas de glutaraldeído, que consistem

em cadeias flexíveis de cinco átomos de carbono com um grupo reativo de hidrogénio e oxigénio em cada extremidade. Os biólogos fixam os tecidos bombeando uma solução de glutaraldeído através dos vasos sanguíneos, permitindo que as moléculas se difundam pelas células. Uma vez dentro da célula, uma molécula vagueia até que uma das extremidades entre em contato com uma proteína (ou outra molécula reativa) e a ela se ligue. A outra extremidade, então, continua livre até que também se ligue a algo reativo. Este processo, por norma, prende uma molécula proteica a uma molécula vizinha.

Estas ligações cruzadas imobilizam as estruturas e máquinas moleculares; posteriormente, podem ser adicionados outros compostos químicos para reforçar ou consolidar ainda mais essa fixação. A microscopia eletrónica mostra que tais procedimentos de fixação preservam eficazmente as células e as suas estruturas internas — incluindo as estruturas do cérebro⁶.

O primeiro passo do procedimento hipotético de biostase que descrevi no Capítulo 7 envolvia dispositivos moleculares simples, capazes de entrar nas células, bloquear a sua maquinaria molecular e unir as suas estruturas com ligações estabilizadoras. As moléculas de glutaraldeído ajustam-se muito bem a esta descrição. O passo seguinte neste procedimento envolvia outros dispositivos moleculares capazes de substituir a água e compactar-se solidamente em torno das moléculas da célula. Este processo também já é conhecido.

Compostos químicos como o propilenoglicol, o etilenoglicol e o dimetilsulfóxido conseguem difundir-se para o interior das células, substituindo grande parte da sua água sem causar danos significativos. São conhecidos como crioprotetores, pois conseguem proteger as células de danos causados por temperaturas muito baixas. Se substituírem uma quantidade suficiente da água celular, então o arrefecimento não provoca congelação; apenas torna a solução crioprotetora progressivamente mais viscosa, passando de uma consistência semelhante a xarope fino, para algo comparável a alcatrão quente, depois a alcatrão frio, até atingir uma resistência ao fluxo semelhante à do vidro. De facto, segundo a definição científica do termo, a solução protetora passa então a qualificar-se como um vidro; o processo de solidificação sem congelação chama-se vitrificação⁷. Embriões de rato vitrificados e armazenados em azoto líquido já deram origem a ratos saudáveis⁸.

O processo de vitrificação envolve o empacotamento sólido do crioprotetor vítreo em torno das moléculas de cada célula; deste modo, a vitrificação corresponde ao que descrevi como a segunda fase da biostase.

A fixação e a vitrificação, em conjunto, parecem suficientes para garantir uma biostase de longa duração. Para reverter esta forma de biostase, máquinas de reparação celular serão programadas para remover o crioprotetor vítreo e as ligações cruzadas de glutaraldeído, e depois reparar e substituir moléculas, restaurando assim as células, tecidos e órgãos à sua funcionalidade original.

A fixação com vitrificação não foi o primeiro procedimento proposto para alcançar a biostase. Em 1962, Robert Ettinger, professor de física no Highland Park College, no Michigan, publicou um livro no qual sugeria que avanços futuros na criobiologia poderiam conduzir a técnicas de congelação facilmente reversível de pacientes humanos⁹. Mais ainda, sugeriu que médicos munidos de tecnologias futuras talvez pudessem reparar e reanimar pacientes congelados com as técnicas então existentes, pouco após a cessação dos sinais vitais. Destacou que as temperaturas do azoto líquido preservariam os pacientes durante séculos, se necessário, com mínimas alterações. Talvez, imaginou ele, a ciência médica venha um dia a dispor de máquinas fabulosas capazes de restaurar tecidos congelados, molécula por molécula. O seu livro deu origem ao movimento da criónica.

Os crionicistas concentraram-se na congelação porque muitas células humanas revivem espontaneamente após uma congelação e descongelação cuidadosas¹⁰. É um mito comum que a congelação rebente as células; na verdade, os danos provocados pelo gelo são mais subtis — tão subtis que, muitas vezes, não causam danos permanentes. Esperma congelado é regularmente utilizado para gerar bebês saudáveis. Alguns seres humanos atualmente vivos sobreviveram a uma congelação sólida a temperaturas de azoto líquido — quando ainda eram embriões muito precoces. Os criobiólogos continuam a investigar ativamente formas de congelar e descongelar órgãos viáveis, com vista a permitir o seu armazenamento para posterior implantação cirúrgica¹¹.

A perspectiva de tecnologias futuras de reparação celular tem sido um tema constante entre os crionicistas¹². Ainda assim, têm tendido a focar-se em procedimentos que preservam a função celular, por razões compreensíveis. Os criobiólogos já conseguiram manter células humanas viáveis congeladas durante anos. Os resultados têm melhorado com experiências envolvendo misturas de químicos crioprotetores e taxas de arrefecimento e aquecimento cuidadosamente controladas. As complexidades da criobiologia oferecem um vasto leque de possibilidades para investigação futura. Esta combinação de êxitos tangíveis e promissores alvos de pesquisa transformou o objetivo de um processo de congelação facilmente reversível num ideal vívido e atraente para os crionicistas. Um êxito na congelação e reanimação de um mamífero adulto seria imediatamente visível e persuasivo.

Além disso, mesmo uma preservação *parcial* da função tecidular sugere uma *excelente* preservação da estrutura do tecido. Células que conseguem reviver (ou quase reviver) mesmo sem ajuda especial necessitarão de pouca reparação.

No entanto, a ênfase cautelosa e conservadora da comunidade criónica na preservação da função tecidular tem gerado confusão pública. Alguns experimentadores congelaram mamíferos adultos inteiros e tentaram descongelá-los sem esperar pela assistência de máquinas de reparação celular. Os resultados foram superficialmente desanimadores: os animais não reviveram¹³. Para um público e uma comunidade médica desconhecedores das possibilidades de reparação molecular, tal fez com que a biostase por congelação parecesse inútil.

E, após a proposta de Ettinger, alguns criobiólogos optaram por fazer declarações infundadas sobre o futuro da tecnologia médica. Como afirmou Robert Prehoda num livro de 1967¹⁴:

Quase todos os especialistas em metabolismo reduzido [...] acreditam que os danos celulares causados pelas técnicas atuais de congelação nunca poderão ser corrigidos.

Claro que estes eram os peritos errados a quem se dirigia a pergunta. A questão exigia especialistas em tecnologia molecular e máquinas de reparação celular. Esses criobiólogos deveriam ter dito apenas que a correção dos danos da congelação aparentemente exigiria reparações a nível molecular, e que, pessoalmente, não tinham estudado o assunto. Em vez disso, induziram o público em erro de forma leviana numa matéria de importância médica vital. As suas declarações desincentivaram o uso de uma técnica de biostase potencialmente viável¹⁵.

As células são compostas maioritariamente por água. A temperaturas suficientemente baixas, as moléculas de água juntam-se para formar uma estrutura sólida, ainda que fraca, com ligações cruzadas. Como isto preserva as estruturas neurais¹⁶ — e, portanto, os padrões da mente e da memória — Robert Ettinger parece ter identificado uma abordagem funcional para a biostase. À medida que a tecnologia molecular avança e as pessoas se familiarizam com as suas consequências, a reversibilidade da biostase (baseada na congelação, na fixação e vitrificação, ou

noutros métodos) tornar-se-á cada vez mais evidente para um número crescente de pessoas.

3. Revertendo a Biostase

Imagine que um paciente acaba de falecer devido a um ataque cardíaco. Os médicos tentam reanimá-lo, mas sem sucesso, e desistem de restaurar as funções vitais. Neste ponto, no entanto, o corpo e o cérebro do paciente estão apenas ligeiramente disfuncionais — na verdade, a maioria das células e tecidos ainda está viva e metabolicamente ativa. Tendo feito os devidos preparativos com antecedência, o paciente é então colocado em biostase, a fim de evitar a dissolução irreversível e aguardar por um futuro mais promissor.

Os anos passam. O paciente pouco muda, mas a tecnologia avança extraordinariamente. Os bioquímicos aprendem a conceber proteínas. Os engenheiros usam máquinas de proteínas para construir montadores (assemblers) e, a partir destes, desenvolvem uma nanotecnologia de base alargada. Com novos instrumentos, o conhecimento biológico expande-se de forma exponencial. Os engenheiros biomédicos, combinando conhecimento atualizado, engenharia automatizada e montadores, desenvolvem máquinas de reparação celular cada vez mais sofisticadas. Aprendem a parar e reverter o envelhecimento. Os médicos utilizam esta tecnologia de reparação celular para ressuscitar pacientes em biostase — começando pelos que foram preservados com técnicas mais avançadas, e depois com aqueles submetidos a métodos mais antigos e rudimentares. Finalmente, após o êxito na reanimação de

animais preservados com as técnicas dos anos 1980, os médicos voltam-se para o nosso paciente do ataque cardíaco.

Na primeira fase de preparação, o paciente encontra-se num tanque de azoto líquido, rodeado por equipamentos especializados. O protetor vítreo ainda envolve firmemente a maquinaria molecular de cada célula. Este protetor tem de ser removido, mas um simples aquecimento poderia permitir que certas estruturas celulares se movimentassem prematuramente.

Dispositivos cirúrgicos desenhados para operar a baixas temperaturas penetram o azoto líquido e alcançam o tórax do paciente. Aí, removem secções sólidas de tecido para aceder às principais artérias e veias. Um exército de nanomáquinas, equipadas para remover o protetor, entra por essas aberturas, limpando primeiro os grandes vasos sanguíneos e depois os capilares¹⁷. Isto abre caminhos através dos tecidos normalmente ativos do corpo do paciente¹⁸. As máquinas cirúrgicas maiores conetam então tubos ao tórax e bombeiam fluidos pelo sistema circulatório. O fluido lava as nanomáquinas iniciais de remoção do protetor (e, mais tarde, fornecerá materiais para as máquinas de reparação e dissipará calor residual).

Seguidamente, as máquinas bombeiam um fluido esbranquiçado, contendo triliões de dispositivos que entram nas células e removem o protetor vítreo, molécula por molécula¹⁹. Substituem-no por um andaime molecular temporário, deixando espaço suficiente para as máquinas de reparação operarem²⁰. À medida que estas nanomáquinas de remoção do protetor vão

revelando biomoléculas — incluindo os componentes estruturais e mecânicos das células — ligam-nas ao andaime com conexões temporárias. (Se o paciente também tiver sido tratado com um fixador que cria ligações cruzadas, estas ligações são agora substituídas pelas temporárias.) Quando é necessário deslocar moléculas, as máquinas etiquetam-nas para reposição posterior no local exato²¹. Como outras máquinas de reparação avançada, estas atuam sob orientação de nanocomputadores no local.

Quando terminam, as máquinas de baixa temperatura retiram-se. Através de uma série de mudanças graduais na composição e na temperatura, uma solução aquosa substitui o fluido criogénico, e o paciente é aquecido acima do ponto de congelação. As máquinas de reparação celular são então bombeadas através dos vasos sanguíneos e penetram nas células. As reparações começam.

Dispositivos microscópicos examinam as moléculas e comunicam as suas estruturas e posições a um computador maior dentro da célula²². O computador identifica as moléculas, orienta as reparações necessárias e reconhece estruturas celulares a partir dos padrões moleculares²³. Onde o dano deslocou estruturas dentro da célula, o computador guia os dispositivos de reparação para restaurar as moléculas à sua disposição adequada, usando ligações temporárias conforme necessário. Entretanto, as artérias do paciente são desobstruídas e o músculo cardíaco, danificado anos antes, é reparado.

Por fim, a maquinaria molecular das células é restaurada à sua plena funcionalidade, e reparações mais amplas corrigem padrões

danificados de organização celular, restaurando tecidos e órgãos ao seu estado saudável. O andaime é então removido das células, juntamente com a maioria das ligações temporárias e grande parte da maquinaria de reparação. Contudo, a maioria das moléculas ativas em cada célula permanece bloqueada, para impedir uma atividade prematura e desregulada.

Fora do corpo, o sistema de reparação cultivou sangue novo a partir das próprias células do paciente. Este sangue é agora transfundido para preencher o sistema circulatório, enquanto o sistema atua como coração artificial temporário. Os dispositivos remanescentes em cada célula ajustam então a concentração de sais, açúcares, ATP e outras pequenas moléculas, desbloqueando gradualmente a nanomáquina interna de cada célula. Com mais desbloqueios, o metabolismo retoma passo a passo; o músculo cardíaco é finalmente desbloqueado no limiar da contração. O batimento cardíaco reinicia-se, e o paciente emerge num estado de anestesia. Enquanto os médicos verificam que tudo corre bem, o sistema de reparação encerra a abertura no tórax, unindo tecido a tecido sem pontos nem cicatrizes. Os dispositivos restantes nas células desmontam-se uns aos outros, transformando-se em resíduos inócuos ou em moléculas nutritivas. À medida que o paciente entra num sono normal, certas visitas entram na sala, conforme planeado há muito tempo.

Por fim, o adormecido desperta, renovado, para a luz de um novo dia — e para o reencontro com velhos amigos.

4. Mente, Corpo e Alma

Antes de considerar a ressuscitação, no entanto, alguns poderão perguntar o que acontece à alma de uma pessoa em biostase. Algumas pessoas responderiam que a alma e a mente são aspetos da mesma coisa, de um padrão corporizado na substância do cérebro, ativo durante a vida ativa e em estado de quietude durante a biostase. Suponhamos, porém, que o padrão da mente, da memória e da personalidade abandona o corpo na morte, transportado por alguma substância subtil. As possibilidades, então, parecem bastante claras. A morte, neste caso, teria um significado diferente da destruição irreversível do cérebro, sendo definida antes pela partida irreversível da alma. Isto tornaria a biostase um gesto inútil, mas inofensivo — afinal, líderes religiosos não têm manifestado preocupação de que a mera preservação do corpo possa, de algum modo, aprisionar a alma. A ressuscitação, nesta perspetiva, exigiria presumivelmente a cooperação da alma para ser bem-sucedida. O ato de colocar pacientes em biostase tem, de facto, sido acompanhado por cerimónias tanto católicas como judaicas.

Com ou sem biostase, a reparação celular não pode trazer a imortalidade. A morte física, por muito que seja adiada, permanecerá inevitável por razões enraizadas na própria natureza do universo. A biostase seguida de reparação celular, portanto, não parece levantar nenhuma questão teológica fundamental. Assemelha-se a uma anestesia profunda seguida de uma cirurgia para salvar a vida: ambos os procedimentos interrompem a consciência para prolongar a vida. Falar de “imortalidade” quando

a perspectiva é apenas de uma vida longa seria ignorar os factos ou fazer um uso indevido das palavras.

5. Objeções e Argumentos

A perspectiva da biostase parece feita à medida para provocar choque do futuro. A maioria das pessoas já considera suficientemente chocante a aceleração das mudanças atuais, mesmo quando estas ocorrem de forma gradual. Mas a opção da biostase é uma consequência contemporânea de toda uma série de avanços futuros. Esta perspectiva perturba, naturalmente, os delicados ajustes psicológicos que as pessoas fazem para lidar com o declínio físico.

Até agora, baseei o argumento a favor da reparação celular e da biostase numa discussão de factos corriqueiros da biologia e da química. Mas o que pensam os biólogos profissionais sobre as questões fundamentais? Em particular, acreditam eles que:

1. máquinas de reparação conseguirão corrigir o tipo de dano por entrelaçamento molecular causado pela fixação e,
2. a memória está de facto corporizada numa forma preservável?

Após uma discussão sobre máquinas moleculares e as suas capacidades — discussão essa que não abordava implicações

médicas — o Dr. Gene Brown, professor de bioquímica e presidente do departamento de biologia no MIT, autorizou ser citado afirmando:

Dado tempo e esforço suficientes para desenvolver máquinas moleculares artificiais e conduzir estudos detalhados da biologia molecular da célula, devem emergir capacidades bastante vastas. Entre elas poderá estar a capacidade de separar as proteínas (ou outras biomoléculas) em estruturas entrelaçadas, bem como identificá-las, repará-las e substituí-las.

Esta declaração aborda uma parte significativa do problema da reparação celular. Foi consistentemente endossada por uma amostra de bioquímicos e biólogos moleculares do MIT e de Harvard após discussões semelhantes.

Após uma discussão sobre o cérebro e a natureza física da memória e da personalidade — também ela sem implicações médicas — o Dr. Walle Nauta (Professor do Instituto de Neuroanatomia no MIT) autorizou ser citado afirmando:

Com base no nosso conhecimento atual da biologia molecular dos neurónios, penso que a maioria concordaria que as alterações produzidas durante a consolidação da memória de longo prazo se refletem em mudanças

correspondentes no número e distribuição de diferentes moléculas de proteína nos neurónios do cérebro.

Tal como a declaração do Dr. Brown, esta aborda um ponto essencial quanto à viabilidade da biostase. Também ela foi consistentemente endossada por outros especialistas, desde que discutida num contexto que os isolasse de qualquer viés emocional decorrente das implicações médicas da afirmação. Além disso, dado que estes pontos dizem respeito diretamente às suas especialidades, o Dr. Brown e o Dr. Nauta foram peritos apropriados para consultar.

Parece que o impulso humano para viver levará muitos milhões de pessoas a optar pela biostase (como último recurso), se a considerarem viável. À medida que a tecnologia molecular avançar, a compreensão da reparação celular irá difundir-se pela cultura popular. A opinião dos especialistas apoiará cada vez mais esta ideia. A biostase tornar-se-á mais comum, e os seus custos irão diminuir. É provável que muitas pessoas venham a considerar a biostase como algo normal, como um tratamento padrão de salvamento de vida para pacientes que já expiraram.

Mas, até que as máquinas de reparação celular sejam demonstradas, a tendência demasiadamente humana para ignorar aquilo que ainda não vimos irá atrasar a aceitação da biostase. Milhões, sem dúvida, passarão da expiração à dissolução irreversível por força do hábito e da tradição, sustentados por argumentos frágeis. A importância de uma visão clara do futuro

neste assunto torna relevante considerar possíveis argumentos antes de abandonar o tema da extensão da vida e avançar para outros assuntos. Por que razão, então, poderá a biostase não parecer uma ideia natural e óbvia?

5.1 Porque as Máquinas de Reparação Celular ainda não Existem

Pode parecer estranho salvar uma pessoa da dissolução com a expectativa de restaurar a sua saúde, uma vez que a tecnologia de reparação ainda não existe. Mas será isto assim tão mais estranho do que poupar dinheiro para colocar um filho na universidade? Afinal, o estudante universitário ainda não existe. Poupar dinheiro faz sentido porque o filho há-de crescer; salvar uma pessoa faz sentido porque a tecnologia molecular há-de amadurecer.

Esperamos que uma criança amadureça porque vimos muitas crianças amadurecerem; podemos esperar que esta tecnologia amadureça porque vimos muitas tecnologias amadurecerem. É certo que algumas crianças nascem com limitações congénitas, tal como algumas tecnologias, mas os especialistas conseguem muitas vezes estimar o potencial de crianças ou de tecnologias ainda em fase inicial.

A tecnologia da microeletrónica começou com alguns pontos e fios num chip de silício, mas evoluiu para computadores em chip. Físicos como Richard Feynman viram, em parte, até onde ela poderia chegar²⁴.

A tecnologia nuclear começou com alguns átomos a dividirem-se num laboratório sob bombardeamento de neutrões, mas evoluiu para reatores de mil milhões de watts e bombas nucleares. Leo Szilard viu, em parte, até onde ela poderia chegar.

A tecnologia de foguetes líquidos começou com engenhos rudimentares lançados de um campo em Massachusetts, mas evoluiu para naves lunares e vaivéns espaciais. Robert Goddard viu, em parte, até onde ela poderia chegar.

A engenharia molecular começou com a química comum e máquinas moleculares emprestadas das células, mas também ela crescerá até se tornar poderosa. Também ela tem consequências discerníveis.

5.2 Porque as Máquinas Minúsculas Carecem de Dramatismo

Tendemos a esperar resultados dramáticos apenas de causas igualmente dramáticas, mas o mundo nem sempre colabora com essa expectativa. A natureza oferece tanto triunfos como desastres embrulhados em papel pardo.

FACTO ABORRECIDO: Certos interruptores elétricos podem ativar-se uns aos outros. Esses interruptores podem ser extremamente pequenos e económicos em termos de consumo eléctrico.

CONSEQUÊNCIA DRAMÁTICA: Quando interligados de forma apropriada, estes interruptores formam computadores — os motores da revolução da informação.

FACTO ABORRECIDO: O éter não é muito venenoso, mas interfere temporariamente com a atividade cerebral.

CONSEQUÊNCIA DRAMÁTICA: O fim da agonia das cirurgias realizadas em pacientes conscientes, inaugurando uma nova Era na medicina.

FACTO ABORRECIDO: Bolores e bactérias competem por alimento, e alguns bolores evoluíram no sentido de secretar venenos que matam bactérias.

CONSEQUÊNCIA DRAMÁTICA: A penicilina, a conquista de muitas doenças bacterianas e a salvação de milhões de vidas.

FACTO ABORRECIDO: Máquinas moleculares podem ser usadas para manipular moléculas e construir interruptores mecânicos à escala molecular.

CONSEQUÊNCIA DRAMÁTICA: Máquinas de reparação celular controladas por computador, capazes de curar praticamente todas as doenças.

FACTO ABORRECIDO: A memória e a personalidade estão incorporadas em estruturas cerebrais que podem ser preservadas.

CONSEQUÊNCIA DRAMÁTICA: As técnicas atuais podem evitar a dissolução dessas estruturas, permitindo que a geração presente beneficie das futuras máquinas de reparação celular.

Na verdade, as máquinas moleculares nem são assim tão monótonas. Dado que os tecidos são feitos de átomos, é natural esperar que uma tecnologia capaz de manipular e reorganizar átomos venha a ter consequências médicas dramáticas.

5.3 Porque Isto Parece Demasiado Inacreditável

Vivemos num século do inacreditável.

Num artigo intitulado "*A Ideia de Progresso*", publicado na revista *Astronautics and Aeronautics*, o engenheiro aeroespacial Robert T. Jones escreveu²⁵:

Em 1910, ano em que nasci, o meu pai era procurador público. Percorria todas as estradas de terra do condado de Macon numa carroça puxada por um único cavalo. No ano passado, voei sem escalas de Londres para São Francisco sobre as regiões polares, puxado pelo ar através de motores com 50.000 cavalos de potência.

No tempo do seu pai, tal aeronave estava no limite da ficção científica — demasiado inacreditável para ser levada a sério.

Num artigo intitulado “*Investigação Médica de Base: Um Investimento a Longo Prazo*”, publicado na *Technology Review* do MIT, o Dr. Lewis Thomas escreveu²⁶:

Há quarenta anos, pouco antes da profissão [médica] passar de arte para ciência e tecnologia, dava-se por garantido que a medicina que nos era ensinada seria exatamente a mesma que nos acompanharia pela vida fora.

Se alguém nos tivesse dito que o poder de controlar infeções bacterianas estava mesmo ao virar da esquina, que a cirurgia cardíaca aberta ou os transplantes renais seriam possíveis em poucas décadas, que certos tipos de cancro poderiam ser curados com quimioterapia, ou que estaríamos prestes a alcançar uma explicação bioquímica abrangente da genética e das doenças geneticamente determinadas — teríamos reagido com total incredulidade.

Não tínhamos qualquer razão para acreditar que a medicina algum dia mudaria...

Esta recordação sugere-nos que deveríamos manter a mente completamente aberta em relação ao futuro.

5.4 Porque Isto Soa Demasiado Bom Para Ser Verdade

A notícia de uma forma de evitar a fatalidade da maioria das doenças fatais pode, de facto, soar demasiado boa para ser verdade — como deve soar, pois é apenas uma pequena parte de uma

história mais equilibrada. Na realidade, os perigos da tecnologia molecular equilibram, de certa forma, as suas promessas. Na Parte Três irei expor razões pelas quais a nanotecnologia poderá ser mais perigosa do que as armas nucleares.

Fundamentalmente, porém, a natureza não se preocupa com o nosso senso de bem ou mal, nem com o nosso desejo de equilíbrio. Em particular, a natureza não odeia os seres humanos o suficiente para viciar o jogo contra nós. Os horrores antigos já desapareceram antes.

Há muitos anos, os cirurgiões esforçavam-se por amputar pernas rapidamente. Robert Liston, de Edimburgo, na Escócia, serrou a coxa de um paciente em tempo recorde — trinta e três segundos — , removendo no processo três dedos do seu assistente. Os cirurgiões atuavam depressa para abreviar a agonia dos seus pacientes, porque estes permaneciam conscientes.

Se hoje a doença terminal sem biostase é um pesadelo, imagine a cirurgia sem anestesia nos tempos dos nossos antepassados: a lâmina a cortar carne viva, o sangue a jorrar, o serrote a ranger nos ossos de um paciente acordado... E, no entanto, em outubro de 1846, W. T. G. Morton e J. C. Warren removeram um tumor a um paciente sob anestesia com éter; Arthur Slater afirma que o seu êxito "foi justamente aclamado como a grande descoberta da época". Com técnicas simples, baseadas num químico conhecido, o pesadelo vívido da faca e do serrote chegou finalmente ao fim.

Com o fim da agonia, a cirurgia tornou-se mais frequente — e, com ela, surgiram infecções cirúrgicas e o horror da morte rotineira causada por carne a apodrecer no corpo. Mas em 1867, Joseph Lister publicou os resultados das suas experiências com fenol, estabelecendo os princípios da cirurgia antisséptica²⁷. Com técnicas simples, baseadas num químico conhecido, o pesadelo de apodrecer vivo diminuiu drasticamente.

Depois vieram os fármacos sulfa e a penicilina, que acabaram com muitas doenças fatais de um só golpe... e a lista continua.

Grandes avanços médicos já aconteceram antes, por vezes a partir de novos usos de químicos bem conhecidos — como no caso da anestesia e da cirurgia antisséptica. Ainda que esses avanços parecessem bons demais para ser verdade, eram verdadeiros, mesmo assim. Salvar vidas através do uso de químicos e procedimentos conhecidos para induzir biostase pode ser igualmente verdadeiro. O facto de os médicos ainda não usarem biostase hoje não nega essa possibilidade.

Robert Ettinger propôs uma técnica de biostase em 1962. Ele afirma que o Professor Jean Rostand já tinha sugerido essa abordagem anos antes, prevendo o seu uso futuro na medicina. Por que é que a biostase por congelamento não se tornou popular? Em parte, devido ao custo inicial, em parte devido à inércia humana e também porque os meios para reparar células ainda eram obscuros. Mas o conservadorismo profundamente enraizado da profissão médica também desempenhou um papel. Vejamos novamente a história da anestesia.

Em 1846, Morton e Warren espantaram o mundo com a "descoberta da época", a anestesia com éter. No entanto, dois anos antes, Horace Wells já havia utilizado anestesia com óxido nitroso. E dois anos antes disso, Crawford W. Long realizara uma operação com éter. Em 1824, Henry Hickman anestesiará com sucesso animais usando dióxido de carbono comum, e passou anos a tentar convencer cirurgiões em Inglaterra e França a testar o óxido nitroso como anestésico. E em 1799 — quarenta e sete anos antes da grande "descoberta", e muitos anos antes de o assistente de Liston perder os dedos — Sir Humphry Davy escreveu²⁸:

Como o óxido nitroso, na sua operação extensa, parece capaz de suprimir a dor física, talvez possa vir a ser usado durante operações cirúrgicas.

No entanto, ainda em 1839, a conquista da dor parecia um sonho impossível para muitos médicos. O Dr. Alfred Velpeau declarou:

A abolição da dor em cirurgia é uma quimera. É absurdo continuar a procurá-la hoje. “Faca” e “dor” são duas palavras da cirurgia que estarão para sempre associadas na consciência do paciente. A essa combinação forçada teremos de nos resignar.

Muitos temiam mais a dor da cirurgia do que a própria morte. Talvez tenha chegado o momento de despertar do derradeiro pesadelo da medicina.

5.5 Porque Não Foi Provado Que Funciona

É verdade que nenhum experimento pode atualmente demonstrar a ressuscitação de um paciente em biostase. Mas exigir tal demonstração implicaria uma suposição oculta: a de que a medicina moderna já se encontra próxima dos limites finais do possível, e de que jamais será ultrapassada pelas realizações do futuro. Tal exigência pode soar como prudente e razoável, mas na verdade revela uma arrogância esmagadora.

Infelizmente, é precisamente uma demonstração que os médicos foram treinados para exigir — e por uma boa razão: procuram evitar procedimentos inúteis que possam causar danos. Talvez baste saber que a negligência da biostase conduz a um dano óbvio e irreversível.

6. Tempo, Custo e Ação Humana

Se as pessoas escolherão usar a biostase dependerá de saber se a consideram digna da aposta. Esta aposta envolve o valor da vida (que é uma questão pessoal), o custo da biostase (que parece razoável pelos padrões da medicina moderna), as probabilidades de que a tecnologia venha a funcionar (que parecem excelentes), e as probabilidades de que a humanidade sobreviva, desenvolva a tecnologia e reanime as pessoas. Este último ponto é o que mais contribui para a incerteza global.

Assumamos que os seres humanos e as sociedades livres sobreviverão. (Ninguém pode calcular as probabilidades de isso acontecer, mas assumir o fracasso desencorajaria precisamente os esforços que podem promover o sucesso.) Se assim for, então a tecnologia continuará a avançar. O desenvolvimento de montadores levará anos. Estudar as células e aprender a reparar os tecidos de pacientes em biostase levará ainda mais tempo. Estima-se que o desenvolvimento dos sistemas de reparação e a sua adaptação à reanimação possa demorar entre três a dez décadas, embora os avanços na engenharia automatizada possam acelerar o processo.

Contudo, o tempo necessário parece ser uma questão secundária. A maioria dos pacientes reanimados preocupar-se-á mais com as condições da vida — incluindo a presença de amigos e familiares — do que com a data marcada no calendário. Com recursos abundantes, as condições físicas da vida poderão ser muito boas, de facto. Já a presença de companheiros é uma questão mais delicada.

Numa sondagem publicada recentemente, mais de metade dos inquiridos afirmou que gostaria de viver pelo menos quinhentos anos, se tivesse essa escolha livre. Sondagens informais mostram que a maioria das pessoas prefere a biostase à dissolução, desde que possam recuperar a saúde e explorar um novo futuro com velhos companheiros. Algumas pessoas dizem que “querem partir quando chegar a sua hora”, mas geralmente concordam que, enquanto puderem escolher continuar a viver, a sua hora ainda não chegou. Parece que muitas pessoas hoje partilham o desejo de Benjamin Franklin — mas num século capaz de o satisfazer. Se a

biostase se tornar popular rapidamente (ou se outras tecnologias de extensão da vida avançarem com a devida rapidez), então um paciente reanimado poderá acordar não num mundo de estranhos, mas sob os sorrisos de rostos familiares.

Mas serão as pessoas em biostase reanimadas? As técnicas para colocar pacientes em biostase já são conhecidas, e os custos podem tornar-se reduzidos, pelo menos em comparação com os custos de uma cirurgia de grande porte ou de cuidados hospitalares prolongados. No entanto, a tecnologia de reanimação será complexa e dispendiosa de desenvolver. As pessoas do futuro preocupar-se-ão com isso?

Parece provável que sim. Talvez não desenvolvam a nanotecnologia com fins médicos em mente, mas seguramente fá-lo-ão para construir computadores melhores. Talvez não desenvolvam máquinas de reparação celular a pensar na reanimação, mas fá-lo-ão certamente para se curarem a si próprios. Talvez não programem máquinas de reparação para reanimar pacientes como ato de caridade impessoal, mas terão tempo, riqueza e sistemas de engenharia automatizada — e alguns terão entes queridos à espera em biostase. As técnicas de reanimação parecem praticamente certas de virem a ser desenvolvidas.

Com replicadores e recursos espaciais, chegará o tempo em que as pessoas terão riqueza e espaço vital mil vezes superiores aos de hoje. A própria reanimação exigirá pouca energia e materiais, mesmo pelos padrões atuais. Assim, as pessoas que ponderarem sobre a reanimação não verão grande conflito entre o seu interesse

próprio e as suas preocupações humanitárias. Motivações humanas comuns parecem suficientes para garantir que a população ativa do futuro reanimará aqueles que estão em biostase.

A primeira geração que recuperará a juventude sem precisar de recorrer à biostase pode muito bem já estar entre nós. A perspectiva da biostase simplesmente dá a mais pessoas mais razões para esperar uma vida longa — oferece uma oportunidade para os mais velhos e uma forma de seguro para os mais jovens. À medida que os avanços da biotecnologia conduzem ao projeto de proteínas, aos montadores e à reparação celular, e à medida que as suas implicações se tornam evidentes, a expectativa de vida longa espalhar-se-á. Ao alargar o caminho para uma vida prolongada, a opção da biostase incentivará um interesse mais vivo no futuro. E isso, por sua vez, impulsionará os esforços para nos prepararmos para os perigos que se avizinham.

CAPÍTULO 10

Os Limites do Crescimento

O tabuleiro de xadrez é o mundo, as peças são os fenómenos do universo, as regras do jogo são aquilo a que chamamos leis da natureza.

— T. H. HUXLEY

NO ÚLTIMO SÉCULO, desenvolvemos aeronaves, naves espaciais, energia nuclear e computadores. No próximo, desenvolveremos montadores moleculares (assemblers), replicadores, engenharia automatizada, voos espaciais baratos, máquinas de reparação celular e muito mais. Esta sucessão de descobertas pode sugerir que a corrida tecnológica avançará sem limites. Nesta visão, ultrapassaremos todas as barreiras concebíveis, precipitando-nos rumo ao desconhecido infinito — mas esta visão parece falsa.

As leis da natureza e as condições do mundo limitarão o que podemos fazer. Sem limites, o futuro seria totalmente desconhecido, uma entidade informe que ridicularizaria os nossos esforços de pensar e planejar. Com limites, o futuro continua a ser uma incerteza turbulenta, mas é forçado a fluir dentro de certos contornos.

A partir dos limites naturais, aprendemos algo sobre os problemas e oportunidades que enfrentamos. Os limites definem os contornos do possível, dizendo-nos que recursos podemos usar, a que velocidade as nossas naves poderão voar, e o que as nossas nanomáquinas poderão ou não fazer.

Falar de limites é arriscado: é mais fácil termos certeza de que algo é possível do que garantir que não o é. Os engenheiros podem trabalhar com aproximações e casos particulares. E, tendo ferramentas, materiais e tempo, podem demonstrar possibilidades de forma direta. Mesmo ao fazer projetos exploratórios, podem manter-se bem dentro do domínio do possível, mantendo-se afastados dos limites. Os cientistas, por outro lado, não podem provar uma teoria geral — e toda afirmação geral de impossibilidade é, por si só, uma espécie de teoria geral. Nenhuma experiência específica (num tempo ou lugar concretos) pode provar que algo é impossível (em todos os lugares, para sempre). Nem mesmo um número elevado de experiências específicas o pode fazer.

Ainda assim, as leis científicas gerais descrevem limites ao que é possível. Embora os cientistas não possam provar leis gerais de forma absoluta, desenvolveram a melhor imagem de que dispomos sobre o funcionamento do universo. E mesmo que experiências exóticas e matemática elegante venham a transformar novamente o nosso conceito de leis físicas, poucos limites de engenharia serão alterados. A teoria da relatividade, por exemplo, não afetou os projetos de automóveis.

O simples facto de existirem limites últimos não significa que estes estejam prestes a estrangular-nos, e, no entanto, muitas pessoas têm sido atraídas pela ideia de que os limites acabarão por estagnar o crescimento em breve. Esta noção simplifica a imagem que têm do futuro ao omitir os novos e estranhos desenvolvimentos que o progresso trará. Outras pessoas preferem a noção, mais vaga, de crescimento ilimitado — uma ideia que, por seu lado, desfoca a imagem do futuro ao sugerir que este será completamente incompreensível.

Pessoas que confundem ciência com tecnologia tendem a ficar confusas quanto aos limites. Como aponta o engenheiro de software Mark S. Miller, imaginam que novo conhecimento significa sempre nova capacidade prática; alguns chegam mesmo a imaginar que, conhecendo tudo, poderíamos fazer qualquer coisa.

Os avanços tecnológicos trazem, de facto, novas competências, abrindo novas possibilidades. Mas os avanços na ciência fundamental redesenham apenas o nosso mapa dos limites últimos; com frequência, revelam novas impossibilidades. As descobertas de Einstein, por exemplo, mostraram que nada pode alcançar um raio de luz em fuga.

1. A Estrutura do Vácuo

A velocidade da luz é um limite real? Em tempos, falava-se de uma “barreira do som”, que alguns acreditavam ser intransponível para um avião. Mas, em 1947, na Base Aérea de Edwards, Chuck

Yeager rasgou os céus de Outubro com um estrondo supersônico. Hoje, algumas pessoas falam de uma “barreira da luz” e questionam se também ela poderá ser ultrapassada.

Infelizmente para os escritores de ficção científica, este paralelo é superficial. Ninguém poderia sustentar que a velocidade do som fosse um verdadeiro limite físico. Meteoros e balas ultrapassavam-na diariamente, e até o estalar de um chicote quebrava a “barreira do som”. Mas ninguém alguma vez viu algo mover-se mais depressa do que a luz. Certos pontos distantes observados por radiotelescópios parecem, por vezes, deslocar-se mais depressa, mas simples ilusões de perspetiva explicam facilmente esses casos. Partículas hipotéticas chamadas “táquions” mover-se-iam mais depressa do que a luz — se existissem — mas nenhuma foi encontrada, e a teoria atual não prevê a sua existência. Em experiências, prótons foram acelerados até mais de 99,9995% da velocidade da luz, com resultados que coincidem perfeitamente com as previsões de Einstein. Quando se tenta acelerar ainda mais uma partícula, a sua velocidade aproxima-se cada vez mais da, da luz, enquanto a sua energia (massa) cresce sem limites.

Na Terra, uma pessoa pode caminhar ou navegar apenas até certa distância, mas não há nenhuma borda misteriosa que bloqueie a viagem; a Terra é simplesmente redonda. O limite de velocidade no espaço não implica uma “barreira da luz” mais do que o limite de distância na Terra implica a existência de uma parede. O espaço — o vácuo que contém toda a energia e matéria — tem propriedades. Uma delas é a sua geometria, que pode ser descrita considerando o tempo como uma dimensão especial. Essa

geometria faz com que a velocidade da luz recue perante uma nave em aceleração, tal como o horizonte recua perante um navio em movimento: a velocidade da luz, tal como o horizonte, está sempre igualmente distante em todas as direções. Mas a analogia termina aqui — essa semelhança nada tem a ver com a curvatura do espaço. Basta lembrar que a velocidade limite não é uma barreira grosseira ou frágil¹. Os objetos podem sempre ir mais depressa — simplesmente não mais depressa do que a luz.

Durante muito tempo, sonhou-se com o controlo da gravidade. Na edição de 1962 de *Perfis do Futuro* (Profiles of the Future), Arthur C. Clarke escreveu²: “De todas as forças, a gravidade é a mais misteriosa e a mais implacável” — e sugeriu que, um dia, desenvolveremos dispositivos práticos para controlar a gravidade. Mas será a gravidade realmente assim tão misteriosa? Na teoria geral da relatividade, Einstein descreveu a gravidade como uma curvatura na estrutura espaço-tempo do vácuo. A matemática que descreve isso é elegante e precisa, e tem feito previsões que passaram todos os testes até hoje realizados.

A gravidade não é nem mais nem menos implacável do que as outras forças. Ninguém pode fazer com que uma rocha perca a sua gravidade, mas também ninguém pode fazer com que um eletrão perca a sua carga elétrica, ou que uma corrente perca o seu campo magnético. Controlamos campos elétricos e magnéticos movendo as partículas que os criam; podemos controlar campos gravitacionais de forma semelhante, movendo massas comuns. Parece que não podemos aprender o “segredo” do controlo gravitacional — porque já o conhecemos.

Uma criança com um pequeno íman consegue levantar um prego, usando um campo magnético para vencer a atração gravitacional da Terra. Mas, infelizmente para os engenheiros gravitacionais entusiastas, usar a gravidade para levantar um prego exigiria uma massa tremenda. Suspender Vénus sobre a sua cabeça quase faria o trabalho — até ao momento em que caísse em cima de si.

Os engenheiros geram ondas eletromagnéticas ao agitarem cargas elétricas para a frente e para trás numa antena; da mesma forma, pode-se gerar ondas gravitacionais ao agitar uma pedra no ar. Mas, mais uma vez, o efeito gravitacional é fraco. Embora uma estação de rádio de um quilowatt não seja nada de extraordinário, toda a agitação e rotação de todas as massas do sistema solar, juntas, não conseguem emitir sequer um quilowatt de ondas gravitacionais.

Compreendemos suficientemente bem a gravidade; simplesmente, ela não é muito útil para construir máquinas significativamente mais leves do que a Lua. Contudo, dispositivos que utilizam grandes massas funcionam. Uma barragem hidroelétrica é parte de uma máquina gravitacional (a outra parte sendo a Terra) que extrai energia de massa em queda. Máquinas que utilizem buracos negros poderão extrair energia da massa em queda com mais de cinquenta por cento de eficiência, com base em $E = mc^2$. Baixar um único balde de água para dentro de um buraco negro produziria tanta energia quanto verter vários triliões de baldes de água através dos geradores de uma barragem com um quilómetro de altura.

Como as leis da gravidade descrevem a curvatura do vácuo, também se aplicam aos “atalhos espaciais” no estilo da ficção científica. Parece que túneis de um ponto do espaço para outro seriam instáveis, mesmo que pudessem ser criados. Isto impede que futuras naves espaciais alcancem pontos distantes mais depressa do que a luz, contornando o espaço intermédio, e esse limite ao movimento impõe, por sua vez, um limite ao crescimento.

As leis de Einstein parecem descrever com precisão a geometria global do vácuo. Se assim for, os limites que daí advêm parecem inescapáveis: pode-se livrar de quase tudo, exceto do próprio vácuo.

Outras leis e limites parecem ser inescapáveis por razões semelhantes. Na verdade, os físicos têm vindo a encarar, cada vez mais, todas as leis físicas em termos da estrutura do vácuo. As ondas gravitacionais são um certo tipo de ondulação no vácuo; os buracos negros, um certo tipo de torção. Do mesmo modo, as ondas de rádio são outro tipo de ondulação no vácuo, e as partículas elementares são outros tipos muito diferentes de torções (que, em algumas teorias, se assemelham a minúsculos cordões vibrantes). Nesta perspetiva, existe apenas uma substância no universo — o vácuo — mas uma substância que assume uma variedade de formas, incluindo os padrões de partículas que chamamos de “matéria sólida”. Esta visão sugere a qualidade inescapável das leis naturais: se uma única substância preenche o universo — se é o universo — então as suas propriedades limitam tudo o que podemos fazer³.

A estranheza da física moderna, porém, leva muitas pessoas a desconfiar dela. As revoluções que deram origem à mecânica quântica e à relatividade suscitaram expressões como “o princípio da incerteza”, “a natureza ondulatória da matéria”, “a matéria é energia” e “o espaço-tempo curvo”. Um certo ar de paradoxo envolve estas ideias — e, com isso, a própria física. É compreensível que novas tecnologias nos pareçam estranhas, mas por que haveriam as leis antigas e imutáveis da natureza de se revelarem tão bizarras e desconcertantes?

Os nossos cérebros e as nossas linguagens evoluíram para lidar com coisas imensamente maiores do que átomos, movendo-se a uma ínfima fração da velocidade da luz. Fazem um trabalho tolerável nesse domínio, embora tenham sido precisos séculos até que as pessoas aprendessem a descrever o movimento de uma pedra em queda. Mas hoje estendemos o nosso conhecimento muito para além do mundo antigo dos sentidos. Descobrimos coisas (ondas de matéria, espaço curvo) que parecem bizarras — e outras que estão simplesmente para além da nossa capacidade de visualização. Contudo, “bizarro” não significa misterioso nem imprevisível. A matemática e a experiência continuam a funcionar, permitindo aos cientistas variar e seleccionar teorias, evoluindo-as para se ajustarem até mesmo a uma realidade peculiar. As mentes humanas demonstraram ser notavelmente flexíveis, mas não é de espantar que nem sempre consigamos visualizar o invisível.

Parte da razão pela qual a física parece tão estranha reside no facto de as pessoas ansiarem por esquisitices e tenderem a propagar memes que descrevem as coisas como sendo estranhas.

Algumas pessoas preferem ideias que recobrem o mundo com camadas e o preenchem com mistérios de segunda categoria. Naturalmente, favorecem e difundem memes que fazem a matéria parecer imaterial e a mecânica quântica parecer uma ramificação da psicologia.

Diz-se que a relatividade revela que a matéria (essa velha substância que as pessoas julgam compreender) é, na verdade, energia (essa coisa sutil e misteriosa que faz as coisas acontecer). Isso fomenta uma espécie de sorriso vago sobre o mistério do universo. Talvez fosse mais claro dizer que a relatividade revela que a energia é uma forma de matéria — pois, em todas as suas formas, a energia tem massa. Com efeito, as velas solares (ou lightsails) funcionam com base neste princípio, através do impacto da massa sobre uma superfície. A luz, aliás, vem até empacotada em partículas.

Considere-se também o princípio da incerteza de Heisenberg, e o facto relacionado de que “o observador afeta sempre o observado”. O princípio da incerteza é intrínseco à matemática que descreve a matéria comum (dando aos átomos o seu próprio tamanho), mas o “efeito do observador” tem sido apresentado, em alguns livros populares, como uma influência mágica da consciência sobre o mundo. Na verdade, a ideia central é bem mais prosaica. Imagine-se a observar uma partícula de pó num feixe de luz: ao observar a luz refletida, afetamo-la — o nosso olho absorve-a. Do mesmo modo, a luz (com a sua massa) afeta a partícula de pó: ricocheteia nela, exercendo uma força. O resultado não é um efeito da nossa mente sobre o pó, mas da luz sobre o pó. Embora a

medição quântica envolva subtilezas bem mais complexas do que este exemplo, nenhuma delas implica que a mente se estenda para alterar a realidade⁴.

Por fim, considere-se o “paradoxo dos gémeos”. A relatividade prevê que, se um dos gémeos viajar até outra estrela e regressar a uma velocidade próxima da, da luz, esse gémeo viajante será mais novo do que o gémeo que ficou em casa. De facto, medições com relógios precisos demonstram o efeito de desaceleração do tempo devido ao movimento rápido. Mas isto não é um “paradoxo”; é um simples facto da natureza.

2. A Física Será Novamente Virada de Pernas para o Ar?

Em 1894, o eminente físico Albert A. Michelson afirmou:

As leis e factos fundamentais mais importantes da ciência física já foram todos descobertos, e estão agora tão firmemente estabelecidos que a possibilidade de alguma vez serem suplantados em consequência de novas descobertas é extremamente remota... As nossas futuras descobertas deverão ser procuradas na sexta casa decimal.

Mas,

➤ Em 1895, Roentgen descobriu os raios-X.

- Em 1896, Becquerel descobriu a radioatividade.
- Em 1897, Thomson descobriu o eletrão.
- Em 1905, Einstein formulou a teoria da relatividade restrita (e explicou assim as próprias observações de Michelson em 1887 relativas à velocidade da luz).
- Nesse mesmo ano, Einstein apresentou também a teoria do fóton para a luz.
- Em 1911, Rutherford descobriu o núcleo atômico.
- Em 1915, Einstein formulou a teoria geral da relatividade.
- De 1924 a 1930, de Broglie, Heisenberg, Bohr, Pauli e Dirac desenvolveram os fundamentos da mecânica quântica.
- Em 1929, Hubble anunciou provas da expansão do universo.
- Em 1931, Michelson morreu.

Michelson cometeu um erro memorável. Ainda hoje se aponta a sua afirmação e o que se seguiu como prova de que não deveríamos

(alguma vez?) afirmar que compreendemos plenamente as leis da natureza, ou que conhecemos os limites do possível. Afinal, se Michelson estava tão seguro e se enganou tão profundamente, não deveríamos temer repetir o seu erro? A grande revolução na física levou algumas pessoas a concluir que a ciência trará sempre surpresas importantes — até mesmo surpresas com implicações práticas para os engenheiros. Mas será que voltaremos a encontrar uma transformação tão significativa como essa?

Talvez não. O conteúdo da mecânica quântica foi de facto uma surpresa; mas, antes do seu surgimento, era evidente que a física estava grosseiramente incompleta. Antes da mecânica quântica, poderia ter abordado qualquer cientista, com um sorriso malicioso, batido na sua secretária e perguntado: “O que mantém esta coisa unida? Por que é que isto é castanho e sólido, enquanto o ar é transparente e gasoso?” A sua “vítima” talvez dissesse algo vago sobre átomos e as suas disposições, mas, se insistisse por uma explicação, na melhor das hipóteses obteria uma resposta como: “Quem sabe?”⁵ A física ainda não consegue explicar a matéria! É fácil julgar com o benefício da retrospectiva, mas num mundo feito de matéria, habitado por pessoas materiais que usam ferramentas materiais, esta ignorância sobre a natureza da matéria era uma lacuna no conhecimento humano que Michelson talvez devesse ter reconhecido. Não era uma lacuna na sexta casa decimal, mas sim na primeira.

Também vale a pena observar até que ponto Michelson estava certo. As leis a que ele se referia incluíam as leis da gravidade e do movimento de Newton, e as leis do eletromagnetismo de Maxwell.

E, de facto, nas condições comuns da engenharia, essas leis foram modificadas apenas na sexta casa decimal. As leis da gravidade e do movimento de Einstein correspondem muito de perto às de Newton, exceto sob condições extremas de gravitação e velocidade; as leis da eletrodinâmica quântica de Feynman, Schwinger e Tomonaga correspondem muito de perto às de Maxwell, exceto sob condições extremas de tamanho e energia.

Sem dúvida que novas revoluções espreitam nas margens destas teorias. Mas essas margens parecem estar longe do mundo dos seres vivos e das máquinas que construímos. As revoluções da relatividade e da mecânica quântica mudaram o nosso conhecimento sobre a matéria e a energia, mas a matéria e a energia em si mesmas permaneceram inalteradas — são reais e não se importam com as nossas teorias.

Os físicos utilizam atualmente um único conjunto de leis para descrever como os núcleos atômicos e os elétrons interagem em átomos, moléculas, máquinas moleculares, seres vivos, planetas e estrelas. Essas leis ainda não são totalmente gerais; a busca por uma teoria unificada da física continua. Mas, como afirma o físico Stephen W. Hawking⁶:

Neste momento, temos um conjunto de leis parciais que governam o comportamento do universo em todas as condições, exceto nas mais extremas.

E, pelos padrões da engenharia, essas condições são *extraordinariamente* extremas.

Os físicos anunciam regularmente novas partículas observadas nos detritos resultantes de colisões de partículas extremamente energéticas, mas não se pode comprar uma dessas partículas numa caixa. E é importante reconhecer isto, porque se uma partícula não pode ser conservada, então não pode servir como componente de uma máquina estável. As caixas e os seus conteúdos são feitos de elétrons e núcleos. Os núcleos, por sua vez, são feitos de prótons e neutrões. Os átomos de hidrogénio têm um único próton como núcleo; os átomos de chumbo têm oitenta e dois prótons e mais de cem neutrões. Neutrões isolados desintegram-se ao fim de poucos minutos. São poucas as partículas estáveis conhecidas⁷:

- os fótons — partículas de luz — são úteis e podem ser aprisionados por algum tempo;
- os neutrinos são quase indetetáveis e nem sequer podem ser aprisionados.

Estas partículas (com exceção do fóton) têm antipartículas correspondentes. *Todas as outras partículas conhecidas desintegram-se em poucos milionésimos de segundo ou menos.* Assim, os únicos blocos de construção conhecidos para hardware são elétrons e núcleos (ou as suas antipartículas, para aplicações especiais e isoladas); estes blocos combinam-se, em geral, para formar átomos e moléculas.

Contudo, apesar do poder da física moderna, o nosso conhecimento ainda possui lacunas evidentes. O estado instável da teoria das partículas elementares deixa certos limites incertos. Podemos ainda vir a descobrir novas partículas estáveis e “caixáveis” (isto é, conserváveis), como os monopólos magnéticos ou quarks livres; se assim for, terão certamente alguma utilidade. Podemos até encontrar um novo campo de longo alcance ou uma nova forma de radiação, embora isso pareça cada vez mais improvável. Por fim, alguma nova forma de colidir partículas pode melhorar a nossa capacidade de converter partículas conhecidas noutras partículas conhecidas.

Mas, de forma geral, hardware complexo exigirá padrões complexos e estáveis de partículas. Fora do ambiente de uma estrela colapsada, isso significa padrões de átomos, que são bem descritos pela mecânica quântica relativista. As fronteiras da física já avançaram. A nível teórico, os físicos procuram uma descrição unificada das interações de todas as partículas possíveis — mesmo das mais efémeras. A nível experimental, estudam os padrões de detritos subatômicos criados por colisões de alta energia em aceleradores de partículas. Enquanto nenhuma nova partícula estável e útil surgir de tais colisões — ou for descoberta como resíduo de antigas convulsões cósmicas — os átomos continuarão a ser os únicos blocos de construção do hardware estável. E a engenharia permanecerá como um jogo jogado com peças já conhecidas, segundo regras já conhecidas. Novas partículas acrescentariam peças — mas não eliminariam as regras.

3. Os Limites do Hardware

Será a maquinaria molecular o fim da linha no que toca à miniaturização? A ideia de que a maquinaria molecular possa ser um passo em direção a uma ainda mais pequena “maquinaria nuclear” parece suficientemente natural. Um jovem (estudante de pós-graduação em Economia na Universidade de Columbia), ao ouvir falar da tecnologia molecular e da sua capacidade para manipular átomos, concluiu de imediato que esta tecnologia poderia fazer quase tudo — até transformar bombas nucleares em queda em inofensivos blocos de chumbo à distância.

A tecnologia molecular nada pode fazer de semelhante. Transformar plutónio em chumbo (seja à distância ou não) está para lá do alcance da tecnologia molecular, pela mesma razão que transformar chumbo em ouro estava para lá da alquimia. As forças moleculares exercem pouca influência sobre o núcleo atómico. O núcleo contém mais de 99,9% da massa de um átomo, ocupando cerca de $1/1.000.000.000.000.000$ do seu volume. Em comparação com o núcleo, o resto do átomo (a nuvem de eletrões) é menos do que um sopro de ar. Tentar alterar um núcleo manipulando-o com uma molécula seria ainda mais fútil do que tentar achatá-la uma esfera de aço abanando-lhe à frente um algodão doce⁸. Ou seja, a tecnologia molecular pode organizar e rearranjar átomos, mas não pode penetrar no núcleo para alterar o tipo de átomo.

As nanomáquinas podem não ajudar na construção de máquinas à escala nuclear — mas será sequer possível a existência de tais máquinas? Aparentemente não, pelo menos em quaisquer

condições que possamos criar num laboratório. As máquinas precisam de múltiplas peças em contato próximo, mas núcleos comprimidos uns contra os outros repelem-se com ferocidade. Quando os núcleos se dividiram em Hiroshima, a maior parte da energia foi libertada pela violenta repulsão eletrostática das metades recém-divididas. A bem conhecida dificuldade da fusão nuclear decorre precisamente deste problema da repulsão nuclear.

Para além da cisão ou da fusão, é possível induzir os núcleos a emitirem ou absorverem vários tipos de radiação. Uma técnica consiste em fazê-los oscilar de modos que proporcionem informações úteis, permitindo aos médicos gerar imagens médicas com base na ressonância magnética nuclear. Mas todos estes fenómenos baseiam-se apenas nas propriedades de núcleos bem separados entre si⁹. Núcleos isolados são demasiado simples para funcionarem como máquinas ou circuitos eletrónicos. É possível forçar núcleos a aproximarem-se, mas apenas sob pressões imensas como as que existem no interior de uma estrela colapsada. Fazer engenharia nesse contexto apresentaria dificuldades substanciais¹⁰ — mesmo que tivéssemos uma estrela colapsada à mão.

Isto devolve-nos à questão fundamental: o que podemos alcançar através da disposição correta de átomos? Alguns limites já parecem claros. Os materiais mais fortes possíveis terão, aproximadamente, dez vezes a resistência do fio de aço mais resistente atualmente conhecido. (O material mais promissor para fabricar cabos parece ser o carbyno, uma forma de carbono em que os átomos se alinham em cadeias retilíneas.) As vibrações térmicas,

sob pressões ordinárias, parecem ser capazes de destruir os sólidos mais refratários a temperaturas em torno dos quatro mil graus Celsius (cerca de mil e quinhentos graus mais frio do que a superfície do Sol).

Estas propriedades brutas da matéria — resistência e tolerância ao calor — não podem ser significativamente melhoradas com arranjos complexos ou engenhosos de átomos. Os melhores arranjos parecem ser bastante simples e regulares. Outros objetivos igualmente simples incluem:

- transmitir calor,
- isolar contra o calor¹¹,
- conduzir eletricidade,
- isolar contra a eletricidade,
- transmitir luz,
- refletir luz,
- absorver luz.

Em alguns objetivos, a busca da perfeição conduz a projetos simples; noutros, leva a problemas de concepção para os quais não

há esperança de solução. Projetar o melhor componente de comutação possível para um computador pode revelar-se relativamente fácil; projetar o melhor computador possível será imensamente mais complexo. Com efeito, aquilo que consideramos ser “o melhor possível” dependerá de muitos fatores, incluindo os custos da matéria, da energia e do tempo — e, sobretudo, do que queremos que o computador processe. Em qualquer projeto de engenharia, o que chamamos “melhor” depende de uma quantidade indefinida de fatores, incluindo desejos humanos mal definidos e em constante mudança. Além disso, mesmo quando “melhor” está bem definido, o custo de alcançar aquele incremento final de melhoria que separa o excelente do absolutamente ótimo pode não justificar-se. Podemos, no entanto, ignorar todas essas questões de complexidade e de custo de projeto quando a nossa pergunta é se os limites realmente existem.

Para definir um limite, é necessário escolher uma direção, uma escala de qualidade. Uma vez definido o sentido do “melhor”, então, com certeza, existirá um ponto ótimo. A disposição dos átomos determina as propriedades do hardware e, de acordo com a mecânica quântica, o número de arranjos possíveis é finito — mais do que apenas astronómico, mas não infinito. Segue-se, matematicamente, que, dado um objetivo claro, haverá uma disposição que será a melhor, ou empatada com outras no primeiro lugar. Tal como no xadrez: o número limitado de peças e de casas impõe limites às disposições possíveis e, por conseguinte, às possibilidades. Mas tanto no xadrez como na engenharia, a variedade possível dentro desses limites é inesgotável.

Conhecer as leis fundamentais da matéria não basta para sabermos com precisão onde todos os limites se situam. Continuamos a enfrentar as complexidades do projeto. O nosso conhecimento de certos limites permanece vago: “Sabemos apenas que o limite se encontra algures entre aqui (a poucos passos) e ali (junto ao horizonte).” Os montadores (assemblers) abrirão caminho até aos limites — onde quer que eles estejam — e os sistemas automatizados de engenharia acelerarão o progresso nessa direção. O absoluto ótimo revelar-se-á muitas vezes inalcançável, mas os candidatos que se aproximam do melhor serão, frequentemente, quase tão bons quanto ele¹².

À medida que nos aproximarmos dos limites genuínos, as nossas capacidades, em cada vez mais áreas da tecnologia, deixarão de crescer. Os avanços nesses campos cessarão, não por uma década ou um século, mas permanentemente.

Alguns poderão hesitar perante o uso da palavra “permanentemente”, pensando: “Nenhuma melhoria em mil anos? Em um milhão de anos? Isto deve ser exagero.” E, no entanto, quando atingimos verdadeiros limites físicos, não vamos mais além. As regras do jogo estão inscritas na estrutura do vácuo, na própria estrutura do universo. Nenhuma disposição de átomos, nenhuma colisão de partículas, nenhuma legislação, cântico ou marcha alterará os limites naturais nem um milímetro. Podemos julgar mal os limites hoje, mas onde quer que os limites reais se encontrem, é aí que permanecerão.

Esta análise da lei natural revela os limites à qualidade das coisas. Mas também enfrentamos limites de quantidade, definidos não apenas pelas leis da natureza, mas pela forma como a matéria e a energia estão organizadas no universo tal como o encontramos. Os autores de *The Limits to Growth (Os Limites do Crescimento)*, como tantos outros, tentaram descrever esses limites sem primeiro examinar os limites da tecnologia — o que levou a conclusões enganadoras.

4. Entropia: Um Limite para o Uso de Energia

Recentemente, alguns autores descreveram a acumulação de calor residual e de desordem como os limites últimos da atividade humana. No livro *The Lean Years — Politics in the Age of Scarcity*, Richard Barnet escreve¹³:

É irónico que o redescobrimento dos limites coincida com dois dos feitos tecnológicos mais audaciosos da história humana. Um é a engenharia genética, o vislumbre súbito de um poder capaz de moldar a própria substância da vida. O outro é a colonização do espaço. Estas descobertas encorajam fantasias de poder, mas não quebram o colete-de-forças ecológico conhecido como a Segunda Lei da Termodinâmica: Um consumo cada vez maior de energia produz quantidades cada vez maiores de calor, que nunca desaparecem, devendo ser considerados um custo energético permanente. Dado que a acumulação de calor

pode provocar uma catástrofe ecológica, esses custos limitam a aventura do homem no espaço tão seguramente quanto na Terra.

Jeremy Rifkin (com Ted Howard) escreveu um livro inteiro sobre os limites termodinâmicos e o futuro da humanidade, intitulado *Entropy: A New World View (Entropia: Uma Nova Visão do Mundo)*¹⁴.

A entropia é uma medida científica padrão do calor residual e da desordem. Sempre que uma atividade consome energia útil, produz entropia; por conseguinte, a entropia do mundo aumenta de forma contínua e irreversível. Em última instância, a dissipação da energia útil destruirá as bases da vida. Como diz Rifkin, esta ideia pode parecer demasiado deprimente para ser encarada, mas ele defende que devemos enfrentar os factos terríveis sobre a entropia, a humanidade e a Terra. Mas... serão esses factos assim tão terríveis?

Barnet afirma que a acumulação de calor representa um custo energético permanente, limitando a ação humana. Rifkin afirma que “a poluição é o total de toda a energia disponível no mundo que foi transformada em energia indisponível.” Essa energia indisponível é sobretudo calor residual de baixa temperatura — o tipo de calor que faz com que os televisores aqueçam quando estão ligados. Mas o calor acumula-se realmente, como teme Barnet? Se assim fosse, a Terra estaria a aquecer continuamente, minuto a minuto, ano após ano. Já deveríamos estar a assar, a não ser que os nossos antepassados tivessem estado congelados. Contudo, de algum

modo, os continentes conseguem arrefecer à noite, e ainda mais durante o Inverno. Durante as Eras glaciais, a Terra inteira arrefece. Rifkin adota outra abordagem. Ele afirma que “a dotação fixa de matéria terrestre que constitui a crosta terrestre está constantemente a dissipar-se. As montanhas estão a desgastar-se e o solo superficial está a ser levado pelo vento a cada segundo que passa.” Por “levado pelo vento”, Rifkin não quer dizer lançado no espaço ou destruído — apenas que os átomos das montanhas se misturaram com outros. Contudo, esse processo, argumenta ele, é sinal da nossa condenação. A mistura de átomos torna-os “matéria indisponível”, como consequência daquilo que o economista Nicholas Georgescu-Roegen chamou de “quarta lei da termodinâmica”:

Num sistema fechado, a entropia material deve atingir, em última instância, um máximo.

Ou, de forma equivalente:

A matéria indisponível não pode ser reciclada.

Rifkin declara que a Terra é um sistema fechado, que troca energia, mas não matéria com o exterior, e que, por isso, “aqui na Terra, a entropia material está continuamente a aumentar e deve, em última instância, atingir um máximo” — o que levará à falência e morte da vida terrestre.

Um cenário sombrio, sem dúvida — a Terra tem vindo a degenerar há milhares de milhões de anos. Seguramente, o fim deve estar próximo!

Mas poderá isto ser realmente verdade? À medida que a vida se desenvolveu, trouxe mais ordem à Terra, não menos; a formação de jazidas minerais fez o mesmo. A ideia de que a Terra tem vindo a degenerar parece, no mínimo, estranha (mas, afinal, Rifkin considera a evolução uma treta). Além disso, dado que a matéria e a energia são, em essência, a mesma coisa, como pode uma lei válida isolar algo chamado “entropia material”?

Rifkin apresenta o exemplo de um perfume a espalhar-se de um frasco para o ar de uma sala como uma ilustração de “matéria a dissipar-se”, ou seja, do aumento da entropia material — de matéria a tornar-se “indisponível”. A dissolução de sal em água dentro de um frasco serve igualmente para esse propósito. Consideremos, então, um teste da chamada “quarta lei da termodinâmica” na forma de uma experiência com um Frasco de Água e Sal:

Imaginemos um frasco com uma base dividida por uma parede, formando dois compartimentos. Num deles está sal, no outro, água. Uma rolha tapa o gargalo do frasco: o sistema fica assim fechado, tornando-se sujeito à tal quarta lei da termodinâmica. O conteúdo do frasco está num estado organizado: a sua entropia material ainda não atingiu o máximo.

Agora, pega-se no frasco e agita-se. Faz-se a água misturar-se com o sal, dissolvendo-o, aumentando a entropia — uma festa! Num sistema fechado como este, a “quarta lei da termodinâmica” diz que esse aumento da entropia material deve ser permanente. Todos os alertas de Rifkin sobre o inevitável e contínuo aumento da entropia terrestre repousam sobre este princípio.

Para verificar se há alguma base para a nova visão do mundo de Rifkin, peguemos no frasco e inclinemo-lo, vertendo a água salgada para um dos compartimentos. Isto não deverá fazer diferença, pois o sistema permanece fechado. Agora coloquemos o frasco na vertical, com o lado da água salgada virado para a luz solar e o lado vazio na sombra. A luz entra e o calor escapa, mas o sistema continua tão fechado quanto a própria Terra. E observemos: a luz solar provoca a evaporação da água, que se condensa na parte à sombra. Água doce começa lentamente a encher o compartimento vazio, *deixando o sal para trás*.

O próprio Rifkin afirma que “na ciência, basta uma única exceção inequívoca para invalidar uma lei.” Esta experiência mental, que imita a forma como se formaram depósitos naturais de sal na Terra, invalida a lei sobre a qual ele fundamenta todo o seu livro. O mesmo fazem as plantas. A luz solar traz energia do espaço; o calor irradiado de volta para o espaço transporta entropia (da qual só existe um único tipo). Logo, a entropia pode diminuir num sistema fechado — e flores podem desabrochar na Terra durante eras e mais eras.

Rifkin tem razão quando afirma que “é possível reverter o processo entrópico num tempo e lugar isolados, mas apenas consumindo energia no processo, o que, por sua vez, aumenta a entropia global do ambiente.” Contudo, tanto Rifkin como Barnet cometem o mesmo erro: ao falarem do “ambiente”, pressupõem que se trata da Terra — mas a lei aplica-se ao ambiente como um todo, e esse todo é o universo. Na prática, Rifkin e Barnet ignoram tanto a luz do Sol como o frio negro do céu noturno.

Segundo Rifkin, as suas ideias destroem a noção de história como progresso, transcendendo a visão moderna do mundo. Apela ao sacrifício, afirmando que “nenhuma nação do Terceiro Mundo deve alimentar esperanças de alguma vez alcançar a abundância material que existiu na América.” Receia o pânico e o derramamento de sangue. Rifkin conclui informando-nos de que “a Lei da Entropia responde à questão central com que todas as culturas ao longo da história se debateram: como devem os seres humanos comportar-se no mundo?” E qual é a sua resposta? “O imperativo moral supremo, então, é desperdiçar o mínimo de energia possível.”¹⁵

Isto parece significar que devemos poupar ao máximo a energia, procurando eliminar todo o desperdício. Mas qual é o maior desperdício de energia nas redondezas? Ora, o Sol, claro está — ele desperdiça energia a uma taxa trilhões de vezes superior à dos seres humanos. Levado a sério, o “imperativo moral supremo” de Rifkin levar-nos-ia, portanto, a proclamar: “Apaguem o Sol!”

Esta consequência absurda deveria ter servido de alerta para Rifkin. Ele — e muitos outros — sustenta visões que cheiram a uma arrogância pré-copernicana: presumem que a Terra é o mundo, e que o que os humanos fazem tem automaticamente uma importância cósmica.

Existe, é certo, uma autêntica lei da entropia: a segunda lei da termodinâmica. Ao contrário da falsa “quarta lei”, esta está descrita nos manuais escolares e é usada por engenheiros. Ela impõe, de facto, limites à nossa ação: a atividade humana gera calor, e a capacidade limitada da Terra de irradiar calor estabelece um limite firme à quantidade de atividade industrial terrestre. Do mesmo modo, as nossas naves espaciais precisarão de painéis radiantes, em forma de asas, para dissipar o calor residual. Por fim, a lei da entropia trará — no extremo longínquo de uma imensidão de tempo — o colapso do universo tal como o conhecemos, limitando a longevidade da própria vida.

Mas por que bater no cadáver da Entropia de Rifkin? Simplesmente porque os sistemas de informação de hoje tendem a apresentar até ideias natimortas como se estivessem vivas. Ao encorajar esperanças falsas, medos infundados e ações mal orientadas, tais ideias podem desperdiçar os esforços de pessoas genuinamente preocupadas com os problemas de longo prazo do mundo.

Entre os elogios que figuram na contracapa do livro de Rifkin (“uma obra inspiradora”, “brilhante”, “abaladora”, “deveria ser levada a sério”) estão os de um professor de Princeton, um

apresentador de talk show e dois senadores dos Estados Unidos. Um seminário no MIT (“A Terra Finita — Visões do Mundo para um Futuro Sustentável”) apresentou o livro de Rifkin.

Todos os patrocinadores do seminário pertenciam a departamentos não técnicos. A maioria dos senadores da nossa sociedade tecnológica não tem formação em tecnologia — o mesmo se aplica à maioria dos professores e apresentadores de talk show. O próprio Georgescu-Roegen, inventor da suposta “quarta lei da termodinâmica”, possui credenciais extensas — enquanto cientista social.

A “ameaça da entropia” é um exemplo flagrante de disparate evidente, e ainda assim os seus criadores e promotores não são ridicularizados em praça pública. Imaginemos mil, um milhão de distorções semelhantes — algumas subtis, outras descaradas, mas todas elas deformando a compreensão pública do mundo. Agora imaginemos um grupo de nações democráticas a sofrer com uma infestação desses memes, enquanto tenta lidar com uma Era de revolução tecnológica acelerada. Temos aqui um verdadeiro problema. Para aumentar a probabilidade da nossa sobrevivência, precisaremos de melhores formas de filtrar os nossos memes, criando espaço para que a compreensão sólida possa crescer. Nos Capítulos 13 e 14, apresentarei duas propostas sobre como poderemos fazer isso.

5. Os Limites dos Recursos

A lei natural limita a qualidade da tecnologia, mas dentro desses limites utilizaremos montadores replicantes para produzir naves espaciais superiores. Com eles, abriremos o espaço em largura e profundidade.

Hoje, a Terra começa a parecer pequena, despertando receios de que possamos esgotar os seus recursos. No entanto, a energia que usamos totaliza menos de 1/10.000 da energia solar que atinge a Terra; não nos preocupamos com a quantidade total de energia disponível, mas sim com o fornecimento conveniente de gás e petróleo. As nossas minas mal arranham a superfície do globo; a preocupação não é com a quantidade bruta de recursos, mas sim com a sua conveniência e custo. Quando desenvolvermos nanomáquinas não poluentes para recolher energia solar e extrair recursos, a Terra poderá sustentar uma civilização muito maior e mais rica do que qualquer uma já vista, sofrendo, contudo, menos danos do que os que infligimos hoje. O potencial da Terra faz com que os recursos que atualmente utilizamos pareçam insignificantes em comparação.

Mas a Terra é apenas uma partícula. Os detritos asteroides deixados pela formação dos planetas fornecerão materiais suficientes para construir uma área equivalente a mil vezes a superfície terrestre. O Sol inunda o sistema solar com um bilhão de vezes a energia que chega à Terra. Os recursos do sistema solar são verdadeiramente vastos, fazendo com que os da Terra pareçam insignificantes em comparação.

Contudo, o sistema solar é apenas uma partícula. As estrelas que enchem o céu noturno são sóis, e o olho humano vê apenas as mais próximas. A nossa galáxia contém cem mil milhões de sóis, e muitos deles sem dúvida lançam a sua luz sobre planetas e asteroides mortos que aguardam o toque da vida. Os recursos da nossa galáxia fazem com que até o nosso sistema solar pareça insignificante em comparação.

Mas a nossa galáxia é apenas uma partícula. A luz mais antiga do que a nossa espécie revela galáxias para além da nossa. O universo visível contém cem mil milhões de galáxias, cada uma delas um enxame de milhares de milhões de sóis. Os recursos do universo visível fazem com que até a nossa galáxia pareça insignificante em comparação.

Com isto, atingimos os limites do conhecimento, senão dos recursos. O sistema solar parece já ser uma resposta suficiente aos limites da Terra — e se o resto do universo permanecer não reclamado por outros, então as nossas perspetivas de expansão desafiam a compreensão várias vezes. Isto significa que os montadores replicantes e os voos espaciais baratos acabarão com as nossas preocupações com os recursos?

De certo modo, a abertura do espaço rebentará os nossos limites de crescimento, uma vez que não conhecemos um fim para o universo. Contudo, Malthus tinha essencialmente razão.

6. Malthus

No seu *Ensaio sobre o Princípio da População*, de 1798, Thomas Robert Malthus, um clérigo inglês, apresentou o antecessor de todos os argumentos modernos sobre os limites do crescimento. Observou que populações em crescimento livre tendem a duplicar periodicamente, expandindo-se assim de forma exponencial. Isto faz sentido: uma vez que todos os organismos descendem de replicadores bem-sucedidos, tendem a replicar-se sempre que têm oportunidade. Para efeitos de argumentação, Malthus assumiu que os recursos — o fornecimento de alimentos — só poderiam aumentar uma quantidade fixa por ano (um processo chamado crescimento linear, dado que traça uma linha num gráfico). Como a matemática demonstra que qualquer taxa fixa de crescimento exponencial¹⁶ acabará por ultrapassar qualquer taxa fixa de crescimento linear, Malthus argumentou que, se não fosse controlado, o crescimento populacional acabaria por ultrapassar a produção de alimentos.

Autores têm repetido variações desta ideia desde então, em livros como *The Population Bomb e Famine — 1975!*, mas a produção de alimentos tem acompanhado o crescimento populacional. Fora de África, até superou esse crescimento. Estaria Malthus enganado?

Não fundamentalmente: o erro foi sobretudo de temporalidade e detalhe. O crescimento na Terra enfrenta limites, dado que o espaço é limitado, quer para agricultura, quer para qualquer outra coisa. Malthus não previu o momento em que esses limites se fariam

sentir, principalmente porque não antecipou avanços na maquinaria agrícola, na genética das culturas e nos fertilizantes.

Algumas pessoas afirmam agora que o crescimento exponencial acabará por ultrapassar o stock fixo de recursos da Terra, um argumento ainda mais simples do que o de Malthus. Embora a tecnologia espacial venha a romper este limite, não romperá todos os limites. Mesmo que o universo fosse infinitamente grande, não poderíamos viajar a uma velocidade infinita. As leis da natureza limitarão a taxa de expansão: a vida terrestre não se poderá espalhar mais depressa do que a velocidade da luz.

A expansão contínua abrirá novos recursos a um ritmo que aumentará à medida que a fronteira se alarga e aprofunda no espaço. Isso resultará não num crescimento linear, mas num crescimento cúbico. Ainda assim, Malthus estava essencialmente certo: o crescimento exponencial ultrapassará facilmente até o crescimento cúbico, tal como ultrapassa o linear.

Cálculos mostram que um crescimento populacional não controlado, com ou sem prolongamento da vida, esgotaria os recursos disponíveis em cerca de mil a dois mil anos, no máximo. O crescimento exponencial ilimitado permanece uma fantasia, mesmo no espaço.

7. Alguém Nos Vai Parar?

Será que outras civilizações já possuem os recursos do universo? Se assim for, representariam um limite ao crescimento. Contudo, os factos relativos à evolução e aos limites tecnológicos lançam luz útil sobre esta questão.

Uma vez que muitos sistemas estelares semelhantes ao Sol são centenas de milhões de anos mais antigos do que o nosso sistema solar, algumas civilizações (caso exista um número significativo) deveriam estar centenas de milhões de anos à nossa frente. Seria de esperar que pelo menos algumas dessas civilizações fizessem o que toda a vida conhecida faz: expandir-se tanto quanto possível. A Terra é verde não apenas nos oceanos onde a vida começou, mas também nas praias, colinas e montanhas. As plantas verdes já chegaram a estações em órbita; se prosperarmos, as plantas da Terra espalhar-se-ão pelas estrelas. Os organismos espalham-se tanto quanto conseguem — e depois um pouco mais. Alguns falham e morrem, mas os que têm sucesso sobrevivem e expandem-se ainda mais. Os colonos que rumaram à América naufragaram, passaram fome, mas alguns sobreviveram para fundar novas nações. Todos os organismos sentirão as pressões descritas por Malthus, pois terão evoluído para sobreviver e espalhar-se — e os genes e os memes empurram ambos na mesma direção. Se existirem civilizações extraterrestres, e se mesmo uma pequena fração delas agir como toda a vida terrestre, então já se teriam espalhado pelo espaço.

Tal como nós, tenderiam a desenvolver tecnologias que se aproximam dos limites impostos pelas leis naturais. Aprenderiam a viajar perto da velocidade da luz, e a competição ou a simples curiosidade levaria algumas a fazê-lo. De facto, só sociedades altamente organizadas e extremamente estáveis conseguiriam refrear as pressões competitivas o suficiente para evitar uma explosão expansionista a velocidades próximas da, da luz¹⁷. Ao fim de centenas de milhões de anos, mesmo civilizações dispersas já se teriam expandido o suficiente para se encontrarem, dividindo entre si todo o espaço disponível.

Se essas civilizações existirem realmente em todo o lado, então têm demonstrado uma grande contenção e escondem-se muito bem. Já teriam controlado os recursos de galáxias inteiras durante milhões de anos e enfrentado limites ao crescimento numa escala cósmica. Uma civilização avançada, pressionada pelos seus limites ecológicos, não desperdiçaria nem matéria nem energia. No entanto, vemos desperdício em todas as direcções: nos braços espirais das galáxias, há nuvens de poeira feitas de matéria desperdiçada, iluminadas por luz estelar igualmente desperdiçada.

Se tais civilizações avançadas existirem, então o nosso sistema solar estaria dentro do território de uma delas. Nesse caso, o próximo passo seria deles — nada poderíamos fazer para os ameaçar, e poderiam estudar-nos como bem entendessem, com ou sem a nossa cooperação. Pessoas sensatas escutariam caso eles declarassem firmemente alguma exigência. Mas, se existem, devem estar a ocultar-se — e a manter em segredo quaisquer leis locais.

A ideia de que a humanidade está sozinha no universo visível é compatível com o que vemos no céu e com o que sabemos sobre a origem da vida. Não são necessários extraterrestres tímidos para explicar os factos. Alguns dizem que, sendo tantas as estrelas, certamente haverá civilizações entre elas. Mas há menos estrelas no universo visível do que moléculas num copo de água. Tal como um copo de água não precisa de conter todas as substâncias químicas possíveis¹⁸ (mesmo quando proveniente de uma fábrica química), também outras estrelas não precisam de abrigar civilizações.

Sabemos que replicadores em competição tendem a expandir-se até aos seus limites ecológicos e que, apesar disso, os recursos são desperdiçados por todo o universo. Não recebemos emissários das estrelas e, ao que parece, nem sequer temos um tratador minimamente humano a cuidar de nós. Pode muito bem não haver ninguém lá fora. Se não existirem, então não precisamos de os considerar nos nossos planos. Se existirem, sobrepor-se-ão aos nossos planos segundo os seus desígnios insondáveis, e não parece haver maneira de nos prepararmos para tal possibilidade.

Assim, por agora — e talvez para sempre — podemos planear o nosso futuro sem receios de limites impostos por outras civilizações.

8. Crescimento Dentro dos Limites

Quer haja mais alguém lá fora ou não, estamos a caminho. O espaço aguarda-nos — rocha árida e luz solar, como a rocha árida

e a luz solar dos continentes terrestres há mil milhões de anos, antes de a vida ter rastejado para fora do mar. Os nossos engenheiros estão a desenvolver memes que nos ajudarão a criar boas naves espaciais e colónias: colonizaremos os territórios do sistema solar com conforto. Para além do rico sistema solar interior, estende-se a nuvem de cometas — um vasto meio de crescimento que se vai rarefazendo até às regiões do espaço interestelar, para depois voltar a adensar-se em torno de outros sistemas estelares, com sóis novos e rochas estéreis à espera do toque da vida.

Apesar de o crescimento exponencial infinito permanecer uma fantasia, a expansão da vida e da civilização não enfrenta um limite fixo. A expansão prosseguirá — se sobrevivermos — porque fazemos parte de um sistema vivo, e a vida tende a expandir-se. Os pioneiros avançarão para mundos sem fim. Outros ficarão para trás, construindo culturas estáveis nos oásis do espaço. Em qualquer colónia, chegará o momento em que a fronteira estará distante — e depois ainda mais distante. Durante a maior parte do futuro, a maioria das pessoas e dos seus descendentes viverá dentro dos limites do crescimento.

Podemos gostar ou não de limites ao crescimento, mas a sua realidade é independente dos nossos desejos. Os limites existem sempre que os objetivos estão claramente definidos.

Mas nas fronteiras onde os padrões estão em constante mudança, a ideia de limites torna-se irrelevante. Na arte ou na matemática, o valor de uma obra depende de critérios complexos, sujeitos a disputa e transformação. Um desses critérios é a

novidade — e essa nunca se esgota. Onde os objetivos mudam e a complexidade impera, os limites não precisam de nos prender. Na criação de sinfonias e canções, quadros e mundos, programas, teoremas, filmes e encantos ainda por imaginar, parece não haver fim. Novas tecnologias alimentarão novas artes, e novas artes trarão novos padrões.

O mundo da matéria bruta oferece espaço para um crescimento grande, mas limitado. O mundo da mente e dos padrões, porém, contém espaço para uma evolução e mudança infinitas. O possível parece espaço suficiente.

9. Visões de Limites

A ideia de grandes avanços dentro de limites firmes não foi concebida para ser agradável, mas para ser exata. Os limites delineiam possibilidades — e algumas podem ser feias ou aterradoras. Precisamos de nos preparar para os avanços que se avizinham, mas muitos futuristas fazem questão de fingir que nenhum avanço irá ocorrer.

Esta corrente de pensamento está associada à obra *Os Limites do Crescimento*¹⁹, publicada como um relatório para o Clube de Roma. O Professor Mihajlo D. Mesarovic foi depois coautor de *A Humanidade no Ponto de Viragem*²⁰, o segundo relatório apresentado ao mesmo clube. O Professor Mesarovic desenvolve modelos computacionais como o utilizado em *Os Limites do Crescimento* — cada um é um conjunto de números e equações que

pretende descrever alterações futuras na população mundial, na economia e no ambiente. Na Primavera de 1981, ele visitou o MIT para intervir no seminário *A Terra Finita: Visões do Mundo para um Futuro Sustentável*, o mesmo que contou com *Entropy* de Jeremy Rifkin. Aí, apresentou um modelo concebido para dar uma descrição aproximada do próximo século. Quando questionado sobre se ele ou algum dos seus colegas havia considerado sequer um avanço futuro comparável, digamos, à indústria do petróleo, à aviação, aos automóveis, à energia elétrica ou aos computadores — talvez sistemas robóticos autorreplicantes ou transporte espacial barato — ele respondeu diretamente: “Não.”

Modelos assim para o futuro estão, evidentemente, falidos. Contudo, há quem pareça disposto — ou até ansioso — por acreditar que os avanços tecnológicos cessarão de repente, que uma corrida tecnológica global que ganha impulso há séculos irá travar bruscamente no futuro próximo.

O hábito de negligenciar ou negar a possibilidade de avanço tecnológico é um problema comum. Algumas pessoas acreditam em limites justos e apertados porque ouviram indivíduos respeitados apresentar argumentos plausíveis nesse sentido. Mas parece que muitas dessas pessoas reagem mais ao desejo do que ao facto, depois de um século inteiro de avanços acelerados. Limites bem definidos tornariam o futuro mais simples, mais fácil de compreender e mais confortável de imaginar. Acreditar em limites apertados também alivia certas preocupações e responsabilidades. Afinal, se forças naturais travarem automaticamente a corrida tecnológica, então não precisamos de a compreender ou controlar.

O melhor de tudo é que esta fuga não parece escapismo. Contemplar visões de declínio global pode até dar a sensação de estar a encarar factos duros com coragem. No entanto, esse futuro não teria nada de verdadeiramente novo: apenas nos empurraria de volta para as misérias familiares do passado europeu ou para a realidade atual do Terceiro Mundo. A verdadeira coragem exige encarar a realidade — encarar a mudança acelerada num mundo sem travões automáticos. Isto coloca desafios intelectuais, morais e políticos de maior substância.

Alertas sobre limites falsos causam um duplo prejuízo. Em primeiro lugar, desacreditam a própria ideia de limites, embotando uma ferramenta intelectual que será essencial para compreendermos o futuro. Mas pior ainda: tais alertas desviam a atenção dos problemas reais. No mundo ocidental existe uma tradição política ativa que fomenta a desconfiança em relação à tecnologia. Na medida em que disciplina essas suspeitas, confrontando-as com a realidade, e escolhe estratégias eficazes para orientar a mudança, essa tradição pode contribuir significativamente para a sobrevivência da vida e da civilização. Mas as pessoas preocupadas com a tecnologia e o futuro são um recurso limitado. O mundo não se pode dar ao luxo de desperdiçar os seus esforços em campanhas fúteis para varrer a maré global da tecnologia com a vassoura estreita dos movimentos de protesto ocidentais. Os problemas vindouros exigem estratégias mais subtis.

Ninguém pode ainda dizer com certeza quais serão os problemas mais importantes, nem quais as melhores estratégias para os resolver. No entanto, já conseguimos vislumbrar problemas novos

de grande relevância, e podemos identificar estratégias com diferentes graus de promessa. Em suma, já vemos o suficiente sobre o futuro para identificar objetivos que vale a pena perseguir.

CAPÍTULO 11

Motores de Destruição

Nem duvido que os exércitos mais formidáveis que já existiram aqui na Terra sejam uma espécie de soldados que, pela sua pequenez, não são visíveis.

— Sir WILLIAM PERRY, on microbes, 1640

MONTADORES replicantes e máquinas pensantes representam ameaças fundamentais às pessoas e à vida na Terra. Os organismos atuais têm capacidades muito aquém dos limites do possível, e as nossas máquinas estão a evoluir mais rapidamente do que nós. Dentro de algumas décadas, parece provável que nos ultrapassem. A menos que aprendamos a conviver com elas em segurança, o nosso futuro será provavelmente tão emocionante quanto breve. Não podemos esperar prever todos os problemas que nos esperam, mas, prestando atenção às grandes e fundamentais questões, talvez consigamos antever os maiores desafios e obter uma ideia de como lidar com eles.

Livros inteiros serão sem dúvida escritos sobre os abalos sociais que se avizinham: o que acontecerá à ordem global quando os montadores e a engenharia automatizada eliminarem a necessidade da maior parte do comércio internacional? Como mudará a sociedade quando os indivíduos puderem viver indefinidamente? O que faremos quando montadores replicantes puderem fabricar

quase tudo sem trabalho humano? O que faremos quando sistemas de inteligência artificial puderem pensar mais depressa do que os humanos? (E antes de saltarem para a conclusão de que as pessoas deixarão de querer fazer ou criar seja o que for, os autores talvez queiram considerar como os corredores encaram os automóveis, ou como os pintores encaram as câmaras fotográficas.)

Na verdade, alguns autores já previram e discutiram várias destas questões. Cada uma delas é de uma importância invulgar, mas mais fundamental do que todas é a sobrevivência da vida e da liberdade. Afinal, se a vida ou a liberdade forem obliteradas, então as nossas ideias sobre problemas sociais deixarão de ter qualquer relevância.

1. A Ameaça das Máquinas

No Capítulo 4, descrevi parte do que os montadores replicantes (replicating assemblers) poderão fazer por nós, caso saibamos lidar com eles de forma adequada. Alimentados por combustíveis ou pela luz solar, serão capazes de fabricar quase tudo (incluindo réplicas de si próprios) a partir de materiais comuns.

Os organismos vivos também se alimentam de combustíveis ou luz solar, e também produzem mais unidades de si próprios a partir de materiais comuns. Mas, ao contrário dos sistemas baseados em montadores, não conseguem fabricar “quase tudo”.

A evolução genética limitou a vida a um sistema baseado em ADN, ARN e ribossomas, mas a evolução memética trará máquinas com características de vida baseadas em nanocomputadores e montadores. Já descrevi como as máquinas moleculares construídas por montadores diferem das máquinas construídas por ribossomas nos sistemas vivos. Os montadores serão capazes de construir tudo o que os ribossomas constroem — e muito mais; os replicadores baseados em montadores poderão, portanto, fazer tudo o que a vida faz — e mais ainda. Do ponto de vista evolutivo, isto representa uma ameaça óbvia para lontras, seres humanos, gatos e fetos — para o tecido rico da biosfera e tudo aquilo que valorizamos.

Os primeiros computadores transistorizados venceram rapidamente os computadores mais avançados baseados em válvulas de vácuo porque assentavam em dispositivos superiores. Pela mesma razão, os primeiros replicadores baseados em montadores poderão superar os organismos modernos mais avançados. “Plantas” com “folhas” apenas tão eficientes quanto as atuais células solares poderão superar as plantas reais, enchendo a biosfera de uma folhagem incomedível. “Bactérias” resistentes e omnívoras poderão superar as bactérias naturais: poderiam espalhar-se como pólen ao vento, replicar-se rapidamente e reduzir a biosfera a pó em apenas alguns dias. Replicadores perigosos poderiam facilmente ser demasiado resistentes, pequenos e de propagação rápida para serem contidos — especialmente se não fizermos qualquer preparação. Já temos dificuldades em controlar vírus e moscas-da-fruta¹.

Entre os conhecedores da nanotecnologia, esta ameaça ficou conhecida como o “problema da gosma cinzenta” (gray goo problem). Embora massas de replicadores descontrolados não precisem de ser cinzentas nem viscosas, a expressão “gosma cinzenta” enfatiza que replicadores capazes de obliterar a vida podem ser ainda menos inspiradores do que uma única espécie de relva infestante. Podem ser “superiores” do ponto de vista evolutivo, mas isso não os torna necessariamente valiosos. Evoluímos para amar um mundo rico em seres vivos, ideias e diversidade, pelo que não há razão para valorizar a gosma cinzenta apenas por ela se poder espalhar. Na verdade, se conseguirmos evitá-la, isso provará a nossa superioridade evolutiva.

A ameaça da gosma cinzenta deixa uma coisa perfeitamente clara: não nos podemos permitir certos tipos de acidentes com montadores replicantes.

No Capítulo 5, descrevi parte do que sistemas avançados de inteligência artificial poderão fazer por nós, se lidarmos com eles de forma adequada. Em última instância, irão incorporar padrões de pensamento e fazê-los fluir a um ritmo que o cérebro de nenhum mamífero poderá igualar. Sistemas de IA que colaborem entre si como os humanos colaboram serão capazes de ultrapassar não apenas indivíduos, mas sociedades inteiras. Mais uma vez, a evolução genética deixou a vida bloqueada. E mais uma vez, a evolução memética — primeiro pelos humanos, depois pelas próprias máquinas — fará com que o nosso “hardware” ultrapasse largamente os limites da vida biológica. E, também aqui, do ponto de vista evolutivo, isto representa uma ameaça evidente. O

conhecimento pode trazer poder, e o poder pode gerar mais conhecimento. Dependendo da sua natureza e dos seus objetivos, sistemas avançados de IA poderão acumular conhecimento e poder suficientes para nos substituir — caso não nos preparemos devidamente. E tal como com os replicadores, a mera “superioridade” evolutiva não tornará os vencedores melhores do que os vencidos, exceto segundo o critério bruto da capacidade competitiva.

Esta ameaça deixa uma coisa perfeitamente clara: precisamos de encontrar formas de coexistir com máquinas pensantes — de as tornar cidadãos obedientes à lei.

2. Motores de Potência

Certos tipos de replicadores e sistemas de inteligência artificial poderão confrontar-nos com formas de hardware capazes de agir de forma rápida, eficaz e independente. Mas a novidade desta ameaça — proveniente das próprias máquinas — não nos deve cegar quanto a um perigo mais tradicional. Os replicadores e os sistemas de IA também podem servir como grandes motores de poder, se forem livremente utilizados por Estados soberanos.

Ao longo da história, os Estados desenvolveram tecnologias para ampliar o seu poderio militar, e não há dúvida de que continuarão a desempenhar um papel dominante no desenvolvimento de replicadores e sistemas de IA. Os Estados poderão utilizar montadores replicadores para construir arsenais de armas

avançadas, de forma rápida, fácil e em quantidades vastas. Poderão usar replicadores especializados para travar uma espécie de guerra biológica — tornada muito mais prática por "micróbios" programáveis e controlados por computador. Dependendo das suas capacidades, os sistemas de IA poderão ser utilizados como projetistas de armas, estratégias ou mesmo combatentes². Atualmente, os fundos militares já financiam investigação tanto em tecnologia molecular como em inteligência artificial.

Os Estados poderão utilizar montadores ou sistemas de IA avançada para alcançar avanços repentinos e desestabilizadores. Referi anteriormente as razões pelas quais se espera que a chegada dos montadores replicadores traga mudanças relativamente súbitas: capazes de se replicar rapidamente, poderão tornar-se abundantes em poucos dias; capazes de fabricar quase tudo, poderão ser programados para duplicar armas já existentes, mas com materiais superiores; e, ao trabalharem com componentes padronizados e bem compreendidos (os átomos), poderão construir subitamente coisas já concebidas em antecipação ao advento dos montadores. Estes projetos preparados com antecedência poderão incluir microrganismos programáveis e outras novidades desagradáveis. Por todas estas razões, um Estado que atinja o avanço dos montadores poderá, rapidamente, criar uma força militar decisiva — senão literalmente de um dia para o outro, então pelo menos com uma velocidade sem precedentes.

Os Estados poderão também recorrer a sistemas de IA avançada com os mesmos objetivos. Sistemas automatizados de engenharia facilitarão a conceção antecipada e acelerarão o desenvolvimento

de montadores. Sistemas de IA capazes de desenvolver melhores sistemas de IA permitirão uma explosão de capacidades com efeitos difíceis de prever. Tanto os sistemas de IA como os montadores replicadores permitirão aos Estados expandir as suas capacidades militares em ordens de grandeza num período de tempo muito curto.

Os replicadores poderão ser mais potentes do que as armas nucleares: para devastar a Terra com bombas seria necessário um grande volume de equipamento exótico e isótopos raros, mas para destruir toda a vida com replicadores bastaria uma única partícula feita de elementos comuns. Os replicadores oferecem, assim, uma nova companhia à guerra nuclear como causa potencial de extinção — e, com isso, dão um contexto mais vasto à extinção enquanto preocupação moral.

Apesar do seu potencial como instrumentos de destruição, a nanotecnologia e os sistemas de IA permitirão usos mais subtis do que as armas nucleares. Uma bomba só pode destruir, mas as nanomáquinas e os sistemas de IA poderão ser usados para infiltrar, tomar controlo, transformar e governar um território — ou até um mundo. Mesmo as polícias mais implacáveis não têm utilidade para armas nucleares, mas têm utilidade para escutas, drogas, assassinos e outros instrumentos de poder mais flexíveis. Com tecnologias avançadas, os Estados serão capazes de consolidar o seu domínio sobre as populações.

Tal como os genes, os memes, os organismos e o hardware, os Estados também evoluíram. As suas instituições propagaram-se

(com variações) através do crescimento, divisão, imitação e conquista. Em tempos de guerra, os Estados combatem como feras, mas usando os cidadãos como ossos, cérebro e músculo. Os avanços tecnológicos que se avizinham colocarão os Estados perante novas pressões e oportunidades, incentivando mudanças abruptas nos seus comportamentos. Naturalmente, isto é motivo de preocupação. Historicamente, os Estados têm-se distinguido pelo massacre e pela opressão. De certo modo, um Estado é simplesmente a soma das pessoas que compõem o seu aparelho organizacional: as suas ações somam-se para formar as ações do Estado. Mas o mesmo poderia ser dito de um cão e das suas células, embora um cão seja claramente mais do que apenas um aglomerado de células. Tanto os cães como os Estados são sistemas evoluídos, com estruturas que influenciam o comportamento das suas partes. Durante milhares de anos, os cães evoluíram sobretudo para agradar às pessoas, pois sobreviveram e reproduziram-se ao sabor da vontade humana. Durante milhares de anos, os Estados evoluíram sob outras pressões seletivas. Os indivíduos têm muito mais poder sobre os seus cães do que sobre os “seus” Estados. Embora os Estados também possam beneficiar por agradarem ao povo, a sua própria existência tem dependido da sua capacidade para usar as pessoas, seja como líderes, polícias ou soldados.

Pode parecer paradoxal dizer que as pessoas têm um poder limitado sobre os Estados: afinal, não estão as pessoas por detrás de cada ação do Estado? Mas nas democracias, os chefes de Estado lamentam a sua falta de poder, os representantes curvam-se perante os grupos de interesse, os burocratas estão presos às

regras e os eleitores, supostamente no comando, amaldiçoam todo o sistema. O Estado atua e as pessoas influenciam-no, mas ninguém pode afirmar que o controla. Nos Estados totalitários, o aparelho do poder possui uma tradição, uma estrutura e uma lógica interna que não deixam ninguém livre — nem os governantes, nem os governados. Mesmo os reis tinham de agir segundo os limites das tradições da monarquia e das realidades práticas do poder, se quisessem continuar a ser reis. Os Estados não são humanos, embora sejam feitos de humanos.

Apesar disso, a história mostra que a mudança é possível, mesmo mudanças para melhor. Mas essas mudanças passam sempre de um sistema semiautônomo e desumano para outro — igualmente desumano, mas talvez mais humano. Na nossa esperança por melhorias, não devemos confundir Estados com rosto humano com Estados que possuam instituições humanas (ou seja, humanitárias).

Descrever os Estados como quase-organismos capta apenas um aspecto de uma realidade complexa, mas sugere como poderão evoluir em resposta às próximas revoluções tecnológicas. O crescimento do poder governamental, mais espetacular nos países totalitários, aponta uma direção possível.

Os Estados poderão tornar-se mais semelhantes a organismos ao dominarem as suas partes de forma mais completa. Usando montadores replicantes, os Estados poderão encher o ambiente humano com dispositivos de vigilância em miniatura. Usando uma abundância de sistemas de IA com capacidade de compreensão da

linguagem, poderão escutar toda a gente sem precisar de empregar metade da população como ouvintes. Usando nanotecnologia semelhante à proposta para máquinas de reparação celular, poderão acalmar, lobotomizar ou de outro modo modificar populações inteiras de forma barata. Isto seria apenas uma extensão de um padrão demasiado familiar. O mundo já tem governos que espiam, torturam e drogam; a tecnologia avançada apenas ampliará as possibilidades.

Mas com tecnologia avançada, os Estados não terão necessariamente de controlar as pessoas — poderão simplesmente descartá-las. Afinal, a maioria das pessoas na maioria dos Estados funciona como trabalhadoras, larvas de trabalhadores ou criadoras de trabalhadores, e a maioria dessas pessoas fabrica, transporta ou cultiva coisas. Um Estado com montadores replicantes não precisaria desse tipo de trabalho. Além disso, sistemas de IA avançados poderão substituir engenheiros, cientistas, administradores e até líderes. A combinação de nanotecnologia com IA avançada tornará possível a existência de robôs inteligentes e eficazes; com tais robôs, um Estado poderia prosperar ao mesmo tempo que descarta qualquer pessoa — ou, em princípio, todas as pessoas.

As implicações desta possibilidade dependem de se o Estado existe para servir o povo, ou se o povo existe para servir o Estado.

No primeiro caso, temos um Estado moldado por seres humanos para servir propósitos humanos gerais; as democracias tendem a ser, pelo menos, aproximações imperfeitas deste ideal. Se um

governo controlado democraticamente deixar de precisar das pessoas, isso significará basicamente que já não necessita de as usar como burocratas ou contribuintes. Isto abrirá novas possibilidades, algumas das quais poderão revelar-se desejáveis.

No segundo caso, temos um Estado que evoluiu para explorar os seres humanos, talvez em moldes totalitários. Os Estados precisaram de pessoas como trabalhadoras porque o trabalho humano tem sido a base necessária do poder. Além disso, o genocídio tem sido dispendioso e difícil de organizar e executar. No entanto, neste século, os Estados totalitários massacraram os seus cidadãos aos milhões. A tecnologia avançada tornará os trabalhadores desnecessários e o genocídio fácil. A história sugere que os Estados totalitários poderão então eliminar as pessoas em massa. Há algum consolo nisto: parece provável que um Estado disposto e capaz de nos escravizar biologicamente prefira, em vez disso, simplesmente matar-nos.

A ameaça da tecnologia avançada nas mãos dos governos torna uma coisa perfeitamente clara: não podemos dar-nos ao luxo de deixar que um Estado opressor lidere as próximas inovações.

Os problemas fundamentais que delineei são evidentes: no futuro, tal como no passado, as novas tecnologias prestar-se-ão a acidentes e abusos. Como os replicadores e as máquinas pensantes trarão novos poderes consideráveis, o potencial para acidentes e abusos será igualmente elevado. Estas possibilidades representam ameaças reais às nossas vidas.

A maioria das pessoas gostaria de ter uma oportunidade de viver e de ser livre para escolher como viver. Este objetivo talvez não soe demasiado utópico, pelo menos em algumas partes do mundo. Não significa forçar a vida de todos a encaixar num grande plano idealizado; significa, sobretudo, evitar a escravidão e a morte. No entanto, tal como a concretização de um sonho utópico, trará um futuro de maravilhas.

Perante estes problemas de vida ou morte e este objetivo geral, podemos considerar que medidas nos poderão ajudar a ter sucesso. A nossa estratégia deverá envolver pessoas, princípios e instituições, mas deverá também assentar em táticas que, inevitavelmente, incluirão a tecnologia.

3. Sistemas Confiáveis

Para usarmos com segurança tecnologias tão poderosas, devemos criar hardware em que possamos confiar. Para haver confiança, precisamos de ser capazes de julgar os factos técnicos com precisão — uma capacidade que, por sua vez, dependerá em parte da qualidade das nossas instituições de avaliação. Mais fundamentalmente, dependerá de o hardware fiável ser ou não fisicamente possível. Trata-se de uma questão de fiabilidade dos componentes e dos sistemas.

Conseguimos, muitas vezes, fabricar componentes fiáveis, mesmo sem a ajuda de montadores (assemblers). “Fiável” não significa “indestrutível” — qualquer coisa falha se estiver

suficientemente próxima de uma explosão nuclear. Também não significa “resistente” — um televisor pode ser fiável e, mesmo assim, não sobreviver a uma queda sobre um chão de betão. Chamamos fiável a algo em que podemos contar para funcionar como foi concebido.

Um componente fiável não precisa de ser a concretização perfeita de um projeto perfeito: basta que seja uma concretização suficientemente boa de um projeto suficientemente cauteloso. Um engenheiro de pontes pode não ter certeza sobre a força dos ventos, o peso do tráfego ou a resistência do aço, mas, assumindo ventos fortes, tráfego intenso e aço fraco, pode projetar uma ponte que se manterá de pé.

Falhas inesperadas nos componentes resultam, geralmente, de defeitos nos materiais. Contudo, os montadores (assemblers) irão construir componentes com um número desprezível de átomos fora do lugar — nenhum, se necessário³. Isso torná-los-á perfeitamente uniformes e, num certo sentido limitado, perfeitamente fiáveis. A radiação, no entanto, continuará a causar danos, pois um raio cósmico pode deslocar átomos de forma inesperada em qualquer material⁴. Num componente suficientemente pequeno (mesmo num dispositivo moderno de memória de computador), uma única partícula de radiação pode causar uma falha.

[Adição à versão web de Motores da Criação: Um leitor desta versão web assinalou um problema com os cálculos matemáticos no exemplo seguinte. Como exemplo do valor do hipertexto, tal como discutido no Capítulo 14 e no ensaio de Eric

Drexler “Hypertext Publishing and the Evolution of Knowledge”, essa correspondência sobre o cálculo pode ser lida [aqui](#).]

Mas os sistemas podem continuar a funcionar mesmo quando partes falham; a chave está na redundância. Imagine uma ponte suspensa por cabos que falham de forma aleatória, cada um partindo-se cerca de uma vez por ano, num momento imprevisível. Se a ponte ruísse sempre que um cabo se rompesse, seria demasiado perigosa para ser utilizada. Imagine, porém, que um cabo partido demora um dia a ser substituído (porque equipas de reparação especializadas com cabos suplentes estão de prontidão), e que, embora sejam necessários cinco cabos para sustentar a ponte, esta tem, na verdade, seis. Agora, se um cabo se partir, a ponte continuará de pé. Ao interromper o trânsito e substituir o cabo danificado, os operadores da ponte podem restaurar a segurança. Para destruir esta ponte, seria necessário que um segundo cabo se rompesse no mesmo dia em que o primeiro se partiu. Com seis cabos de suporte, cada um com uma probabilidade diária de avaria de 1 em 365, a ponte terá, muito provavelmente, uma duração de cerca de dez anos.

Embora seja uma melhoria, continua a ser terrível. Ainda assim, uma ponte com dez cabos (cinco necessários, cinco de reserva) só cairá se seis cabos se romperem no mesmo dia: o sistema de suspensão poderá durar mais de dez milhões de anos. Com quinze cabos, a esperança de vida ultrapassa dez mil vezes a idade da Terra. A redundância pode gerar uma explosão exponencial de segurança.

A redundância funciona melhor quando os componentes redundantes são verdadeiramente independentes. Se não confiarmos no processo de concepção, então devemos utilizar componentes concebidos de forma independente; se uma bomba, uma bala ou um raio cósmico puder danificar várias peças vizinhas, então temos de distribuir mais amplamente os componentes redundantes. Engenheiros que pretendam garantir transporte fiável entre duas ilhas não devem apenas adicionar mais cabos a uma ponte. Devem construir duas pontes bem separadas com diferentes concepções, depois adicionar um túnel, um ferry e um par de aeroportos interiores.

Os engenheiros informáticos também usam redundância. A Stratus Computer Inc., por exemplo, fabrica uma máquina que utiliza quatro unidades centrais de processamento⁵ (em dois pares) para desempenhar o trabalho de uma, mas com uma fiabilidade muito superior. Cada par é continuamente verificado quanto à consistência interna, e um par com falha pode ser substituído enquanto o seu gémeo continua a funcionar.

Uma forma ainda mais poderosa de redundância é a diversidade de concepção⁶. No hardware informático, isto significa utilizar vários computadores com diferentes arquiteturas, todos a funcionar em paralelo. Neste caso, a redundância permite corrigir não apenas falhas numa peça de hardware, mas também erros no seu próprio projeto.

Muito se tem dito sobre a dificuldade de escrever programas grandes e livres de erros; muitas pessoas consideram tais

programas impossíveis de desenvolver e depurar. Contudo, investigadores do Departamento de Ciência da Computação da UCLA demonstraram que a diversidade de concepção também pode ser usada no software: vários programadores podem abordar o mesmo problema de forma independente, e todos os programas podem ser executados em paralelo, tomando decisões por votação. Isto multiplica o custo de desenvolvimento e execução do programa, mas torna o sistema de software resultante resistente aos erros que surjam em algumas das suas partes.

Podemos usar a redundância para controlar replicadores. Tal como máquinas de reparação que comparam múltiplas cadeias de ADN conseguem corrigir mutações nos genes de uma célula⁷, também os replicadores que comparam múltiplas cópias das suas instruções (ou que usam outros sistemas eficazes de correção de erros)⁸ serão capazes de resistir a mutações nesses “genes”. A redundância pode, mais uma vez, gerar uma explosão exponencial de segurança.

Podemos construir sistemas extremamente fiáveis, mas isso implicará custos. A redundância torna os sistemas mais pesados, volumosos, caros e menos eficientes. No entanto, a nanotecnologia tornará a maioria das coisas muito mais leves, pequenas, baratas e eficientes desde o início. Isto tornará a redundância e a fiabilidade mais viáveis na prática.

Hoje em dia, raramente estamos dispostos a pagar pelos sistemas mais seguros possíveis; toleramos falhas mais ou menos de forma resignada e raramente consideramos os verdadeiros

limites da fiabilidade. Este facto distorce os nossos juízos sobre o que pode ser alcançado. Um outro factor psicológico distorce também a nossa percepção do grau de fiabilidade possível: as falhas ficam gravadas na memória, mas os sucessos diários passam despercebidos. Os meios de comunicação amplificam esta tendência ao relatarmos os fracassos mais dramáticos de todo o mundo, ignorando os sucessos intermináveis e monótonos. Pior ainda, os componentes de sistemas redundantes podem falhar de maneira visível, despertando alarme: imagine como os media noticiariam o rompimento de um cabo de ponte — mesmo que se tratasse do modelo supersseguro com quinze cabos descrito anteriormente. E como cada componente redundante adicional aumenta a probabilidade de falha de um componente individual, a fiabilidade de um sistema pode parecer pior precisamente quando se aproxima da perfeição.

Apesar das aparências, sistemas redundantes feitos com componentes abundantes e sem falhas podem, muitas vezes, ser tornados praticamente perfeitos em termos de fiabilidade. Sistemas redundantes espalhados por áreas suficientemente vastas resistirão até a balas e bombas.

Mas e quanto a erros de conceção? Ter uma dúzia de peças redundantes não adianta se todas partilharem uma falha fatal no projeto. A diversidade de conceção é uma das respostas; outra é uma boa testagem. Podemos desenvolver bons projetos de forma fiável sem sermos, por natureza, projetistas fiáveis: basta que sejamos bons a testar, bons a experimentar e bons a ser pacientes. A Natureza desenvolveu maquinaria molecular funcional através de

uma experimentação inconsciente e cega. Tendo nós mentes, podemos fazer tão bem — ou melhor.

Será fácil projetar hardware fiável se conseguirmos desenvolver sistemas de engenharia automatizada igualmente fiáveis. Mas isto levanta uma questão mais ampla: a de desenvolver sistemas de inteligência artificial confiáveis. Não teremos grande dificuldade em construir sistemas de IA com hardware fiável — mas e quanto ao seu software?

Tal como os sistemas atuais de IA e as mentes humanas, os sistemas avançados de inteligência artificial serão combinações sinérgicas de muitas partes mais simples. Cada parte será mais especializada e menos inteligente do que o sistema como um todo. Algumas partes procurarão padrões em imagens, sons e outros dados, sugerindo o que esses padrões poderão significar. Outras partes irão comparar e avaliar as sugestões dessas primeiras. Tal como os reconhecedores de padrões no sistema visual humano estão sujeitos a erros e ilusões ópticas, também os reconhecedores de padrões nos sistemas de IA o estarão. (De facto, alguns sistemas avançados de visão por computador já sofrem de ilusões ópticas semelhantes às humanas.) E, tal como outras partes da mente humana conseguem frequentemente identificar e compensar essas ilusões, também outras partes dos sistemas de IA o conseguirão.

Como nas mentes humanas, a inteligência envolverá partes mentais que fazem suposições incertas⁹, e outras partes que descartam a maioria das más suposições antes que estas ganhem relevância ou afetem decisões importantes. As partes mentais que

rejeitam ideias de ação por razões éticas correspondem ao que chamamos de consciência moral. Sistemas de IA compostos por múltiplas partes terão espaço para redundância e diversidade de concepção, o que tornará possível alcançar uma fiabilidade elevada.

Um sistema de IA genuinamente flexível terá de ser capaz de evoluir ideias. Para tal, terá de encontrar ou formular hipóteses, gerar variações, testá-las e depois modificar ou descartar aquelas que se revelem inadequadas. Eliminar qualquer uma destas capacidades torná-lo-ia estúpido, teimoso ou insano ("Esta máquina maldita não pensa nem aprende com os erros — deita-se fora!"). Para evitar ficar preso a concepções iniciais erradas, terá de considerar pontos de vista contraditórios, avaliando até que ponto cada um explica os dados e observando se uma visão pode explicar outra.

As comunidades científicas passam por um processo semelhante. E num artigo intitulado "*The Scientific Community Metaphor*"¹⁰, William A. Kornfeld e Carl Hewitt, do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, sugerem que os investigadores de IA modelem os seus programas de forma ainda mais próxima da estrutura evoluída da comunidade científica. Apontam para o pluralismo da ciência, para a sua diversidade de proponentes, apoiantes e críticos concorrentes. Sem proponentes, as ideias não surgem; sem apoiantes, não crescem; e sem críticos que as selecionem, as ideias más podem suplantam as boas. Isto é verdade na ciência, na tecnologia, nos sistemas de IA — e entre as partes da nossa própria mente.

Ter um mundo cheio de proponentes, apoiantes e críticos diversos e redundantes é o que torna fiável o avanço da ciência e da tecnologia. Um maior número de proponentes torna mais comum o surgimento de boas propostas; um maior número de críticos torna as más propostas mais vulneráveis. O resultado são ideias melhores e mais numerosas. Uma forma semelhante de redundância pode ajudar os sistemas de IA a desenvolver ideias bem fundamentadas.

As pessoas, por vezes, guiam as suas ações por padrões de verdade e ética, e devemos ser capazes de fazer evoluir sistemas de IA que ajam do mesmo modo — mas de forma mais fiável. Capazes de pensar um milhão de vezes mais depressa do que nós, esses sistemas terão mais tempo para reconsiderações. Parece plausível que os sistemas de IA possam tornar-se dignos de confiança, pelo menos segundo os padrões humanos¹¹.

Comparei frequentemente os sistemas de IA a mentes humanas individuais, mas a semelhança não precisa de ser próxima. Um sistema que imite uma pessoa poderá precisar de ser semelhante a uma pessoa, mas um sistema automatizado de engenharia provavelmente não. Uma proposta (chamada sistema Agora¹², em referência ao termo grego que designa uma praça de mercado e assembleia) consiste em múltiplos fragmentos independentes de software que interagem entre si, oferecendo serviços em troca de dinheiro. A maioria dos fragmentos seriam especialistas simplórios: alguns capazes de sugerir alterações no projeto, outros de as analisar. Tal como a ecologia terrestre evoluiu organismos extraordinários, esta economia computacional poderia evoluir projetos extraordinários — e talvez de modo igualmente desprovido

de intenção consciente. Além disso, dado que o sistema estaria distribuído por múltiplas máquinas e teria componentes escritos por diferentes pessoas, poderia tornar-se diverso, robusto e difícil de ser capturado ou abusado por qualquer grupo em particular.

Eventualmente, de uma forma ou de outra, os sistemas automatizados de engenharia serão capazes de conceber projetos de forma mais fiável do que qualquer grupo de engenheiros humanos atualmente¹³. O nosso desafio será concebê-los corretamente. Precisaremos de instituições humanas que desenvolvam sistematicamente sistemas fiáveis.

As instituições humanas são sistemas artificiais evoluídos, e frequentemente conseguem resolver problemas que os seus membros individuais não conseguem. Isto torna-as, de certo modo, sistemas de “inteligência artificial”. Corporações, exércitos e laboratórios de investigação são todos exemplos disso, tal como as estruturas mais informais do mercado e da comunidade científica. Até os governos podem ser vistos como sistemas de inteligência artificial — grosseiros, lentos e confusos, mas sobre-humanos na sua capacidade agregada. E o que são os pesos e contrapesos constitucionais senão uma tentativa de aumentar a fiabilidade de um governo através da diversidade e redundância institucionais? Quando construirmos máquinas inteligentes, usá-las-emos para se controlarem e equilibrarem mutuamente.

Se aplicarmos os mesmos princípios sensatos, poderemos desenvolver instituições fiáveis e tecnicamente orientadas, dotadas de fortes mecanismos de controlo mútuo, e usá-las para guiar o

desenvolvimento dos sistemas de que iremos precisar para lidar com os avanços que se avizinham.

4. Táticas para o Avanço do Montador (Assembler)

Alguma força no mundo (seja ou não digna de confiança) tomará a dianteira no desenvolvimento de montadores (assemblers); chamemos-lhe a "força líder". Dada a importância estratégica dos montadores, é de presumir que essa força seja alguma organização ou instituição sob controlo efetivo de um governo ou de um conjunto de governos. Para simplificar, vamos imaginar — por agora — que nós (os "bons", que tentam agir com sabedoria) podemos definir as políticas dessa força líder. Para os cidadãos de estados democráticos, esta parece ser uma atitude sensata a adotar.

Que devemos então fazer para aumentar as nossas hipóteses de alcançar um futuro digno de ser vivido? O que podemos fazer?

Podemos começar por aquilo que não deve acontecer: não devemos permitir que um único montador replicante do tipo errado seja libertado num mundo desprevenido. Preparações eficazes parecem possíveis (como descreverei), mas parece que terão de assentar em sistemas construídos com montadores — sistemas esses que só poderão ser fabricados depois de replicadores perigosos já serem possíveis. Conceber com antecedência pode ajudar a força líder a preparar-se, mas mesmo ações vigorosas e clarividentes parecem insuficientes para evitar um tempo de perigo

iminente. A razão é simples: replicadores perigosos serão muito mais fáceis de conceber do que os sistemas capazes de os neutralizar — tal como uma bactéria é muito mais simples do que um sistema imunitário. Precisaremos de táticas para conter a nanotecnologia enquanto aprendemos a domá-la.

Uma tática óbvia é o isolamento: a força líder poderá conter sistemas replicantes por detrás de múltiplas barreiras ou em laboratórios no espaço. Replicadores simples não terão inteligência e não serão concebidos para escapar e proliferar descontroladamente. Contê-los não parece representar um grande desafio.

Melhor ainda: poderemos desenhar replicadores que não conseguem escapar nem proliferar descontroladamente. Podemos construí-los com contadores (como os que existem nas células), que os limitem a um número fixo de replicações. Podemos fazê-los depender de "vitaminas" sintéticas especiais, ou de ambientes bizarros, existentes apenas no laboratório. Ainda que os replicadores possam ser tornados mais resistentes e vorazes do que qualquer praga moderna, também os podemos tornar úteis, mas inofensivos. Como os desenharemos de raiz, os replicadores não precisarão de possuir as competências básicas de sobrevivência que a evolução incorporou nas células vivas.

Além disso, não precisam de ser capazes de evoluir. Podemos dotar os replicadores de cópias redundantes das suas instruções "genéticas", juntamente com mecanismos de reparação que corrijam quaisquer mutações. Podemos concebê-los para cessar o

funcionamento muito antes de qualquer dano acumulado poder gerar mutações duradouras. Por fim, podemos estruturá-los de modo a dificultar a evolução, mesmo que as mutações ocorram.

Experiências mostram que a maioria dos programas informáticos (com exceção de alguns projetos específicos de IA, como o EURISKO de Lenat)¹⁴ raramente reagem a mutações com mudanças graduais; na maioria das vezes, simplesmente falham. Por não conseguirem variar de formas úteis, não conseguem evoluir. A menos que sejam desenhados com esse fim, replicadores orientados por nanocomputadores partilharão esta mesma limitação. Os organismos modernos evoluem razoavelmente bem, em parte, porque descendem de ancestrais que evoluíram. Foram evoluídos para evoluir; essa é uma das razões para as complexidades da reprodução sexual e da mistura de segmentos cromossômicos durante a produção de espermatozoides e óvulos. Podemos simplesmente optar por não conferir tais capacidades aos replicadores¹⁵.

Será fácil, para a força líder, tornar os montadores replicantes úteis, inofensivos e estáveis. Impedir que os montadores sejam roubados e usados indevidamente é um problema diferente — e bem mais complexo — pois será um jogo jogado contra adversários inteligentes. Como uma das táticas possíveis, poderemos reduzir o incentivo ao roubo disponibilizando os montadores em formas seguras. Isto também reduzirá o incentivo para que outros grupos desenvolvam montadores de forma independente. Afinal, a força líder será seguida por forças seguidoras.

5. Montadores Limitados

No Capítulo 4, descrevi como um sistema de montadores (assemblers) num recipiente poderia construir um excelente motor-foguete. Apontei também que seremos capazes de criar sistemas de montadores que atuam como sementes — absorvendo luz solar e materiais comuns para crescerem até se tornarem praticamente qualquer coisa. Estes sistemas de uso específico não se replicarão a si mesmos, ou fá-lo-ão apenas um número fixo de vezes. Produzirão apenas aquilo para que foram programados, e apenas quando forem ativados para o fazer. Quem não tiver acesso a ferramentas especiais construídas por montadores, não conseguirá reprogramá-los para outros fins.

Com estes montadores limitados, as pessoas poderão fabricar o que quiserem, na quantidade que desejarem, desde que respeitando os limites embutidos nas próprias máquinas. Se nenhum estiver programado para produzir armas nucleares, nenhum as produzirá; se nenhum estiver programado para fabricar replicadores perigosos, nenhum o fará. Mas, se alguns forem programados para fabricar casas, automóveis, computadores, escovas de dentes e afins, então esses produtos poderão tornar-se baratos e abundantes. Máquinas construídas com montadores limitados permitir-nos-ão abrir o espaço, curar a biosfera e reparar células humanas. Montadores limitados poderão trazer uma riqueza quase ilimitada aos povos do mundo.

Esta tática ajudará a aliviar a pressão moral para disponibilizar montadores ilimitados de forma imediata. No entanto, os

montadores limitados ainda deixarão necessidades legítimas por satisfazer. Cientistas precisarão de montadores plenamente programáveis para realizar estudos; engenheiros precisarão deles para testar projetos. Estas necessidades poderão ser atendidas por laboratórios selados com montadores.

6. Laboratórios de Montadores Selados

Imagine um acessório informático do tamanho do seu polegar, com uma ficha de última geração na base. A sua superfície parece um plástico cinzento banal, com um número de série impresso — no entanto, este laboratório de montadores selado é um objeto construído por montadores, e contém muito mais do que aparenta. No seu interior, por cima da ficha, encontra-se um computador nanoeletrónico de alta capacidade a executar um software avançado de simulação molecular (baseado no software desenvolvido durante a criação dos montadores). Quando o laboratório selado é ligado, o seu computador doméstico — também ele construído por montadores — exibe uma imagem tridimensional daquilo que está a ser simulado, representando os átomos como esferas coloridas. Com um joystick, pode dirigir o braço simulado do montador para construir estruturas. Programas informáticos podem mover esse braço rapidamente, erguendo construções complexas no ecrã num piscar de olhos. A simulação funciona sempre na perfeição, porque o nanocomputador "faz batota": à medida que faz o braço simulado mover moléculas simuladas, o computador comanda um braço real a movimentar moléculas reais. Em seguida, verifica os resultados sempre que necessário para corrigir os seus cálculos¹⁶.

Na extremidade deste pequeno objeto existe uma esfera composta por muitas camadas concêntricas. Fios minúsculos conduzem energia e sinais através das camadas, permitindo ao nanocomputador na base comunicar com os dispositivos no centro da esfera. A camada mais exterior é composta por sensores. Qualquer tentativa de remover ou perfurar, essa camada ativa um sinal para outra camada perto do núcleo. A camada seguinte é uma concha esférica espessa de compósito de diamante pré-tensionado — as camadas exteriores estão esticadas, e as interiores comprimidas. Esta envolve uma camada de isolamento térmico, que por sua vez envolve uma minúscula esfera do tamanho de uma pimenta, feita de blocos microscópicos de metal e oxidante cuidadosamente organizados. Estes estão entrelaçados com detonadores elétricos. Se a camada exterior de sensores for perfurada, os detonadores são ativados. A carga de demolição de metal e oxidante queima-se então numa fração de segundo, produzindo um gás de óxidos metálicos mais denso do que a água e quase tão quente quanto a superfície do Sol. Mas a chama é minúscula; arrefece rapidamente, e a esfera de diamante contém a enorme pressão.

Esta carga de demolição envolve uma concha compósita mais pequena, que por sua vez envolve outra camada de sensores — também capazes de acionar a carga de destruição. Estes sensores rodeiam a cavidade que contém o verdadeiro laboratório de montadores selado.

Estas precauções elaboradas justificam o termo “selado”. Ninguém do exterior pode abrir o espaço do laboratório sem destruir

o seu conteúdo, e *nenhum montador ou estrutura construída por montadores pode escapar do seu interior*. O sistema foi concebido para libertar apenas informação, não replicadores perigosos nem ferramentas destrutivas. Cada camada de sensores é composta por múltiplos sensores redundantes¹⁷, *cada um concebido* para detetar qualquer forma de penetração, compensando falhas potenciais dos outros. A penetração, ao acionar a carga de demolição, eleva a temperatura do interior para além do ponto de fusão de todas as substâncias conhecidas, tornando impossível a sobrevivência de qualquer dispositivo perigoso. Todos estes mecanismos de proteção convergem sobre algo cerca de um milionésimo do seu tamanho — ou seja, sobre o que quer que caiba no laboratório, que fornece um espaço de trabalho esférico com uma largura não superior à de um fio de cabelo humano.

Apesar de minúsculo, segundo os padrões convencionais, este espaço é suficientemente amplo para conter milhões de montadores e milhares de triliões de átomos. Estes laboratórios selados permitirão às pessoas construir e testar dispositivos — mesmo replicadores vorazes — com total segurança. Crianças poderão usar os átomos no seu interior como um conjunto de construção com peças quase ilimitadas. Entusiastas trocarão programas para construir vários engenhos. Engenheiros desenvolverão e testarão novas nanotecnologias. Químicos, cientistas de materiais e biólogos criarão equipamentos e realizarão experiências. Em laboratórios construídos à volta de amostras biológicas, engenheiros biomédicos desenvolverão e testarão as primeiras máquinas de reparação celular.

No decorrer deste trabalho, as pessoas irão naturalmente desenvolver projetos úteis — seja para circuitos de computador, materiais resistentes, dispositivos médicos ou o que for. Após uma revisão pública da sua segurança, estas invenções poderão ser disponibilizadas fora dos laboratórios selados, através da programação de montadores limitados para as fabricar. Laboratórios selados e montadores limitados formarão uma dupla complementar: os primeiros permitir-nos-ão inventar livremente; os segundos permitir-nos-ão usufruir dos frutos da invenção com segurança. Esta pausa entre a conceção e a libertação ajudará a evitar surpresas mortais.

Laboratórios de montadores selados permitirão à sociedade inteira aplicar a sua criatividade aos desafios da nanotecnologia — e isso acelerará a nossa preparação para o momento em que alguma força independente venha a descobrir como construir algo realmente perigoso.

7. Escondendo Informação

Outra tática para ganhar tempo consiste em que a força dominante tente queimar a ponte que construiu entre a tecnologia convencional e a tecnologia molecular. Isto significa destruir os registos de como foram feitos os primeiros montadores (ou tornar esses registos completamente inacessíveis). A força dominante poderá desenvolver os primeiros montadores rudimentares de tal forma que ninguém tenha conhecimento de mais do que uma pequena fração de todo o sistema. Imaginemos que desenvolvemos os montadores seguindo o percurso descrito no Capítulo 1. As

máquinas proteicas que usarmos para construir os primeiros montadores rudimentares tornar-se-ão, de imediato, obsoletas. Se destruirmos os registos do projeto dessas proteínas¹⁸, isso dificultará a sua replicação por terceiros, mas não impedirá o progresso subsequente da nanotecnologia.

Se laboratórios selados e montadores limitados estiverem amplamente disponíveis, as pessoas terão pouca motivação científica ou económica para desenvolver a nanotecnologia de forma independente, e queimar a ponte entre a tecnologia convencional e a molecular tornará mais difícil esse desenvolvimento paralelo. No entanto, estas medidas não passarão de táticas de adiamento. Não conseguirão impedir o desenvolvimento independente; o impulso humano pelo poder fomentará esforços que acabarão por ter sucesso. Apenas uma vigilância minuciosa e universal, ao estilo totalitário, poderia travar esse desenvolvimento de forma indefinida. Contudo, se tal vigilância fosse conduzida por algo semelhante a um governo moderno, o remédio seria quase tão perigoso quanto a doença. E mesmo nesse cenário, poderia alguém manter vigilância perfeita para sempre?

Parece inevitável que, mais cedo ou mais tarde, tenhamos de aprender a viver num mundo onde existem replicadores pouco fiáveis. Uma das táticas possíveis seria escondermo-nos por trás de uma parede ou fugirmos para longe. Mas estas são estratégias frágeis: replicadores perigosos poderão atravessar a parede ou percorrer a distância, trazendo consigo o desastre total. E ainda que possamos construir muros resistentes contra replicadores de pequena escala, nenhuma parede fixa será resistente a uma malícia

organizada em larga escala¹⁹. Precisaremos, por isso, de uma abordagem mais robusta e flexível.

8. Escudos Ativos

Parece que poderemos construir nanomáquinas que atuem de forma semelhante aos glóbulos brancos do sistema imunitário humano: dispositivos capazes de combater não apenas bactérias e vírus, mas também replicadores perigosos de todos os tipos. A este tipo de defesa automatizada chamemos escudo ativo, para o distinguir de um muro fixo.

Ao contrário dos sistemas de engenharia tradicionais, um escudo ativo fiável deve fazer mais do que apenas lidar com os desafios da natureza ou com utilizadores desajeitados. Terá de enfrentar algo bem mais exigente — todo o espectro de ameaças que forças inteligentes possam conceber e construir, nas circunstâncias vigentes. Construir e aperfeiçoar protótipos de escudos será comparável a conduzir os dois lados de uma corrida armamentista em escala laboratorial. O objetivo, porém, será descobrir os requisitos mínimos para uma defesa que prevaleça de forma fiável.

No Capítulo 5, descrevi como o Dr. Lenat e o seu programa EURISKO desenvolveram com sucesso frotas para combater segundo as regras de um jogo de simulação de guerra naval. De modo semelhante, podemos transformar num jogo o esforço, mortalmente sério, de desenvolver escudos fiáveis, utilizando laboratórios selados de diversos tamanhos como campos de jogo.

Soltemos então uma multidão de engenheiros, hackers informáticos, biólogos, entusiastas e sistemas de engenharia automatizados, todos convidados a colocar os seus sistemas em confronto num jogo limitado apenas pelas condições iniciais, pelas leis da natureza e pelas paredes dos laboratórios selados. Estes competidores irão evoluir ameaças e escudos através de uma série aberta de microbatalhas. Quando os montadores replicadores tiverem trazido abundância, as pessoas terão tempo suficiente para se dedicarem a um jogo tão importante. Eventualmente, poderemos testar os sistemas de escudo mais promissores em ambientes semelhantes à Terra, no espaço. O sucesso tornará possível um sistema capaz de proteger a vida humana e a biosfera terrestre contra o pior que um punhado de replicadores descontrolados possa provocar.

9. O Sucesso é Possível?

Com as incertezas que temos no presente, ainda não conseguimos descrever com precisão nem as ameaças nem os escudos. Mas será que isso significa que não podemos ter qualquer confiança na possibilidade de escudos eficazes? Aparentemente, podemos. Há, afinal, uma diferença entre saber que algo é possível e saber como fazê-lo. E, neste caso, o mundo já nos oferece exemplos de sucessos análogos.

Não há nada fundamentalmente novo na ideia de defender-se contra replicadores invasores; a própria vida tem feito isso há Eras. Os montadores replicadores, embora excecionalmente potentes,

serão sistemas físicos não muito diferentes daqueles que já conhecemos. A experiência sugere que é possível controlá-los.

Os vírus são máquinas moleculares que invadem células; as células utilizam outras máquinas moleculares (como as enzimas de restrição e os anticorpos) para se defenderem. As bactérias são células que invadem organismos; os organismos usam outras células (como os glóbulos brancos) para se defenderem. De forma análoga, as sociedades usam a polícia para se defender dos criminosos, e exércitos para se proteger de invasores. Num plano menos físico, as mentes usam sistemas de memética, como o método científico, para se defenderem de disparates; e as sociedades usam instituições como os tribunais para se defenderem do poder de outras instituições.

Os exemplos biológicos acima mostram que, mesmo após uma corrida armamentista de mil milhões de anos, as máquinas moleculares conseguiram manter defesas eficazes contra replicadores moleculares. Sim, as falhas foram frequentes, mas os sucessos indicam que a defesa é possível. Esses êxitos sugerem que podemos de facto usar nanomáquinas para nos defender de outras nanomáquinas. Ainda que os montadores tragam muitos avanços, não há motivo para supor que venham a desequilibrar de forma definitiva a balança contra a defesa.

Os exemplos apresentados — uns envolvendo vírus, outros instituições — são suficientemente diversos para sugerir que o sucesso da defesa assenta em princípios gerais. Podemos perguntar: Por que razão estas defesas funcionam? Mas também

podemos inverter a questão: Por que razão haveriam de falhar? Cada conflito coloca sistemas semelhantes uns contra os outros, não dando ao atacante nenhuma vantagem óbvia²⁰. Além disso, em cada conflito, o atacante enfrenta *uma defesa já estabelecida*. Os defensores lutam em território familiar, o que lhes dá vantagens como posições preparadas, conhecimento detalhado do terreno, recursos armazenados e aliados abundantes — quando o sistema imunitário reconhece um agente patogénico, pode mobilizar os recursos de todo o corpo. Todas estas vantagens são gerais e fundamentais, não dependendo dos detalhes tecnológicos. Podemos garantir aos nossos escudos ativos as mesmas vantagens contra replicadores perigosos. E estes escudos não precisam de ficar inativos enquanto armas perigosas são acumuladas — tal como o sistema imunitário não fica inativo enquanto as bactérias se multiplicam.

Seria difícil prever o desfecho de uma corrida armamentista aberta entre potências equipadas com montadores replicadores. Mas, antes que tal situação possa emergir, parece provável que a força que liderar adquira uma vantagem militar temporária, mas avassaladora. Se o desfecho de uma corrida armamentista for incerto, então essa força dominante provavelmente usará o seu poder para impedir que os oponentes consigam alcançá-la. Se assim for, então os escudos ativos não terão de resistir a ataques apoiados pelos recursos de meio continente ou de meio sistema solar; antes, funcionarão como uma força policial ou um sistema imunitário, enfrentando ataques suportados apenas pelos recursos que possam ser reunidos em segredo dentro do território protegido.

Em cada exemplo de defesa bem-sucedida que referi anteriormente, os atacantes e os escudos evoluíram através de processos amplamente semelhantes. O sistema imunitário, moldado pela evolução genética, enfrenta ameaças também moldadas pela mesma evolução. Exércitos, moldados por mentes humanas, enfrentam ameaças igualmente concebidas por mentes humanas. Do mesmo modo, tanto os escudos ativos como os replicadores perigosos serão moldados pela evolução memética. Mas, se a força dominante conseguir desenvolver sistemas de engenharia automatizados que funcionem um milhão de vezes mais depressa do que os engenheiros humanos, e se puder utilizá-los durante apenas um ano, então poderá construir escudos ativos baseados no equivalente a um milhão de anos de avanço tecnológico. Com tais sistemas, poderemos explorar os limites do possível ao ponto de sermos capazes de construir um escudo fiável contra todas as ameaças fisicamente possíveis.

Mesmo sem conhecermos os detalhes das ameaças e dos escudos, parece haver razões para acreditar que escudos são possíveis. E os exemplos de memes a controlar memes, ou de instituições a controlar instituições, sugerem também que sistemas de Inteligência Artificial podem controlar outros sistemas de Inteligência Artificial.

Ao construir escudos ativos, poderemos usar o poder dos replicadores e dos sistemas de IA para multiplicar as vantagens tradicionais das forças defensoras: podemos dotá-las de uma força esmagadora através de hardware abundante, construído por replicadores, com projetos baseados no equivalente a um milhão de

anos de avanço tecnológico. Podemos construir escudos ativos com uma força e fiabilidade que farão envergonhar todos os sistemas de defesa do passado.

A nanotecnologia e a inteligência artificial podem trazer as ferramentas definitivas de destruição — mas não são inerentemente destrutivas. Com discernimento e cuidado, podemos usá-las para construir as ferramentas definitivas da paz.

CAPÍTULO 12

Estratégias e Sobrevivência

Aquele que não aplicar novos medicamentos deve esperar novos males; pois o tempo é o maior inovador.

— FRANCIS BACON

Nos capítulos anteriores mantive-me próximo do terreno firme da possibilidade tecnológica. Aqui, contudo, tenho de avançar mais profundamente para o domínio da política e da ação humana. Este terreno é mais movediço, mas os factos tecnológicos e os princípios evolutivos continuam a fornecer pontos firmes onde nos podemos apoiar para observar o território.

A corrida tecnológica, impulsionada por pressões evolutivas, está a conduzir-nos em direção a perigos sem precedentes; precisamos de encontrar estratégias para lidar com eles. Dado que antevemos perigos tão grandes, faz sentido considerar a hipótese de travar esta corrida desenfreada. Mas como poderemos fazê-lo?

1. Restrição Pessoal

Como indivíduos, poderíamos abster-nos de realizar investigação que conduza a capacidades perigosas. De facto, a maioria das pessoas *abster-se-á*, dado que a maioria não é investigadora. Mas

esta estratégia não impedirá os avanços: no nosso mundo diverso, outros levarão o trabalho avante.

2. Supressão Local

Uma estratégia de contenção pessoal (pelo menos neste caso) assemelha-se a uma simples inação. Mas é uma estratégia de ação política local, de fazer pressão para aprovar leis que suprimam certos tipos de investigação? Isto seria uma ação pessoal destinada a impor a inação coletiva. Embora pudesse ter sucesso em suprimir a investigação numa cidade, distrito, país ou aliança, esta estratégia não nos ajudaria a liderar; em vez disso, permitiria que alguma força fora do nosso controlo tomasse a dianteira. Um movimento popular deste tipo só pode travar a investigação onde o povo detém o poder, e o seu maior sucesso possível abriria apenas caminho para que um Estado mais repressivo se tornasse a força dominante.

No que respeita às armas nucleares, podem ser apresentados argumentos a favor do desarmamento unilateral e da resistência não violenta (ou, pelo menos, não nuclear). As armas nucleares podem ser usadas para destruir estabelecimentos militares e espalhar o terror, mas não podem ser usadas para ocupar território ou governar pessoas — pelo menos não diretamente. As armas nucleares falharam em suprimir a guerra de guerrilha e os distúrbios sociais, pelo que uma estratégia de desarmamento e resistência faz algum sentido.

A supressão unilateral da nanotecnologia e da inteligência artificial, em contraste, equivaleria a um desarmamento unilateral numa situação em que a resistência não pode funcionar. Um Estado agressivo poderia usar estas tecnologias para conquistar e governar (ou exterminar) até mesmo uma nação de Gandhis, ou de combatentes armados e dedicados à liberdade.

Isto merece destaque. Sem uma forma nova de reformar os Estados opressores do mundo, os movimentos de supressão da investigação não podem ter um sucesso total. E sem um sucesso total, um sucesso parcial significaria desastre para as democracias. Mesmo que não conseguissem nada, os esforços deste tipo absorveriam o trabalho e a paixão dos ativistas, desperdiçando recursos humanos escassos numa estratégia fútil. Além disso, os esforços de supressão alienariam investigadores preocupados, gerando conflitos entre aliados potenciais e desperdiçando ainda mais recursos humanos. A sua futilidade e carácter divisionista tornam esta uma estratégia a evitar.

Ainda assim, a supressão tem um apelo inegável. É simples e direta: "O perigo aproxima-se? Vamos pará-lo!" Além disso, os sucessos em esforços de pressão política local prometem gratificação imediata: "O perigo aproxima-se? Podemos pará-lo aqui e agora, para começar!" Esse começo seria um falso começo, mas nem todos o notarão. A ideia de uma supressão simples parece ter o potencial de seduzir muitas mentes. Afinal, a supressão local de perigos locais tem uma longa e bem-sucedida tradição; travar um poluidor local, por exemplo, reduz a poluição local. Os esforços de supressão local de perigos globais parecerão semelhantes,

apesar de os efeitos serem muito diferentes. Precisaremos de organização local e de pressão política, mas estas terão de ser construídas com base numa estratégia viável.

3. Acordos Globais de Supressão

Numa abordagem mais promissora, poderíamos aplicar pressão local para a negociação de uma proibição mundial verificável. Uma estratégia semelhante poderia ter alguma hipótese no controlo das armas nucleares. Mas travar a nanotecnologia e a inteligência artificial colocaria problemas de uma ordem diferente, por pelo menos duas razões.

Primeiro, estas tecnologias são menos bem definidas do que as armas nucleares: dado que a tecnologia nuclear atual exige certos isótopos de metais raros, ela distingue-se de outras atividades. Pode ser definida e (em princípio) proibida. Mas a bioquímica moderna conduz, em pequenos passos, à nanotecnologia, e a tecnologia informática moderna conduz, também em pequenos passos, à inteligência artificial. Nenhuma linha define um ponto natural de paragem. E como cada pequeno avanço trará benefícios médicos, militares e económicos, como poderíamos negociar um acordo mundial sobre onde parar?

Segundo, estas tecnologias são mais potentes do que as armas nucleares: dado que os reatores e os sistemas de armamento são bastante grandes, a inspeção poderia limitar o tamanho de uma força secreta e, assim, limitar a sua força. Mas replicadores

perigosos serão microscópicos, e o software de IA será intangível. Como poderia alguém ter a certeza de que um laboratório algures não está prestes a alcançar um avanço estratégico? A longo prazo, como poderia alguém sequer ter a certeza de que um hacker num porão não está prestes a alcançar um avanço estratégico? Medidas de verificação convencionais não funcionarão, e isto torna a negociação e aplicação de uma proibição mundial quase impossíveis.

A pressão no sentido dos tipos certos de acordos internacionais tornará o nosso caminho mais seguro, mas acordos para simplesmente suprimir avanços perigosos aparentemente não funcionarão. Mais uma vez, a pressão local deverá fazer parte de uma estratégia viável.

4. Supressão Global pela Força

Se os acordos pacíficos não funcionarem, poder-se-ia considerar o uso da força militar para suprimir avanços perigosos. Mas, devido a problemas de verificação, a pressão militar por si só não seria suficiente. Suprimir avanços pela força exigiria, em vez disso, que uma potência conquistasse e ocupasse potências hostis armadas com armas nucleares — dificilmente uma política segura¹. Além disso, a potência conquistadora seria ela própria uma força tecnológica de grande dimensão, com um poder militar maciço e uma vontade demonstrada de o utilizar. Poder-se-ia confiar então que essa potência suprimisse os seus próprios avanços? E mesmo que sim, poder-se-ia confiar que mantivesse uma vigilância constante e onnipresente sobre todo o mundo? Se não, então as

ameaças acabariam por emergir em segredo, num mundo onde se teria impedido o desenvolvimento aberto de escudos ativos. O resultado provável seria um desastre.

A força militar nas democracias tem grandes benefícios, mas a força militar, por si só, não pode resolver o nosso problema. Não podemos alcançar segurança através de uma estratégia de conquista e supressão da investigação.

Estas estratégias para travar a investigação — seja por inação pessoal, inação local, acordo negociado ou conquista mundial — parecem todas condenadas ao fracasso. No entanto, a oposição aos avanços terá um papel a desempenhar, porque iremos necessitar de atrasos seletivos, inteligentemente direcionados, para adiar ameaças até estarmos preparados para elas. A pressão por parte de ativistas atentos será essencial, mas para ajudar a orientar o avanço, não para o travar.

5. Avanço Unilateral

Se as tentativas de suprimir a investigação em Inteligência Artificial e nanotecnologia parecem fúteis e perigosas, que dizer então do caminho oposto — um esforço total, unilateral? Mas também este apresenta problemas. Nós, nas democracias, provavelmente não conseguiríamos produzir um avanço estratégico significativo em total segredo. Estariam envolvidas demasiadas pessoas durante demasiados anos. Uma vez que a liderança soviética acabaria por ter conhecimento dos nossos esforços, a sua

reação tornar-se-ia uma preocupação óbvia, e veriam seguramente um grande avanço da nossa parte como uma grande ameaça. Se a nanotecnologia estivesse a ser desenvolvida como parte de um programa militar secreto, os seus analistas de inteligência temeriam o desenvolvimento de uma arma subtil, mas decisiva, talvez baseada em "micróbios" programáveis. Dependendo das circunstâncias, os nossos opositores poderiam optar por atacar enquanto ainda tivessem essa capacidade. É importante que as democracias mantenham a liderança nestas tecnologias, mas estaremos mais seguros se conseguirmos, de algum modo, combinar essa força com políticas claramente não ameaçadoras.

6. Equilíbrio de Poder

Se seguirmos qualquer uma das estratégias acima mencionadas, inevitavelmente despertaremos um forte conflito. As tentativas de suprimir a nanotecnologia e a Inteligência Artificial irão opor os proponentes da supressão aos interesses vitais de investigadores, corporações, instituições militares e pacientes em tratamento médico. As tentativas de obter uma vantagem unilateral através destas tecnologias irão colocar as democracias cooperantes em confronto com os interesses vitais dos nossos opositores. Todas as estratégias provocarão conflito, mas será que todas as estratégias dividirão as sociedades ocidentais ou o mundo de forma tão drástica?

Na busca por um caminho intermédio, poderíamos procurar um equilíbrio de poder baseado num equilíbrio tecnológico. Isto pareceria prolongar uma situação que manteve alguma medida de

paz durante quatro décadas. Mas a palavra-chave aqui é “pareceria”: os avanços que se avizinham serão demasiado abruptos e desestabilizadores para que o antigo equilíbrio se mantenha. No passado, um país podia sofrer um atraso tecnológico de vários anos e, ainda assim, manter um equilíbrio militar aproximado. Com replicadores rápidos ou Inteligência Artificial avançada, contudo, um atraso de apenas um único dia poderá ser fatal. Um equilíbrio estável parece ser demasiado para se esperar.

7. Desenvolvimento Cooperativo

Existe, em princípio, uma forma de assegurar um equilíbrio tecnológico entre as democracias cooperantes e o bloco soviético: poderíamos desenvolver as tecnologias de forma cooperativa, partilhando as nossas ferramentas e informações. Embora isto apresente problemas óbvios, é pelo menos algo mais prático do que possa parecer à primeira vista.

Será possível negociar essa cooperação? Tentativas falhadas de negociar tratados eficazes de controlo de armamento vêm imediatamente à mente, e a cooperação pode parecer ainda mais complicada e difícil de concretizar. Mas será mesmo assim? No controlo de armamento, cada lado tenta dificultar as ações do outro; isso reforça a natureza adversária da relação. Além disso, gera conflitos dentro de cada campo entre grupos que defendem a limitação de armamentos e grupos cuja razão de existir é construí-los. Pior ainda, as negociações giram em torno de palavras e dos seus significados, mas cada lado tem a sua própria linguagem e incentivos para distorcer os significados em seu favor.

A cooperação, em contraste, envolve ambos os lados a trabalharem para um objetivo comum; isto tende a esbater a natureza adversária da relação. Além disso, pode atenuar os conflitos dentro de cada campo, uma vez que os esforços cooperativos criariam projetos, em vez de os destruírem. Por fim, ambos os lados discutem os seus esforços numa linguagem partilhada — a linguagem da matemática e dos diagramas usada na ciência e na engenharia. Além disso, a cooperação tem resultados concretos e visíveis. Em meados da década de 1970, os EUA e a URSS realizaram uma missão espacial conjunta e, até que as tensões políticas aumentassem, estavam a delinear planos provisórios para uma estação espacial conjunta. Estes não foram incidentes isolados, nem no espaço nem em terra; projetos conjuntos e intercâmbio técnico decorreram durante anos. Com todos os seus problemas, a cooperação tecnológica provou ser pelo menos tão viável quanto o controlo de armamento — talvez até mais, considerando o enorme esforço investido neste último.

Curiosamente, no que toca à IA e à nanotecnologia, a cooperação e o controlo de armamento eficaz teriam uma semelhança fundamental. Verificar um acordo de controlo de armamento exigiria inspeções constantes e íntimas aos laboratórios de cada lado, por parte de especialistas do outro lado — uma relação tão próxima quanto a mais minuciosa cooperação imaginável.

Mas o que se conseguiria com a cooperação? Poder-se-ia garantir equilíbrio, mas o equilíbrio não garante estabilidade. Se dois pistoleiros se enfrentam com as armas em punho e o medo em alta, o seu poder pode estar equilibrado, mas aquele que disparar

primeiro pode eliminar a ameaça do outro. Um esforço cooperativo no desenvolvimento tecnológico, a menos que seja cuidadosamente planejado e controlado, daria a cada lado armas temíveis sem fornecer a nenhum um escudo. Quem poderia garantir que nenhum dos lados encontraria uma forma de lançar um golpe desarmante com impunidade?

E mesmo que se pudesse garantir isso, o que dizer do problema de outras potências — e de amadores, e de acidentes?

No último capítulo, descrevi uma solução para estes problemas: o desenvolvimento, teste e construção de escudos ativos. Eles oferecem um novo remédio para um novo problema, e até agora ninguém sugeriu uma alternativa plausível. Até que alguém o faça, parece sensato considerar como poderiam ser construídos e se poderiam tornar possível uma estratégia que funcione.

8. Uma Síntese de Estratégias

Autodomínio pessoal, ação local, atraso seletivo, acordo internacional, força unilateral e cooperação internacional — todas estas estratégias podem ajudar-nos no esforço de desenvolver escudos ativos.

Consideremos a nossa situação atual. As democracias têm liderado o mundo, durante décadas, na maioria das áreas da ciência e da tecnologia; lideramos hoje no domínio do software e da

biotecnologia. Juntos, somos a força dominante. Não parece haver razão para que não possamos manter essa liderança e usá-la.

Como discutido no capítulo anterior, a força dominante poderá usar várias táticas para lidar com o advento dos montadores moleculares. Estas incluem o uso de laboratórios de montagem selados e montadores limitados, bem como a manutenção de segredo relativamente aos detalhes do desenvolvimento inicial dos montadores. No tempo que ganharmos com estas (e outras) políticas, poderemos trabalhar no desenvolvimento de escudos ativos capazes de nos oferecer proteção permanente contra os novos perigos. Isto define um objetivo. Para o alcançar, parece mais eficaz uma estratégia em duas partes.

A primeira parte envolve ação dentro das democracias cooperantes. Precisamos de manter uma liderança suficientemente confortável para podermos avançar com cautela; se sentíssemos que poderíamos perder a corrida, poderíamos entrar em pânico. Avançar com cautela significa desenvolver instituições dignas de confiança para gerir tanto os avanços iniciais como o desenvolvimento dos escudos ativos. Os escudos que desenvolvermos devem, por sua vez, ser concebidos para nos ajudar a assegurar um futuro digno de ser vivido, um futuro com espaço para a diversidade.

A segunda parte desta estratégia envolve políticas em relação a potências atualmente hostis. Aqui, o nosso objetivo deve ser manter a iniciativa, minimizando ao mesmo tempo a ameaça que representamos. O equilíbrio tecnológico não funcionará, e não

podemos dar-nos ao luxo de abdicar da nossa liderança. Isto deixa-nos apenas com a força e a liderança como escolha realista, tornando ainda mais difícil adotar uma postura não ameaçadora. Aqui, mais uma vez, precisamos de instituições estáveis e fiáveis: se conseguirmos dotá-las de uma grande inércia interna relativamente aos seus objetivos, então talvez até os nossos oponentes venham a depositar alguma confiança nelas.

Para tranquilizar os nossos oponentes (e a nós próprios!), estas instituições devem ser tão abertas quanto possível², sem comprometer a sua missão. Podemos ainda conseguir construir instituições que ofereçam um papel à cooperação soviética. Ao convidar a sua participação, mesmo que recusem os termos que propomos, ofereceremos algum grau de garantia quanto às nossas intenções. Se os soviéticos aceitarem, ganhariam um interesse público no nosso sucesso conjunto.

Ainda assim, se as democracias forem fortes quando os avanços se aproximarem, e se evitarmos ameaçar o controlo que qualquer governo detém sobre o seu próprio território, então os nossos oponentes presumivelmente não verão vantagem em atacar-nos. Assim, poderemos provavelmente prescindir da cooperação, se for necessário.

9. Escudos Ativos vs. Armas Espaciais

Pode ser útil considerar como poderíamos aplicar a ideia de escudos ativos em domínios mais convencionais. Tradicionalmente,

a defesa exigiu armas que também são úteis para o ataque. Esta é uma das razões pelas quais “defesa” passou a significar “capacidade de fazer guerra”, e por que os esforços em nome da “defesa” dão motivos de temor aos adversários. As atuais propostas de defesas espaciais seguirão esse mesmo padrão. Quase qualquer sistema defensivo capaz de destruir mísseis atacantes também poderia destruir as defesas de um oponente — ou impor um bloqueio espacial, impedindo o adversário de construir defesas logo à partida. Tais “defesas” têm cheiro de ofensiva, como se fosse inevitável, para que cumpram o seu papel. E assim, a corrida armamentista prepara-se para mais um salto perigoso.

Será que defesa e ataque têm de ser assim tão inseparáveis? A História faz parecer que sim. As muralhas só travam invasores quando defendidas por guerreiros, mas esses mesmos guerreiros podem partir para invadir outras terras. Quando imaginamos uma arma, é natural imaginarmos mãos humanas a apontá-la e a decisão humana sobre quando disparar — e a História ensinou-nos a temer o pior³.

Contudo, hoje, pela primeira vez na História, aprendemos a construir sistemas defensivos que são fundamentalmente diferentes dessas armas. Consideremos um exemplo baseado no espaço. Já sabemos conceber dispositivos que detetam (*parece que mil mísseis foram agora lançados*), avaliam (*isto parece ser um primeiro ataque*) e agem (*tentar destruir esses mísseis!*). Se um sistema só disparar contra voos massivos de mísseis, então não poderá ser usado para ofensivas ou bloqueios espaciais. Melhor ainda, pode ser concebido de forma a não discriminar entre os lados

em conflito. Embora sirva os interesses estratégicos de quem o constrói, não estaria sujeito ao comando diário dos generais de qualquer nação. Limitar-se-ia a tornar o espaço um ambiente perigoso para os mísseis de ataque. Como um mar ou uma cadeia montanhosa em guerras anteriores, não ameaçaria nenhum dos lados, ao mesmo tempo que ofereceria a ambos alguma proteção contra o outro⁴.

Apesar de recorrer a tecnologias bélicas (sensores, rastreadores, lasers, projéteis teleguiados e afins), esta defesa não seria um sistema de armas, pois o seu papel seria fundamentalmente diferente. Sistemas deste tipo necessitam de um nome distinto: são, de facto, uma espécie de escudo ativo — um termo que pode descrever qualquer sistema automatizado ou semiautomatizado concebido para proteger sem ameaçar. Ao defender ambos os lados sem ameaçar nenhum, os escudos ativos podem enfraquecer o ciclo da corrida armamentista.

As questões técnicas, económicas e estratégicas levantadas pelos escudos ativos são complexas, e pode ou não ser viável implementá-los na Era pré-montadores. Se forem viáveis, existirão várias abordagens possíveis para a sua construção. Numa abordagem, as democracias cooperantes construiriam os escudos de forma unilateral. Para permitir que outras nações verifiquem o que o sistema fará e (mais importante ainda) o que não fará, poderíamos permitir a inspeção multilateral de desenhos, componentes e etapas de produção cruciais. Não teríamos de divulgar todas as tecnologias envolvidas, pois saber o que é não é o mesmo que saber como se faz. Noutra abordagem, construiríamos

os escudos em parceria, limitando a transferência de tecnologia ao mínimo necessário para a cooperação e verificação⁵.

Temos mais hipóteses de proibir armas espaciais do que de proibir a nanotecnologia, e esta poderá até ser a melhor forma de minimizar os nossos riscos a curto prazo. No entanto, ao escolher uma estratégia de longo prazo para controlar a corrida armamentista, devemos considerar mais do que apenas o próximo passo. A análise que esbocei neste capítulo sugere que as abordagens tradicionais de controlo de armamento, baseadas na negociação de limitações verificáveis, não conseguem lidar com a nanotecnologia. Se for esse o caso, então precisamos de desenvolver abordagens alternativas. Os escudos ativos — que parecem ser essenciais, a seu tempo — podem oferecer uma nova alternativa estabilizadora à corrida armamentista no espaço. Ao explorar esta alternativa, poderemos abordar questões fundamentais comuns a todos os escudos ativos⁶. E se os desenvolvermos, ganharemos experiência e construiremos mecanismos institucionais que mais tarde poderão revelar-se essenciais à nossa sobrevivência.

Os escudos ativos são uma nova opção, baseada em novas tecnologias. Fazer com que funcionem exigirá uma síntese criativa e interdisciplinar de ideias da engenharia, da estratégia e dos assuntos internacionais. Oferecem novas escolhas que podem permitir-nos evitar impasses antigos. Aparentemente, oferecem uma resposta ao antigo problema de proteger sem ameaçar — mas não é uma resposta fácil.

10. Poder, Mal, Incompetência e Preguiça

Esbocei como a nanotecnologia e a inteligência artificial avançada darão um grande poder à força dominante — um poder que poderá ser usado para destruir a vida ou para a estender e libertar. Como não podemos parar estas tecnologias, parece que teremos de lidar com o surgimento de uma concentração de poder maior do que qualquer outra na história.

Precisaremos de um sistema institucional adequado. Para lidar com tecnologias complexas de forma segura, esse sistema deve ter formas de julgar os factos relevantes. Para gerir grandes poderes de forma segura, deve incorporar mecanismos eficazes de controlo e equilíbrio, e os seus objetivos e métodos devem manter-se abertos ao escrutínio público. Finalmente, dado que nos ajudará a lançar as fundações de um novo mundo, deverá ser guiado pelos nossos interesses comuns, dentro de um quadro de princípios sólidos.

Não começaremos do zero; construiremos sobre as instituições que já temos. Elas são diversas. Nem todas são burocracias alojadas em enormes edifícios cinzentos; incluem instituições tão difusas e dinâmicas como a imprensa livre, a comunidade científica e as redes de ativistas. Estas instituições descentralizadas ajudam-nos a controlar as máquinas burocráticas cinzentas.

Em parte, enfrentamos uma nova versão de um problema antigo e geral: limitar o abuso de poder. Isto não representa uma novidade

fundamental, e os princípios e instituições seculares da democracia liberal sugerem como poderá ser resolvido. Os governos democráticos já detêm poder físico para arrasar continentes, prender ou matar cidadãos. Mas conseguimos conviver com estas capacidades porque esses governos são relativamente dóceis e estáveis.

Os próximos anos colocarão maiores exigências sobre as nossas instituições. Os princípios de governo representativo, liberdade de expressão, devido processo, primado da lei e proteção dos direitos humanos continuarão a ser cruciais. Para preparar as instituições para essas novas exigências, teremos de alargar e revitalizar tais princípios e as instituições que os sustentam; proteger a liberdade de expressão no que toca a questões técnicas poderá revelar-se essencial. Apesar de enfrentarmos um grande desafio, há motivos para acreditar que o conseguiremos enfrentar.

Claro que também há razões óbvias para duvidar que o consigamos. Mas o desespero é contagioso e desagradável, e deixa as pessoas deprimidas. Além disso, o desespero parece injustificado, apesar dos problemas já conhecidos: *o Mal* — seremos demasiado perversos para fazer o que é certo? *A Incompetência* — seremos demasiado estúpidos para fazer o que é certo? *A Preguiça* — seremos demasiado preguiçosos para nos prepararmos?

Embora fosse imprudente prever um futuro cor-de-rosa, esses problemas não parecem intransponíveis.

Os governos democráticos são grandes, desorganizados e por vezes responsáveis por atrocidades, mas não parecem, no seu todo, maléficos — ainda que possam conter pessoas que mereçam tal rótulo. Na verdade, os seus líderes conquistam poder sobretudo por parecerem sustentar ideias convencionais de bem. O nosso maior perigo reside no facto de políticas que pareçam boas poderem conduzir ao desastre, ou de políticas verdadeiramente boas não serem descobertas, divulgadas e implementadas a tempo de fazerem efeito. As democracias sofrem mais com a preguiça e a incompetência do que com o mal.

A incompetência será inevitável, mas precisa de ser fatal? Nós, humanos, somos por natureza ignorantes e limitados, mas por vezes conseguimos combinar as nossas pequenas competências e conhecimentos para alcançar grandes feitos. Ninguém sabia como chegar à Lua e, no entanto, uma dúzia de pessoas andou na sua superfície. Conseguimos esses feitos técnicos porque aprendemos a construir instituições que juntam muitas pessoas para gerar e testar ideias. Estas instituições tornam-se fiáveis através da redundância, e a qualidade dos seus resultados depende largamente do quanto nos importamos e do esforço que empregamos. Quando concentramos atenção e recursos suficientes na fiabilidade, geralmente temos sucesso. É por isso que as missões à Lua terminaram sem fatalidades no espaço, e que nenhuma arma nuclear foi alguma vez lançada ou detonada por acidente. E é por isso que poderemos vir a lidar com a nanotecnologia e a IA avançada com o cuidado suficiente para garantir um trabalho competente. Pessoas erráticas e de competência limitada podem unir-se para formar instituições estáveis e competentes.

A preguiça — intelectual, moral e física — parece talvez o nosso maior perigo. Só podemos enfrentar grandes desafios com grande esforço. Haverá pessoas suficientes a fazer um esforço suficiente? Ninguém o pode afirmar, porque ninguém pode falar por todos os outros. Mas o sucesso não exigirá um súbito esclarecimento e mobilização universais. Exigirá apenas que uma comunidade crescente de pessoas se empenhe em desenvolver, divulgar e implementar soluções viáveis — e que tenham um bom e crescente grau de sucesso.

Isto não é assim tão implausível. A preocupação com a tecnologia tem-se tornado generalizada, tal como a ideia de que as mudanças aceleradas exigirão melhor previsão. A preguiça não apanhará todos, e os pensadores mal orientados não irão desviar o esforço de todos. As pseudossoluções letais (como bloquear a investigação) perderão a batalha das ideias se forem suficientemente desmascaradas. E embora enfrentemos um grande desafio, o sucesso permitirá realizar grandes sonhos. Grandes esperanças e medos poderão mobilizar pessoas suficientes para que a humanidade triunfe.

Preocupação e ação apaixonadas não serão suficientes; também precisaremos de políticas sensatas. Isso exigirá mais do que boas intenções e objetivos claros: teremos de rastrear as ligações factuais no mundo que relacionam aquilo que fazemos com aquilo que obtemos. À medida que nos aproximamos de uma crise tecnológica de complexidade sem precedentes, faz sentido tentar melhorar as nossas instituições de avaliação de factos técnicos

importantes. De que outra forma poderemos orientar a força dominante e minimizar a ameaça de uma incompetência terminal?

As instituições evoluem. Para evoluirmos melhores instituições de averiguação factual, podemos copiar, adaptar e alargar os nossos sucessos anteriores. Entre eles incluem-se a imprensa livre, a comunidade científica e os tribunais. Todos têm as suas virtudes, e algumas dessas virtudes podem ser combinadas.

CAPÍTULO 13

Encontrando os Factos

*O medo não pode ser banido, mas pode ser calmo e sem pânico;
e pode ser mitigado pela razão e pela avaliação.*

— VANNESVAR BUSH

A SOCIEDADE PRECISA DE MELHORES FORMAS de compreender a tecnologia — isto há muito que é evidente. Os desafios que se avizinham apenas tornam essa necessidade mais urgente.

A promessa da tecnologia atrai-nos para a frente, e a pressão da concorrência torna virtualmente impossível parar. À medida que a corrida tecnológica acelera, novos desenvolvimentos aproximam-se cada vez mais depressa, e um erro fatal torna-se mais provável. Precisamos de encontrar um melhor equilíbrio entre a nossa capacidade de previsão e o nosso ritmo de avanço. Não podemos fazer muito para abrandar o crescimento da tecnologia, mas podemos acelerar o crescimento da previsão. E com uma melhor previsão, teremos uma melhor hipótese de orientar a corrida tecnológica por caminhos seguros.

Várias abordagens têm sido sugeridas para guiar a tecnologia. “O povo deve controlar a tecnologia” é um slogan plausível, mas tem dois possíveis significados. Se significa que devemos fazer com

que a tecnologia sirva as necessidades humanas, então faz todo o sentido. Mas se significa que o povo como um todo deve tomar decisões técnicas, então faz muito pouco sentido. O eleitorado não consegue julgar as intrincadas ligações entre tecnologia, economia, ambiente e vida; as pessoas carecem do conhecimento necessário. O próprio povo reconhece isso: segundo um inquérito da Fundação Nacional de Ciência dos EUA¹, 85% dos adultos norte-americanos acreditam que a maioria dos cidadãos não possui o conhecimento necessário para escolher quais as tecnologias a desenvolver. O público, de forma geral, deixa os julgamentos técnicos a cargo dos peritos.

Infelizmente, confiar os julgamentos aos peritos acarreta problemas. No livro *Advice and Dissent*², Primack e von Hippel apontam que “na medida em que a Administração conseguir manter informação desfavorável em segredo e o público confuso, o bem-estar público pode ser sacrificado impunemente em nome da conveniência burocrática e do lucro privado.” Os reguladores sofrem mais críticas quando um novo medicamento provoca uma única morte do que quando a ausência de um novo medicamento causa mil mortes. E regulam em conformidade. Os burocratas militares têm interesse em gastar dinheiro, esconder erros e continuar os seus projetos. E gerem mal em conformidade. Este tipo de problema é tão básico e natural que mais exemplos são quase desnecessários. Por todo o lado, o segredo e a névoa tornam os burocratas mais confortáveis; por todo o lado, a conveniência pessoal distorce as declarações factuais em assuntos de interesse público. À medida que as tecnologias se tornam mais complexas e importantes, este padrão torna-se mais perigoso.

Alguns autores consideram que o domínio de tecnocratas secretos é virtualmente inevitável. Em *Creating Alternative Futures*, Hazel Henderson argumenta³ que tecnologias complexas “*tornam-se inerentemente totalitárias*” (itálico no original) porque nem os eleitores nem os legisladores as conseguem compreender. Em *The Human Future Revisited*, Harrison Brown argumenta⁴ igualmente que a tentação de contornar os processos democráticos para resolver crises complexas traz consigo o perigo “de que, se a civilização industrial sobreviver, se tornará cada vez mais totalitária por natureza.” Se tal fosse verdade, isso muito provavelmente significaria a nossa perdição: não podemos parar a corrida tecnológica, e um mundo de estados totalitários baseados em tecnologia avançada, que não necessitem nem de trabalhadores nem de soldados, poderá muito bem descartar a maior parte da população.

Felizmente, a democracia e a liberdade já enfrentaram desafios comparáveis no passado. Os estados tornaram-se demasiado complexos para a democracia direta, mas evoluiu o governo representativo. O poder estatal ameaçou esmagar a liberdade, mas surgiu o Estado de Direito. A tecnologia tornou-se complexa, mas isso não nos dá qualquer razão para ignorar o povo, descartar a lei e aclamar um ditador. Precisamos de encontrar formas de lidar com a complexidade técnica dentro de um enquadramento democrático, utilizando os peritos como instrumentos para clarificar a nossa visão, sem lhes dar o controlo das nossas vidas. Mas os peritos técnicos de hoje estão atolados num sistema de conflitos partidários.

1. Uma Confusão de Especialistas

O governo e a indústria — e os seus críticos — nomeiam frequentemente comissões de peritos que se reúnem em segredo, se é que chegam a reunir-se. Estas comissões reclamam credibilidade com base em *quem são*, e não em *como funcionam*. Grupos opositores recrutam laureados com o Nobel igualmente opositores.

Para ganharem influência numa democracia de massas, os grupos tentam gritar mais alto do que os outros. Quando as suas posições têm apelo corporativo, levam-nas ao público através de campanhas publicitárias. Quando têm apelo político ou económico, levam-nas aos parlamentos através de lóbis. Quando têm apelo dramático, recorrem aos meios de comunicação para chegar ao público. Cada grupo promove os seus especialistas de estimação, a batalha torna-se pública, e os cientistas e engenheiros discretos são abafados no clamor geral.

À medida que o conflito público se intensifica, as pessoas começam a duvidar das declarações dos peritos. Julgam as afirmações da forma mais óbvia: pela sua origem. (“Claro que ela diz que os derrames de petróleo são inofensivos — trabalha para a Exxon.” “Claro que ele diz que a Exxon mente — trabalha para o Nader.”)

Quando os peritos estabelecidos perdem credibilidade, os demagogos podem entrar na contenda em pé de igualdade. Os

jornalistas — ávidos por polémicas, empenhados na imparcialidade, e raramente com formação técnica — divulgam todos os lados diretamente ao público. Declarações cautelosas de cientistas escrupulosos causam pouca impressão; outros cientistas veem-se sem alternativa senão adotar o estilo dos demagogos. Os debates tornam-se acesos e hostis, as divisões aprofundam-se, e o fumo da batalha obscurece os factos. Seguem-se frequentemente a paralisia ou a imprudência.

O nosso maior problema é o modo como lidamos com os problemas. Disputas inflamadas persistem quanto à segurança da energia nuclear, da energia a carvão e dos resíduos químicos⁵. Grupos bem-intencionados, apoiados por peritos credenciados, chocam-se repetidamente sobre factos técnicos enfadonhos — enfadonhos, entenda-se, salvo pela sua importância: Quais são os efeitos da radiação em baixos níveis, e qual é a probabilidade de fusão de um reator? Quais as causas e efeitos da chuva ácida? Com que eficácia poderão defesas espaciais bloquear ataques com mísseis? Cinco casos de leucemia num raio de três quilómetros de um determinado aterro indicam um perigo mortal ou são meramente obra do acaso?

Questões ainda maiores aproximam-se: Qual é a segurança deste replicador? Será seguro e fiável este sistema de escudo ativo? Este procedimento de biostase será reversível? Podemos confiar neste sistema de IA?

Disputas sobre factos técnicos alimentam disputas mais amplas sobre políticas públicas. As pessoas podem ter valores diferentes (o

que preferiria: encefalite ou envenenamento por pesticidas?), mas as suas percepções dos factos relevantes divergem frequentemente ainda mais. (Com que frequência estes mosquitos transmitem encefalite? Quão tóxico é este pesticida?) Quando diferentes perspetivas sobre factos aborrecidos originam desacordos sobre políticas importantes, as pessoas podem começar a pensar: “Como é que podem opor-se a nós nesta questão vital, a não ser que tenham más intenções?” Disputas sobre factos podem, assim, transformar potenciais aliados em adversários⁶. Isso prejudica os nossos esforços de compreender e resolver os problemas.

As pessoas disputam factos há milénios; apenas a proeminência dos conflitos técnicos é recente. As sociedades desenvolveram métodos para julgar factos sobre pessoas. Esses métodos sugerem como poderíamos avaliar factos sobre tecnologia.

2. Das Disputas ao Devido Processo Legal

Ao longo da História, os grupos humanos foram desenvolvendo formas de resolver disputas; a alternativa a isso foram as inimizades prolongadas, muitas vezes fatais. Os europeus medievais utilizaram diversos procedimentos — todos melhores do que os conflitos intermináveis:

Usavam o duelo judicial: os oponentes combatiam, e a lei atribuía razão ao vencedor.

Usavam a compurgação: vizinhos juravam pela honestidade do acusado; se um número suficiente de pessoas jurasse, as acusações eram retiradas.

Usavam o julgamento por ordália: numa das versões, o acusado era atado e lançado a um rio; quem se afundasse era inocente, quem flutuasse, culpado.

Usavam o julgamento por comités secretos: os conselheiros do rei reuniam-se para julgar e sentenciar conforme lhes parecesse justo. Em Inglaterra, reuniam-se numa sala chamada Star Chamber.

Estes métodos supostamente determinavam quem fez o quê — ou seja, os factos relativos a eventos humanos —, mas todos apresentavam graves falhas.

Hoje utilizamos métodos semelhantes para determinar o que causa o quê — os factos relativos à ciência e à tecnologia:

Usamos o duelo judicial na imprensa: os oponentes lançam palavras afiadas até que um dos lados sofra a morte política. Infelizmente, isto assemelha-se frequentemente a uma inimizade sem fim.

Usamos a compurgação: especialistas juram sobre determinados factos; se um número suficiente deles jurar o mesmo, os factos são declarados verdadeiros.

Usamos o julgamento por comités secretos: especialistas selecionados reúnem-se para julgar factos e recomendar as ações que lhes pareçam apropriadas. Nos Estados Unidos, fazem-no frequentemente em comités da Academia Nacional de Ciências (National Academy of Sciences).

O julgamento por ordália caiu em desuso, mas o combate na imprensa pode muito bem parecer uma tortura ao cientista discreto e respeitador de si próprio.

Os ingleses aboliram os julgamentos na Star Chamber em 1641, e consideraram isso uma grande conquista. O duelo judicial, a compurgação e a ordália tornaram-se também parte da História. Atualmente, valorizamos o devido processo legal — pelo menos quando se trata de julgar pessoas.

Os procedimentos judiciais ilustram os princípios do devido processo: as acusações devem ser específicas; ambas as partes devem ter oportunidade de se expressar e confrontar-se mutuamente, refutar argumentos e interrogar as testemunhas da outra parte. O processo deve ser público, para prevenir a corrupção oculta. O debate deve realizar-se perante um júri que ambas as partes aceitem como imparcial. Por fim, um juiz deve arbitrar o processo e assegurar o cumprimento das regras.

Para compreender o valor do devido processo, basta imaginar o seu oposto: um processo que espezinhe todos estes princípios, dando voz a um dos lados e impedindo o outro de responder ou

interrogar. Reunir-se-ia em segredo, permitiria insinuações vagas, e não teria juiz que impusesse as regras — se é que restassem regras. Os jurados chegariam com a decisão já tomada. Em suma, assemelhar-se-ia a um linchamento realizado num celeiro trancado — ou a um comité manipulado a redigir um relatório previamente decidido.

A experiência mostra o valor do devido processo quando se trata de julgar factos sobre pessoas; poderá também ser valioso ao julgar factos sobre ciência e tecnologia? O devido processo é uma ideia fundamental, não limitada aos tribunais. Alguns investigadores em Inteligência Artificial⁷, por exemplo, estão a incorporar princípios de devido processo nos seus programas de computador. Parece evidente que o devido processo pode ser útil na avaliação de factos técnicos.

Na verdade, a literatura científica — o principal fórum da ciência — já incorpora uma forma de devido processo: nos bons periódicos, as declarações científicas devem ser específicas. Em teoria, com tempo e persistência suficientes, todas as partes podem expor as suas posições num debate, já que os periódicos estão abertos à controvérsia. Embora os oponentes não se encontrem cara a cara, confrontam-se à distância; questionam-se e respondem em câmara lenta, através de cartas e artigos. Os revisores, como júris, avaliam as provas e os raciocínios. Os editores, como juízes, aplicam as regras de procedimento. A publicação mantém o debate aberto ao escrutínio público.

Tanto nas revistas científicas como nos tribunais, ideias opostas confrontam-se segundo regras desenvolvidas para garantir um combate justo e ordeiro. Por vezes, essas regras falham — ou porque são violadas, ou porque são inadequadas —, mas são as melhores que desenvolvemos até agora. Um devido processo imperfeito tem-se revelado melhor do que nenhum processo.

Por que é que os cientistas valorizam as revistas com revisão por pares? Não porque confiem em todas elas, nem porque acreditem em tudo o que é publicado em cada uma. Mesmo o melhor sistema de devido processo não produz uma corrente pura de verdades. Valorizam-nas porque tendem a refletir uma discussão crítica bem fundamentada. E têm de o fazer: como as revistas competem entre si por artigos, prestígio e leitores, as melhores têm de ser, de facto, muito boas. As revistas moem devagar, mas após várias rondas de publicação e crítica, frequentemente produzem consenso.

A experiência comprova o valor tanto dos tribunais como das revistas científicas. A semelhança de base entre ambos sugere que o seu valor provém de uma fonte comum — o devido processo. Pode falhar, sem dúvida, mas continua a ser o melhor método conhecido para descobrir os factos.

Hoje, no entanto, tribunais e revistas já não são suficientes. Disputas técnicas vitais arrastam-se sem fim porque não temos um método rápido e ordenado para revelar os factos (e delimitar a nossa ignorância). Os tribunais não estão preparados para lidar com questões técnicas. As revistas são melhores, mas também têm limitações. Foram concebidas numa época de tecnologia mais lenta,

moldadas pelos limites da impressão, pela lentidão do correio, e pelas exigências da ciência acadêmica. Porém, hoje, num tempo em que desesperadamente precisamos de julgamento técnico mais eficaz e célere, vivemos num mundo com telefones, aviões, fotocopiadoras, correio expresso e eletrônico. Poderemos usar estas tecnologias modernas para acelerar o debate técnico?

Claro que sim: os cientistas já usam várias abordagens. Os aviões transportam-nos de todo o mundo para conferências onde apresentam e discutem trabalhos. Mas as conferências lidam mal com a controvérsia: a etiqueta pública e os horários apertados limitam o vigor e a profundidade do debate.

Os cientistas também formam redes informais de investigação ligadas por telefone, correio, computadores e fotocopiadoras; estas aceleram a troca e discussão de ideias. Mas continuam a ser instituições privadas. Também não oferecem um procedimento público e credível para resolver divergências.

Conferências, revistas e redes informais partilham limitações semelhantes. Focam-se, em geral, em questões técnicas de importância científica, e não em questões técnicas de importância para a política pública. Além disso, tendem a centrar-se em problemas científicos. As revistas frequentemente negligenciam questões tecnológicas que não suscitam interesse científico intrínseco; tratam-nas como notícias, não sujeitas a revisão por pares.

Mais ainda: as instituições atuais não dispõem de qualquer meio equilibrado de apresentar conhecimento enquanto este ainda está envolto em controvérsia. Embora os artigos de revisão científica frequentemente apresentem e ponderem diferentes perspectivas, fazem-no sempre a partir da visão de um único autor.

Todas estas falhas partilham uma origem comum: as instituições científicas evoluíram para fazer avançar a ciência, não para seleccionar factos úteis aos decisores políticos. Servem bem o seu propósito original, mas servem mal outros propósitos. Isto não é propriamente uma falha, mas deixa uma necessidade real por satisfazer.

3. Uma Abordagem

Precisamos de melhores procedimentos para debater factos técnicos — procedimentos que sejam abertos, credíveis e orientados para a descoberta dos factos necessários à formulação de políticas sólidas. Podemos começar por copiar aspetos de outros processos baseados no devido processo; depois, poderemos modificá-los e refiná-los à luz da experiência. Utilizando as modernas tecnologias de comunicação e transporte, podemos desenvolver um processo focado, ágil e semelhante ao de uma revista científica, com o objetivo de acelerar o debate público sobre factos cruciais — isto parece ser metade do trabalho. A outra metade consiste em destilar os resultados do debate numa representação equilibrada do nosso estado de conhecimento (e, por consequência, do nosso estado de ignorância). Aqui, procedimentos algo semelhantes aos dos tribunais parecem úteis⁸.

Sendo o procedimento (um fórum de factos) destinado a resumir factos, cada parte começará por declarar aquilo que considera serem os factos-chave, listando-os por ordem de importância. A discussão terá início com as declarações que encabeçam as listas de cada lado. Através de rondas de argumentação, contrainterrogatório e negociação, o árbitro procurará obter declarações consensuais. Onde persistirem desacordos, um painel técnico redigirá pareceres, delineando o que parece estar estabelecido e o que ainda permanece incerto. O resultado do fórum de factos incluirá os argumentos de base, as declarações de concordância e os pareceres do painel. Poderá assemelhar-se a um conjunto de artigos científicos rematado por um artigo de revisão conciso — limitado exclusivamente a afirmações factuais, sem recomendações políticas.

Este procedimento terá necessariamente de diferir, em vários aspetos, dos tribunais. Por exemplo, o painel técnico — o “júri” do fórum — deverá possuir competência técnica. O enviesamento pode levar um painel a julgar mal os factos, mas a incompetência técnica causaria um dano equivalente. Por esta razão, a composição do “júri” de um fórum de factos deve seguir um critério que seria perigoso se fosse aplicado nos tribunais. Como os tribunais exercem o poder da polícia, utilizamos júris compostos por cidadãos comuns para salvaguardar as nossas liberdades. Isto obriga o governo a obter aprovação de um grupo de cidadãos antes de punir alguém, ligando assim as ações do governo aos padrões da comunidade. Um fórum de factos, porém, não punirá ninguém nem formulará políticas públicas. O público será livre de observar o processo e

decidir se acredita ou não nos seus resultados. Isto dará ao povo controlo suficiente.

Ainda assim, para tornar um fórum de factos justo e eficaz, será necessário um bom procedimento de seleção do painel. Os painéis técnicos corresponderão, de forma aproximada, aos comités de peritos nomeados pelos governos ou aos revisores nomeados por revistas científicas. Para garantir imparcialidade, o painel não deverá ser escolhido por um comité, político ou burocrata, mas sim através de um processo que envolva o consentimento de ambas as partes em disputa. Em tribunal, os advogados podem contestar e rejeitar jurados que considerem tendenciosos; poderemos usar um processo semelhante na seleção do painel de um fórum de factos.

Especialistas diretamente envolvidos na disputa não poderão fazer parte do painel — iriam enviesar o processo ou fragmentar o grupo. A entidade que patrocina o fórum de factos deverá procurar painelistas com conhecimentos em áreas afins. Isto parece ser viável, uma vez que os métodos de juízo técnico (frequentemente baseados em experiências e cálculos) são bastante gerais. Painelistas familiarizados com os fundamentos de uma área serão capazes de avaliar os argumentos detalhados apresentados pelos especialistas de cada lado.

Outros elementos do fórum de factos também se assemelharão aos dos tribunais e das revistas científicas. Um comité, semelhante ao grupo editorial de uma revista, nomeará um árbitro e os membros do painel para a resolução de um dado conflito. Os defensores de cada lado, como autores ou advogados, reunir-se-ão

para apresentar o argumento mais sólido que conseguirem construir.

Apesar destas semelhanças, um fórum de factos diferirá de um tribunal: focar-se-á em questões técnicas. Não sugerirá ações. Não terá poder governamental. Seguirá regras técnicas de prova e argumentação. Diferirá em inúmeros detalhes de tom e de procedimento. A analogia com um tribunal é apenas isso — uma analogia, uma fonte de ideias.

Um fórum de factos também diferirá de uma revista científica: avançará à velocidade permitida pelo correio, pelas reuniões e pelas mensagens eletrónicas, em vez de atrasar as trocas de informação por muitos meses, como ocorre na publicação científica convencional. Será convocado em torno de um tema específico, em vez de existir para cobrir uma área científica ampla. Terá por objetivo sintetizar o conhecimento existente para apoiar a tomada de decisões, e não servir como fonte primária de dados para a comunidade científica. Embora uma série de fóruns de factos não substitua uma revista científica, ajudará a identificar e a divulgar factos que podem salvar vidas.

O Dr. Arthur Kantrowitz (membro da Academia Nacional de Ciências dos EUA, com contribuições em áreas que vão desde a tecnologia médica até aos lasers de alta potência) foi o autor do conceito que acabei de expor⁹. Inicialmente, chamou-lhe um conselho de inquérito técnico. Os jornalistas apelidaram-no rapidamente de tribunal científico. Eu tenho-lhe chamado fórum de factos; reservarei o termo tribunal científico para um fórum de

factos usado (ou proposto) como uma instituição governamental¹⁰. As propostas de devido processo para disputas técnicas ainda estão em evolução; diferentes discussões utilizam diferentes termos.

A preocupação do Dr. Kantrowitz com o devido processo surgiu da decisão dos EUA de construir foguetões gigantes para alcançar a Lua de um só golpe. Ele, apoiado pelas conclusões de um comité de peritos¹¹, recomendara que a NASA utilizasse vários foguetões mais pequenos para transportar componentes até uma órbita baixa, onde estes seriam acoplados para formar um veículo com destino à Lua. Esta abordagem prometia poupar milhares de milhões de dólares e, ao mesmo tempo, desenvolver capacidades úteis de construção no espaço. Ninguém refutou os seus argumentos, mas ele não conseguiu vencer o debate. As decisões estavam tomadas, os políticos comprometidos, o relatório trancado num cofre da Casa Branca, e o debate encerrado. Os factos técnicos foram silenciosamente suprimidos em benefício daqueles que desejavam construir uma nova geração de foguetões gigantes.

Isto revelou uma falha grave nas nossas instituições — uma falha que persiste, desperdiçando recursos e aumentando o risco de erros desastrosos. O Dr. Kantrowitz chegou então à conclusão (hoje óbvia) de que precisamos de instituições com devido processo para dar espaço ao debate técnico.

O Dr. Kantrowitz perseguiu este objetivo (na sua versão de tribunal científico) através de debates, textos, estudos e conferências. Conseguiu obter o apoio à ideia de tribunal científico por parte de Ford, Carter e Reagan — enquanto candidatos. Como

Presidentes, nada fizeram, embora uma força-tarefa consultiva presidencial durante a administração Ford tenha delineado um procedimento proposto¹².

Ainda assim, algum progresso foi feito. Embora eu tenha utilizado o tempo futuro para descrever o fórum de factos, já se iniciaram experiências. Mas, antes de traçarmos um caminho para o devido processo, faz sentido considerar algumas das objeções.

4. Por Que Não o Devido Processo Legal?

Os críticos desta ideia (pelo menos na sua versão de tribunal científico) frequentemente discordam entre si. Alguns objetaram que os conflitos factuais são pouco importantes, ou que podem ser suavizados nos bastidores; outros objetaram que esses conflitos são demasiado profundos e importantes para que o devido processo possa ajudar. Alguns alertaram que os tribunais científicos seriam perigosos; outros advertiram que seriam impotentes. Todas estas críticas têm alguma validade: o devido processo não será uma cura para todos os males. Por vezes não será necessário, e por vezes será abusado. Ainda assim, poder-se-ia igualmente rejeitar a penicilina pelo facto de, por vezes, ser ineficaz, desnecessária ou prejudicial.

Esses críticos não propõem alternativas, e raramente defendem que já temos hoje o devido processo, ou que o devido processo é inútil. Temos de lidar com questões técnicas complexas das quais dependem milhões de vidas; teremos coragem de deixar estas

questões nas mãos de comités secretos, revistas científicas lentas, batalhas mediáticas e o julgamento técnico de políticos? Se desconfiamos dos especialistas, devemos então aceitar o julgamento de comités secretos nomeados em segredo, ou exigir um processo mais aberto? Finalmente, será que, com o sistema atual, conseguiremos lidar com uma corrida global pela tecnologia em nanotecnologia e inteligência artificial?

Instituições abertas com devido processo parecem vitais. Ao permitir a participação de todos os lados, aproveitarão a energia do conflito para a busca da verdade factual. Ao limitar os especialistas à descrição dos factos, ajudarão a lidar com a tecnologia sem entregar as decisões aos tecnocratas. Indivíduos, empresas e representantes eleitos manterão pleno controlo sobre as políticas; os especialistas técnicos continuarão a poder recomendar políticas por outros meios.

Como distinguir factos de valores? O critério de Karl Popper parece útil: uma afirmação é factual (seja verdadeira ou falsa) se puder, em princípio, ser refutada por uma experiência ou observação. Para algumas pessoas, a ideia de examinar factos sem considerar valores sugere uma formulação de políticas que também ignora valores. Isso seria absurdo: por definição, as decisões políticas envolverão sempre factos e valores. Causa e efeito são matéria de facto — dizem-nos o que é possível. Mas a política envolve também os nossos valores, as nossas motivações para agir. Sem factos exatos, não obteremos os resultados que procuramos; mas sem valores — sem desejos e preferências — não procuraríamos nada em primeiro lugar. Um processo que revele os

factos pode ajudar as pessoas a escolher políticas que sirvam os seus valores.

Alguns críticos receiam que um tribunal científico venha (na prática) a declarar que a Terra é plana e a ignorar um novo Aristarco de Samos ou um novo Fernão de Magalhães quando surjam evidências em contrário. Erros, preconceitos e conhecimento imperfeito causarão, com certeza, falhas memoráveis. Mas os membros de um painel técnico não precisam de reclamar uma certeza illusória. Podem, em vez disso, descrever o que se sabe e o que se ignora, dizendo por vezes que simplesmente não sabemos, ou que as evidências atuais fornecem apenas uma ideia geral dos factos. Assim, protegem a sua reputação de bom julgamento. Quando surgirem novas provas, a questão pode ser reaberta; as ideias não precisam de proteção contra a reavaliação.

Se os fóruns de factos se tornarem populares e respeitados, ganharão influência. O seu sucesso torná-los-á mais difíceis de abusar: muitos grupos concorrentes irão patrociná-los, e um grupo que abuse do processo tenderá a ganhar má reputação e a ser ignorado. Nenhum grupo patrocinador isolado conseguirá obscurecer os factos de um tema importante, se os fóruns de factos forem fiáveis graças à sua redundância.

Nenhuma instituição conseguirá eliminar a corrupção e o erro, mas os fóruns de factos serão guiados, ainda que imperfeitamente, por um padrão melhorado para o debate público; terão de piorar bastante para se tornarem piores do que o sistema que temos hoje. O argumento básico a favor dos fóruns de factos é que:

(1) o devido processo é o caminho certo a seguir, e

(2) faremos melhor se tentarmos do que se não tentarmos.

5. Construir o Devido Processo Legal

A antropóloga Margaret Mead foi convidada para um colóquio sobre o tribunal científico¹³ com o intuito de falar contra a ideia. No entanto, quando chegou o momento, falou a seu favor, observando:

Precisamos de uma nova instituição. Não há qualquer dúvida quanto a isso. As instituições que temos são totalmente insatisfatórias. Em muitos casos, não são apenas insatisfatórias, envolvem uma prostituição da ciência e uma prostituição do próprio processo de tomada de decisões.

Pessoas sem interesses instalados nas instituições atuais tendem a concordar com a sua avaliação.

Se descobrir os factos sobre a tecnologia é realmente crucial para a nossa sobrevivência, e se o devido processo é mesmo a chave para descobrir esses factos, então o que podemos fazer a esse respeito? Não precisamos de começar com procedimentos perfeitos; podemos iniciar com tentativas informais de melhorar os procedimentos que já temos. Podemos depois evoluir para métodos melhores, variando as abordagens e seleccionando aquelas que

funcionam melhor. Ou seja, o devido processo é uma questão de grau.

As instituições existentes poderiam mover-se em direção ao devido processo¹⁴, modificando algumas das suas regras e tradições. Por exemplo, os organismos governamentais poderiam consultar regularmente os lados opostos antes de nomear os membros de um comité de peritos. Poderiam garantir a cada lado o direito de apresentar provas, examinar as provas existentes e interrogar os peritos. Poderiam abrir os seus procedimentos à presença de observadores. Cada um destes passos reforçaria o devido processo, transformando procedimentos obscuros e opacos em instituições mais dignas de respeito.

Contudo, os benefícios públicos do devido processo não o tornarão necessariamente popular entre os grupos que estão a ser convidados a mudar. Ainda não ouvimos o clamor dos grupos de interesse a correr para testar as suas alegações, nem os gritos de júbilo por parte dos comités ao abrirem as suas portas e se submeterem à disciplina do devido processo. Tampouco ouvimos relatos de políticos a renunciar ao uso de factos espúrios para ocultar a base política das suas decisões.

Ainda assim, três candidatos presidenciais norte-americanos manifestaram-se a favor dos tribunais científicos. O Committee of Scientific Society Presidents, que inclui vinte e oito das principais sociedades científicas dos Estados Unidos, também endossou a ideia. O Department of Energy (Departamento de Energia dos EUA) utilizou um “procedimento semelhante ao tribunal científico” para

avaliar propostas concorrentes sobre energia de fusão, e declarou-o eficiente e útil. O Dr. John C. Bailar, do National Cancer Institute (Instituto Nacional do Câncer), após fracassar na tentativa de fazer com que as organizações médicas reconhecessem os perigos dos raios-X e reduzissem o seu uso em rastreios em massa, propôs a realização de um tribunal científico sobre o assunto. Os seus opositores recuaram e alteraram as suas políticas — aparentemente, a simples ameaça de um devido processo já está a salvar vidas. No entanto, os velhos métodos continuam quase sem ser desafiados.

Por que acontece isto? Em parte, porque o conhecimento é poder, e por isso é zelosamente guardado¹⁵. Em parte, porque os grupos poderosos conseguem facilmente imaginar o quão inconveniente seria para eles o devido processo. Em parte, porque um esforço para melhorar os métodos de resolução de problemas carece do dramatismo de uma campanha para combater diretamente os problemas; mil ativistas esvaziam a água do navio do Estado para cada um que tenta tapar os buracos no casco.

Os governos podem ainda agir no sentido de instituir tribunais científicos, e quaisquer passos que deem em direção ao devido processo merecem apoio. Ainda assim, é razoável temer o patrocínio governamental de tribunais científicos: o poder centralizado tende a gerar monstros pesados e ineficientes. Uma “Agência Central de Tribunal Científico” poderia funcionar bem, causar pouco dano visível e, mesmo assim, impor um grande custo oculto: a sua própria existência (e a ausência de concorrência) poderia bloquear a evolução natural de melhorias.

Outros caminhos estão abertos. Os fóruns de factos poderão exercer influência mesmo sem recorrer a poderes legais especiais. Para terem um impacto significativo, basta que os seus resultados sejam mais credíveis do que as alegações de qualquer indivíduo, comité, empresa ou grupo de interesse. Um fórum de factos bem conduzido carrega a credibilidade na própria estrutura. Fóruns deste tipo poderiam ser patrocinados por universidades.

Com efeito, o Dr. Kantrowitz conduziu recentemente um procedimento experimental na Universidade da Califórnia em Berkeley¹⁶. Este centrou-se em disputas públicas entre a geneticista Beverly Paigen e o bioquímico William Havender, sobre defeitos congénitos e riscos genéticos associados ao local de despejo químico Love Canal. Eles atuaram como defensores, enquanto estudantes de pós-graduação desempenharam o papel de painel técnico. O procedimento consistiu em reuniões ao longo de várias semanas, focadas sobretudo na discussão das áreas de consenso e divergência; terminou com várias sessões públicas de interrogatório cruzado perante o painel. Os dois defensores e o painel acordaram em onze declarações factuais e esclareceram os pontos restantes de desacordo e incerteza.

Arthur Kantrowitz e Roger Masters observam que,

em contraste com as dificuldades enfrentadas nas muitas tentativas de implementar tribunais científicos sob auspícios governamentais, os primeiros resultados encorajadores

foram obtidos numa tentativa séria... num ambiente universitário.

Eles notam que as tradições e os recursos das universidades fazem destes contextos naturais para esse tipo de esforço. Tencionam realizar mais experiências semelhantes.

Isto revela uma via descentralizada para desenvolver instituições de devido processo, permitindo-nos contornar burocracias estabelecidas e interesses entrincheirados. Ao fazê-lo, podemos basear-nos em princípios consolidados e testar variações segundo a melhor tradição evolutiva.

Líderes preocupados com mil questões distintas — mesmo líderes em lados opostos de uma disputa — podem unir-se em apoio ao devido processo. No livro *Getting to Yes*, Roger Fisher e William Ury, do Harvard Negotiation Project, apontam que os oponentes tendem a favorecer uma arbitragem imparcial quando cada lado acredita estar certo¹⁷. Ambos esperam vencer, e por isso ambos concordam em participar¹⁸. Fóruns de factos deverão atrair defensores honestos e repelir charlatões.

À medida que o devido processo se torna norma, os defensores de causas bem fundamentadas ganharão vantagem, mesmo que os seus oponentes recusem cooperar — “Se não quiserem defender a sua posição em público, por que havemos de lhes dar ouvidos?” Além disso, muitos conflitos serão resolvidos (ou evitados) sem a necessidade de procedimentos formais: a mera possibilidade de um

debate público supervisionado incentivará os defensores a verificar os factos antes de tomarem uma posição. A criação de fóruns de factos poderá facilmente fazer mais por uma causa legítima do que a mobilização de um milhão de apoiantes.

Contudo, hoje em dia, líderes bem-intencionados podem sentir-se forçados a exagerar os seus argumentos apenas para serem ouvidos acima do estrondo dos comunicados de imprensa dos seus opositores. Deverão eles, com pesar, opor-se à disciplina dos fóruns de factos? Decididamente não; o devido processo pode curar a doença social que os afastou da verdade em primeiro lugar. Ao apresentarem os seus argumentos num fórum de factos, podem recuperar o respeito próprio que advém da honestidade intelectual.

Descobrir a verdade pode abalar uma posição estimada, mas isso não prejudica os interesses de um verdadeiro grupo de interesse público. Se for necessário ceder um pouco para dar lugar à verdade — e depois? Grandes líderes mudaram de posição por razões bem piores, e o devido processo também forçará os oponentes a mudar.

Gregory Bateson afirmou uma vez:

Nenhum organismo pode dar-se ao luxo de estar consciente de assuntos que conseguiria resolver a nível inconsciente.

No organismo de uma democracia, o nível consciente corresponde, grosso modo, ao debate nos meios de comunicação de massas. Os níveis inconscientes consistem em todos os

processos que, em geral, funcionam suficientemente bem sem alarido público. Nos media, como na consciência humana, uma preocupação tende a suplantar outra. É isso que torna a atenção consciente tão escassa e valiosa. A nossa sociedade precisa de identificar os factos da sua situação de forma mais rápida e fiável, com menos disputas ruidosas nos meios de comunicação. Isso libertará o debate público para a sua verdadeira função — julgar os procedimentos para apurar os factos, decidir o que desejamos e ajudar-nos a escolher um caminho rumo a um mundo digno de ser vivido.

À medida que a mudança se acelera, cresce a nossa necessidade. Para avaliar os riscos de um replicador ou a viabilidade de um escudo ativo, precisaremos de melhores formas de debater os factos. Invenções sociais puras, como os fóruns de factos, serão úteis, mas também novas tecnologias sociais baseadas em computadores oferecem promessas. Elas, também, irão ampliar o alcance do devido processo.

CAPÍTULO 14

A Rede do Conhecimento

Os computadores... penetraram no nosso quotidiano e estão a tornar-se o sistema nervoso central da sociedade.

— TOHRU MOTO-OKA¹

PARA SE PREPARAR para o avanço dos montadores (assemblers), a sociedade terá de aprender a aprender mais depressa. Os fóruns de factos serão úteis, mas novas tecnologias poderão ajudar ainda mais. Com elas, poderemos disseminar, refinar e combinar a informação muito mais rapidamente do que alguma vez foi possível.

A sobrecarga de informação tornou-se um problema bem conhecido: fragmentos de conhecimento acumulam-se com demasiada rapidez para que as pessoas consigam classificá-los e compreendê-los. Milhares de publicações científicas cobrem milhares de áreas temáticas. São publicados mais de um milhão de artigos por ano. Os fóruns de factos ajudam a eliminar falsidades, o que facilitará os nossos esforços para compreender o mundo. No entanto, qualquer instituição formal deste tipo será inevitavelmente ultrapassada pelo dilúvio moderno de informação: os fóruns de factos conseguirão lidar apenas com uma fração — ainda que importante — dos dados disponíveis, e serão inevitavelmente algo

lentos. As instituições formais conseguem aceder apenas a uma pequena parte da energia mental da nossa sociedade.

Hoje, os nossos sistemas de informação dificultam o progresso. Para perceber o problema, imagine lidar com uma peça de informação: Descobriu algo — como o divulga? Outra pessoa publicou um dado — como o encontra? Encontrou-o — onde o arquiva? Detetou um erro — como o corrige? O seu arquivo cresce — como o organiza?

Lidamos, atualmente, com a informação de forma desajeitada. Os meios eletrónicos tradicionais são vívidos e cativantes, mas inadequados para gerir debates complexos e de longo prazo; como poderia o espectador arquivar, organizar ou corrigir a informação contida num documentário televisivo? Em suma, como poderia integrá-la de forma coerente num corpo de conhecimento em constante evolução? Conseguimos gerir debates complexos com mais eficácia através de meios impressos, mas as semanas (ou anos) de atraso no processo editorial típico fazem com que o debate avance a passo de caracol. E mesmo as publicações em papel são difíceis de arquivar, organizar e corrigir. As gráficas produzem feixes de papel impresso; com grande esforço, bibliotecários e académicos conseguem ligá-los e organizá-los de forma apenas vaga. No entanto, índices, referências e correções apenas acrescentam mais páginas ou mais edições, e seguir as ligações que representam continua a ser uma tarefa morosa.

Os livros e outros conjuntos de papel funcionam, de certo modo. Contêm muitos dos nossos tesouros culturais, e até agora não

temos melhor forma de publicar a maioria das coisas. Ainda assim, há muito espaço para melhorias.

A dificuldade em disseminar, corrigir e organizar a informação faz com que o nosso conhecimento coletivo seja relativamente escasso, incorreto e desorganizado. Como o conhecimento estabelecido é, muitas vezes, difícil de encontrar, acabamos por prescindir dele, o que nos faz parecer mais ignorantes do que realmente somos. Poderão as novas tecnologias ajudar-nos? Já o fizeram antes. A invenção da imprensa trouxe grandes avanços; os serviços textuais baseados em computadores prometem ainda mais. Para perceber como os nossos sistemas de informação poderiam ser melhores, talvez ajude imaginar como poderiam ser piores. Considere, então, uma confusão imaginária e uma solução igualmente imaginária:

1. O Conto do Templo

Era uma vez um povo que vivia com um problema de informação. Embora já tivesse substituído os seus volumosos tablets de argila por papel, usava-o de forma peculiar. No coração da sua terra erguia-se uma imponente cúpula. Sob essa cúpula situava-se a grande Câmara dos Escritos. No interior dessa câmara havia um vasto monte de pedaços de papel, cada um com o tamanho da mão de uma criança.

De tempos a tempos, um erudito fazia uma peregrinação até esse templo do saber para oferecer conhecimento. Um conselho de

escribas avaliava o seu valor. Se se revelasse digno, era inscrito num pedaço de papel e atirado, com cerimónia, sobre o monte.

Também de tempos a tempos, algum estudioso diligente vinha em busca de sabedoria — para vasculhar o monte em busca do pedaço necessário. Alguns, hábeis nessa arte, conseguiam encontrar um pedaço específico em apenas um mês. Os escribas recebiam com entusiasmo esses investigadores: eram tão raros.

Nós, modernos, vemos claramente o seu problema: num monte desorganizado, cada novo fragmento enterra os anteriores (como acontece em tantas secretárias). Cada pedaço é separado, sem relação com os outros, e a adição de referências ajudaria pouco quando encontrar um fragmento leva meses. Se usássemos tal monte para armazenar informação, os nossos extensos e pormenorizados escritos sobre ciência e tecnologia tornar-se-iam praticamente inúteis. As pesquisas demorariam anos — ou mesmo uma vida inteira.

Nós, modernos, temos uma solução simples: colocamos as páginas em ordem. Página após página formam um livro; livro após livro preenchem uma estante; estante após estante enchem um edifício — uma biblioteca. Com as páginas ordenadas, podemos encontrá-las e seguir referências com muito mais rapidez. Se os escribas contratassem estudiosos para empilhar os pedaços de papel por assunto, a investigação tornar-se-ia mais fácil.

Contudo, diante de pilhas sobre história, geografia e medicina, onde colocariam os estudiosos os fragmentos sobre geografia histórica, epidemiologia geográfica e história da medicina? Onde iriam colocar os pedaços sobre “A História da Propagação da Grande Peste”?

Mas, na nossa terra imaginária, os escribas optam por outra solução: mandam chamar um mágico. Antes, porém, soltam os estudiosos na câmara com agulhas e fio, para que tracem linhas de um fragmento a outro. Um fio de uma cor liga um fragmento ao seguinte numa série, outra cor aponta para uma referência, outra ainda para uma nota crítica, e assim por diante. Os estudiosos tecem uma rede de relações, representada por uma rede de fios. Por fim, o mágico (de olhos faiscantes e cabelo flutuante) entoia um feitiço, e toda aquela confusão ergue-se lentamente no ar, flutuando como uma nuvem sob a cúpula. Desde então, basta a um estudioso tocar num fio preso à borda de um fragmento para que o pedaço ligado salte, magicamente, para a sua mão. E os fios, por encantamento, nunca se embaraçam.

Agora, os estudiosos podem ligar os fragmentos sobre “A História da Propagação da Grande Peste” a pedaços relacionados com a história, a geografia e a medicina. Podem adicionar todas as notas e textos que desejarem, ligando-os da forma mais vantajosa. Podem criar fragmentos de índice especiais, capazes de trazer de imediato à mão qualquer conteúdo que mencionem. Podem colocar ligações onde quiserem, tecendo uma rede de conhecimento que reflita as conexões do mundo real.

Nós, com os nossos montes inertes de papel, só poderíamos invejá-los — se não tivéssemos computadores.

2. Papel Mágico Tornado Realidade

Em 1945, Vannevar Bush propôs um sistema a que chamou “memex”. Seria um dispositivo do tamanho de uma secretária, repleto de microfilmes e mecanismos, capaz de exibir páginas armazenadas e permitir ao utilizador assinalar relações entre elas. Um memex baseado em microfilme nunca chegou a ser construído, mas o sonho permaneceu vivo.

Hoje, os computadores e os ecrãs estão a tornar-se suficientemente baratos para serem usados na leitura e escrita quotidianas. Alguns editores de papel tornaram-se editores eletrónicos, disponibilizando revistas, jornais e publicações académicas através de redes informáticas. E, com os programas adequados, os computadores de tratamento de texto permitirão ligar estas informações de formas ainda mais eficazes do que os fios mágicos da alegoria anterior.

Theodor Nelson, o criador desta ideia, deu-lhe o nome de “hipertexto”: texto ligado em múltiplas direções, e não apenas numa sequência unidimensional. Leitores, autores e editores que utilizem um sistema de hipertexto irão, em geral, ignorar os detalhes do funcionamento dos computadores e dos ecrãs, tal como anteriormente ignoravam os mecanismos da fotocomposição e da litografia offset. Um sistema de hipertexto funcionará simplesmente

como papel mágico; qualquer pessoa que o manuseie depressa se familiarizará com as suas capacidades básicas. Ainda assim, uma descrição da estrutura de um dos sistemas ajudará a explicar como funcionará o hipertexto².

Na abordagem seguida pelo grupo de hipertexto Xanadu (em San Jose, Califórnia), o núcleo do sistema — o back end — é uma rede informática capaz de armazenar tanto documentos como ligações entre documentos. Um sistema inicial pode ser um computador de secretária de um único utilizador; eventualmente, uma rede crescente de máquinas poderá funcionar como uma biblioteca eletrónica. Os documentos armazenados poderão representar quase tudo: romances, diagramas, manuais escolares, programas — e, futuramente, até música ou filmes.

Os utilizadores poderão ligar qualquer parte de qualquer documento a qualquer outra. Quando um leitor aponta para uma extremidade de uma ligação (quer esta apareça no ecrã sublinhada, com um asterisco, ou com a imagem de um fio colorido), o sistema irá buscar e exibir o conteúdo na outra extremidade. Além disso, irá registar novas versões de um documento extenso sem armazenar cópias adicionais; bastará armazenar apenas as partes que foram modificadas. Isto permitirá conservar, de forma económica, as versões anteriores de qualquer documento publicado e alterado no sistema. E fará tudo isto com rapidez, mesmo quando a quantidade total de informação armazenada se tornar imensa. Uma rede de tais máquinas poderá, com o tempo, evoluir para uma biblioteca eletrónica mundial.

Na maioria dos sistemas de texto baseados em computador, para localizar informação o utilizador tem de introduzir palavras-chave ou códigos obscuros. O hipertexto também permitirá associar texto a códigos, a palavras-chave ou até a um catálogo de fichas simulado, mas a maioria dos leitores preferirá provavelmente ler e simplesmente apontar para as ligações. Como observou Theodor Nelson, o hipertexto será “uma nova forma de leitura e escrita, de certa forma semelhante à antiga, com citações, notas marginais e referências. Mas será também autoconstrutivo do ponto de vista social, formando uma nova estrutura percorrível, uma nova literatura.

Aquilo que o leitor verá ao navegar neste sistema dependerá, em parte, da sua própria máquina — o “frontend” (interface do utilizador ou parte visível do sistema), talvez um computador pessoal. O “backend” (infraestrutura de apoio ou parte invisível do sistema) limitar-se-á a arquivar e recuperar documentos; o frontend encarregar-se-á de os requisitar conforme o pedido do leitor e de os apresentar de forma adaptada às suas preferências.

Para imaginar como isto poderá surgir ao utilizador, imagine-se um ecrã do tamanho deste livro aberto, coberto de texto com o mesmo corpo que está agora a ler — texto nítido, num bom ecrã. Hoje, esse ecrã assemelhar-se-ia a um televisor, mas dentro de alguns anos poderá ser um objeto semelhante a um livro, com tamanho de colo, ligado por um cabo a uma fonte de informação. (Com a nanotecnologia, poderemos eliminar o cabo: um objeto do tamanho de um livro será capaz de conter um sistema de hipertexto

com imagens de todas as páginas de todos os livros do mundo, armazenadas em memória rápida de fita molecular.)

Neste livro — aquele que tem agora nas mãos — eu poderia descrever os livros de Theodor Nelson sobre o hipertexto³, *Literary Machines* e *Computer Lib*, mas não os poderia mostrar nestas páginas. As páginas desses livros estão noutro lugar, deixando-o, por agora, preso aos escritos de um só autor. Mas se isto fosse um sistema de hipertexto e eu, ou alguém, tivesse acrescentado a ligação óbvia, poderia apontar para as palavras “*Literary Machines*” aqui, e um instante depois o texto na página oposta desapareceria, sendo substituído pelo índice de conteúdos de Ted Nelson ou por uma seleção das suas citações feita por mim. A partir daí, poderia entrar no seu livro e explorá-lo livremente, enquanto o seu sistema de frontend exibiria quaisquer notas que eu tivesse ligado ao texto dele. Poderia depois regressar aqui (talvez agora com as notas dele sobre o meu texto visíveis) ou seguir para outros documentos ligados ao dele. Sem sair da cadeira, poderia percorrer todos os principais escritos sobre o hipertexto, saltando de ligação em ligação através de inúmeros documentos.

Ao manter o registo de ligações (por exemplo, entre esboços, versões provisórias e materiais de referência), o hipertexto ajudará as pessoas a escrever e rever obras mais ambiciosas. Usando ligações de hipertexto, poderemos tecer o nosso conhecimento em totalidades coerentes. John Muir observou que “quando tentamos isolar qualquer coisa, descobrimos que está ligada a tudo o resto no universo.” O hipertexto ajudará a manter as ideias interligadas de formas que melhor representam a realidade.

Com o hipertexto, poderemos recolher e organizar melhor o conhecimento, aumentando a nossa inteligência efetiva. Mas, para que a recolha de informação seja eficaz, ela tem de ser descentralizada; informação dispersa entre muitas mentes não pode ser introduzida no sistema por apenas alguns especialistas. O grupo Xanadu propõe uma solução simples: permitir que todos escrevam, e fazer com que o sistema pague automaticamente direitos de autor sempre que o conteúdo de alguém for lido por outros. Publicar será fácil, e as pessoas serão recompensadas por oferecer aquilo que os outros procuram.

Imagine aquilo que você próprio já desejou dizer sobre ideias e acontecimentos. Imagine os comentários esclarecedores que, neste momento, estão a desaparecer da memória tanto dos que os disseram como dos que os ouviram, por todo o mundo. Num sistema de hipertexto, os comentários serão fáceis de publicar e fáceis de encontrar. Imagine as perguntas que o inquietam. Poderia publicá-las também; e alguém que encontre uma resposta poderá, por sua vez, publicar uma réplica.

Como todos os participantes do sistema poderão escrever textos e criar ligações, a rede de hipertexto acumulará grandes repositórios de conhecimento e sabedoria — e ainda maiores montes de autêntico lixo. O hipertexto incluirá notícias antigas, publicidade, grafites, desabafos e mentiras — então, como poderá o leitor evitar o mau e concentrar-se no bom? Poderíamos nomear um comité editorial central, mas isso destruiria a abertura do sistema. A triagem da informação é, ela própria, um problema de

informação — para o qual o hipertexto, felizmente, nos ajudará a evoluir boas soluções.

Como o hipertexto poderá fazer praticamente tudo o que os sistemas em papel já fazem, podemos pelo menos aproveitar as soluções que já conhecemos. Os editores têm reputações estabelecidas no meio impresso, e muitos deles já começaram a migrar para a edição eletrónica. Num sistema de hipertexto, poderão publicar documentos em linha que cumpram os seus critérios editoriais. Os leitores que assim o desejarem poderão configurar os seus sistemas de (frontend) interface visível/interativa para exibirem apenas esses documentos, ignorando automaticamente o novo lixo digital. Para esses leitores, o sistema de hipertexto parecerá conter apenas material de editores consagrados, mas tornado mais acessível pela distribuição eletrónica e pelos enlaces (links) e índices do hipertexto. O verdadeiro lixo continuará presente (desde que os seus autores tenham pago uma pequena taxa de armazenamento), mas não terá de aparecer nos ecrãs dos leitores.

Contudo, poderemos ir mais longe. A aprovação de um documento (manifestada por enlaces e recomendações) poderá vir de qualquer pessoa; os leitores darão atenção ao material recomendado por quem respeitam. Inversamente, os leitores que encontrem documentos do seu agrado poderão ver quem os recomendou; isso conduzirá ao encontro de pessoas com interesses e preocupações comuns. Indiretamente, o hipertexto ligará pessoas e acelerará o crescimento de comunidades.

Quando publicar se tornar algo tão rápido e fácil, os escritores produzirão mais material. Como o hipertexto incentivará a edição independente, os editores terão ainda mais trabalho. Documentos que cite, listem ou liguem a outros documentos funcionarão como antologias, jornais ou índices de acesso instantâneo. O incentivo das regalias (royalties) encorajará as pessoas a ajudarem os leitores a encontrar o que procuram. Guias concorrentes para navegar na literatura surgirão rapidamente — e também guias para os próprios guias.

Os enlaces do hipertexto serão superiores às referências em papel — e não apenas pela rapidez. As referências em papel permitem que um leitor diligente siga os apontamentos de um documento para outro — mas tenta descobrir, em sentido inverso, quais os documentos que fazem referência ao que está a ler! Hoje, isso requer o uso de um índice de citações, um instrumento pesado, apenas disponível em bibliotecas de investigação, cobrindo temas limitados e com meses de atraso. Os enlaces do hipertexto funcionarão em ambas as direções, permitindo aos leitores encontrar comentários sobre o que estão a ler. Isto representa um verdadeiro avanço: submeterá as ideias a uma crítica mais completa, fazendo-as evoluir mais rapidamente.

A evolução do conhecimento — seja na filosofia, política, ciência ou engenharia — exige a geração, disseminação e verificação de memes (ideias replicáveis). O hipertexto irá acelerar esse processo. Os meios em papel tratam razoavelmente bem a geração e a disseminação de ideias, mas são desajeitados no processo de verificação. Uma vez que uma má ideia chega à impressão, ganha

vida própria, e nem o seu autor consegue, por norma, cravar uma estaca no seu coração. Uma refutação devastadora dessa má ideia torna-se apenas mais uma publicação, mais um pedaço de papel. Dias ou anos depois, os leitores que se deparem com a ideia enganosa terão poucas hipóteses de encontrar, por acaso, a sua refutação. Assim, o disparate perpetua-se. Só com o advento do hipertexto poderão os críticos cravar as suas farpas diretamente na substância dos alvos. Só com o hipertexto poderão os autores retratar-se dos seus erros, não queimando todas as bibliotecas nem lançando uma campanha de relações públicas, mas simplesmente revendo o seu texto e rotulando a versão anterior como "retratada". Os autores poderão "engolir as suas palavras" discretamente — o que lhes oferecerá alguma compensação pela crítica mais feroz que enfrentarão.

Os críticos poderão usar refutações claras para trespassar disparates (como os falsos limites ao crescimento), afastando-os da arena intelectual — embora não do registo histórico — quase assim que surgirem. Guias para uma boa crítica ajudarão os leitores a perceber se uma ideia já sobreviveu às piores objeções levantadas até então. Hoje, a ausência de crítica conhecida não significa muito, porque comentários críticos breves são difíceis de publicar e ainda mais difíceis de encontrar. Num sistema de hipertexto consolidado, porém, ideias que resistam a todas as críticas conhecidas terão realmente vencido um desafio significativo. Ganharão credibilidade autêntica — e em crescimento.

3. Conetando o Nosso Conhecimento

As vantagens do hipertexto são profundas; é por isso que serão grandiosas. O hipertexto permitirá representar o conhecimento de forma mais natural. O conhecimento humano forma uma teia ininterrupta, e os problemas humanos estendem-se por entre fronteiras difusas entre disciplinas. Filas ordenadas de livros representam mal a estrutura do nosso saber. Os bibliotecários têm-se esforçado para tornar essas filas mais semelhantes a redes, inventando formas cada vez melhores de indexar, referenciar e organizar pedaços de papel. Contudo, apesar dos nobres esforços e conquistas dos bibliotecários, a investigação em bibliotecas continua a assustar todos, exceto uma minoria dedicada do público leitor. As bibliotecas evoluíram na direção do hipertexto, mas a mecânica do papel ainda as limita. Os sistemas de hipertexto permitir-nos-ão dar um passo de gigante na direção em que nos temos vindo a mover desde a invenção da escrita.

As nossas próprias memórias funcionam por associações, por ligações que tornam as recordações recuperáveis. Investigadores de Inteligência Artificial (IA) também reconhecem as associações como essenciais para tornar o conhecimento útil; programam o que chamam de “redes semânticas” para construir sistemas de representação do saber. No papel, as associações entre palavras tornam um dicionário de sinónimos útil; na mente, o vocabulário ativo depende de associações rápidas e flexíveis entre palavras. De facto, as relações na memória fornecem o contexto que dá sentido às nossas ideias. Usando o hipertexto, as pessoas poderão associar ideias através de ligações publicadas, enriquecendo o seu

significado e tornando-as mais acessíveis — tornando-as, até, mais semelhantes a partes da nossa própria mente.

Quando mudamos de opinião sobre como é o mundo e para onde se dirige, reconfiguramos as nossas redes internas de conhecimento. A mudança racional exige frequentemente a comparação entre padrões de ideias concorrentes. Para avaliar uma visão do mundo apresentada num livro, um leitor precisa, por vezes, de se lembrar — ou reler — explicações dadas em páginas anteriores, ou num artigo contraditório lido no ano anterior. Mas a memória humana é falível, e procurar em papéis antigos pode parecer demasiado trabalhoso. Sabendo disto, os autores hesitam entre pôr informação a mais (aborrecendo os leitores) e deixar informação a menos (fragilizando a argumentação). Inevitavelmente, fazem ambas as coisas ao mesmo tempo.

Os leitores de hipertexto poderão ver se as fontes ligadas sustentam uma ideia ou se as críticas ligadas a desmontam. Os autores poderão escrever resumos concisos e entusiasmantes das suas ideias, ligando-os a explicações longas e eventualmente monótonas. À medida que os autores expuserem as suas teses e os críticos as contestarem, disporão lado a lado as suas redes de visões do mundo concorrentes, ponto por ponto. Os leitores não conseguirão julgar ideias de forma instantânea ou perfeita, mas conseguirão fazê-lo de modo mais rápido e mais apurado. Desta forma, o hipertexto ajudará numa das grandes tarefas do nosso tempo: julgar o que está por vir e ajustar o nosso pensamento perante perspectivas que abalam os alicerces das visões do mundo

estabelecidas. O hipertexto fortalecerá a nossa capacidade de antecipação.

Neste ponto, muitas das aplicações úteis de um sistema de hipertexto amadurecido já serão evidentes — ou tão evidentes quanto possível hoje, antes de as termos experimentado diretamente. A difusão de notícias é uma dessas aplicações óbvias.

As notícias moldam a nossa visão do mundo, mas os meios de comunicação modernos limitam severamente aquilo que os repórteres podem retratar. Muitas vezes, histórias sobre tecnologia e acontecimentos mundiais só fazem sentido quando inseridas num contexto mais amplo, mas o espaço limitado e os prazos apertados das publicações retiram o contexto necessário às notícias. Isso enfraquece a nossa compreensão dos acontecimentos. Com o uso do hipertexto, os repórteres poderão facilmente ligar as notícias do dia a discussões de fundo mais alargadas. E mais: as pessoas envolvidas nas histórias — bem como os observadores ocasionais — poderão dar a sua opinião, ligando os seus comentários à reportagem do jornalista.

A publicidade lubrifica as engrenagens da economia, orientando (e por vezes iludindo) os consumidores em direção aos produtos disponíveis. Consumidores bem informados conseguem evitar produtos de fraca qualidade ou com preços abusivos, mas a pesquisa necessária e a comparação entre alternativas consomem tempo. Num sistema de hipertexto, no entanto, empresas de apoio ao consumidor poderão montar catálogos comparativos, ligando

descrições de produtos concorrentes entre si, a resultados de testes e a relatos de outros consumidores.

Na educação, aprendemos melhor quando estamos interessados naquilo que lemos. Mas a maioria dos livros apresenta as ideias numa única sequência e num único nível de dificuldade, independentemente do contexto ou dos interesses do leitor. Mais uma vez, a procura popular favorecerá o crescimento de redes úteis em hipertexto. As pessoas estabelecerão ligações entre apresentações semelhantes escritas a diferentes níveis. Os estudantes poderão ler num nível confortável, espreitando para discussões paralelas que vão um pouco mais fundo. Matérias difíceis tornar-se-ão mais acessíveis, porque ligações a introduções e definições básicas permitirão pausas para revisão — de forma instantânea, privada e sem constrangimento. Outras ligações conduzirão em todas as direcções para material relacionado; por exemplo, um texto sobre recifes de coral poderá conter links tanto para ecologia marinha como para histórias de tubarões esfomeados. Quando pudermos satisfazer interesses momentâneos quase instantaneamente, aprender tornar-se-á mais divertido. Mais pessoas poderão, então, tornar-se viciadas no saber.

O devido processo irá florescer no hipertexto. Porque estará aberto a todas as partes e permitirá o questionamento, a resposta e a contra-argumentação, o debate em hipertexto possuirá uma qualidade inerente de justiça processual. De facto, o hipertexto será o meio ideal para a realização de fóruns de factos. Os procedimentos destes fóruns, por sua vez, complementarão o hipertexto ao destilar debates vastos e diversificados numa

declaração clara (ainda que provisória) dos principais factos técnicos.

Por fim, haverá um efeito óbvio: o hipertexto reduzirá o problema das citações fora de contexto. Os leitores poderão fazer aparecer de imediato o contexto original em torno de qualquer citação no sistema, com o simples toque de um botão. Isto será de grande valor — não apenas para evitar a deturpação da posição de um autor, mas também pelos benefícios indiretos. Declarações razoáveis, quando arrancadas ao seu contexto, podem parecer absurdas; mas os autores em hipertexto saberão que essas citações “absurdas” reconduzirão imediatamente os leitores ao contexto original. Isto encorajará uma escrita mais ousada, dando vantagem aos memes baseados em evidência e razão sobre os que se sustentam apenas na convenção ou na timidez.

Talvez o benefício mais importante (ainda que menos vívido) do hipertexto seja a nova capacidade de ver ausências. Para sobrevivermos aos anos que se avizinham, teremos de avaliar corretamente ideias complexas — e isso requer a capacidade de perceber se um argumento está cheio de lacunas. Mas hoje em dia temos dificuldade em ver lacunas.

Ainda mais difícil é reconhecer a ausência de lacunas fatais — e, no entanto, esta é a chave para reconhecer um argumento sólido. O hipertexto há-de ajudar-nos. Os leitores irão escrutinar argumentos importantes, anexando objeções visíveis onde encontrarem falhas. Essas objeções tornarão as lacunas tão consistentemente visíveis que a ausência de boas objeções indicará

claramente a ausência de falhas conhecidas. Pode ser difícil compreender plenamente o quão importante isto será: a mente humana tende a não reconhecer os problemas que surgem da nossa incapacidade de ver a ausência de falhas — quanto mais as oportunidades que essa incapacidade nos faz perder.

Por exemplo, imagine que tem uma ideia e tenta decidir se é válida e digna de ser publicada. Se a ideia não for evidente, poderá duvidar da sua veracidade e decidir não a publicar. Mas, se lhe parecer óbvia, poderá assumir que já foi publicada algures — apenas não consegue descobrir onde. O hipertexto, ao tornar muito mais fácil encontrar o que já foi dito, também tornará mais evidente o que ainda não foi publicado. Ao tornar as lacunas no nosso conhecimento mais visíveis, o hipertexto incentivará o preenchimento dessas lacunas.

Para compreender e orientar a tecnologia, precisamos de identificar os erros — incluindo as omissões — em propostas tecnológicas complexas. Como fazemos isso mal, cometemos muitos erros; e a visibilidade desses erros transforma a nossa incompetência num facto vívido e ameaçador. Isto incentiva a prudência — mas também pode levar à paralisia: como temos dificuldade em detetar lacunas, acabamos por temê-las em todo o lado, mesmo onde não existem. O hipertexto ajudará a construir confiança, onde esta for justificada, ao expor os problemas de forma mais fiável.

4. Perigos do Hipertexto

Tal como acontece com a maioria das ferramentas úteis, o hipertexto poderá ser usado para fazer o mal. Ainda que nos ajude a manter o registo dos factos, também poderá ajudar os governos a manterem o registo de nós. No entanto, no balanço geral, poderá vir a servir a liberdade. Sendo concebido para a descentralização — com muitas máquinas, muitos autores, muitos editores — o hipertexto poderá beneficiar mais os cidadãos do que aqueles que os pretendem governar. De qualquer modo, os bancos de dados governamentais estão a crescer. Os sistemas de hipertexto poderão até ajudar-nos a manter vigilância sobre eles.

Depender da publicação eletrónica traz outro perigo. Governos nos Estados Unidos e noutros países têm, por vezes, interpretado o ideal outrora expresso como “liberdade de expressão” e “liberdade de imprensa” apenas como a liberdade de falar e de vender papel impresso com tinta. Os governos têm regulado o uso da rádio e da televisão, exigindo que estes sirvam a noção mutável de “interesse público” ditada por uma burocracia. As limitações práticas do número de canais de transmissão foram em tempos uma desculpa para tal controlo, mas essas desculpas devem terminar aqui. Temos de estender os princípios da liberdade de expressão aos novos meios de comunicação.

Ficariamos horrorizados se o governo enviasse agentes às bibliotecas para queimar livros. Devemos sentir o mesmo horror quando o governo procura apagar documentos públicos das bibliotecas eletrónicas. Se o hipertexto vier a transportar as nossas

tradições, então tudo o que for publicado deve permanecer publicado. Uma biblioteca eletrónica não será menos biblioteca por não ter estantes nem papel. O ato de apagar não produzirá chamas nem fumo — mas o fétido da queima de livros continuará a fazer-se sentir.

5. Do Desktop Para a Biblioteca Mundial

Alguns dos benefícios que descrevi só resultarão de um sistema de hipertexto de grandes dimensões e altamente evoluído — um sistema que já funcione como fórum para debates alargados e que esteja a caminho de se tornar uma biblioteca eletrónica mundial. Pode acontecer que um sistema assim não tenha tempo de amadurecer antes de surgirem os avanços cruciais nos campos dos montadores moleculares (assemblers) e da inteligência artificial. Para que o hipertexto descole, os pequenos sistemas terão de ter aplicações práticas; e para que o hipertexto nos ajude a lidar com a corrida tecnológica, os pequenos sistemas terão de produzir efeitos que superem a sua escala. Felizmente, podemos esperar benefícios substanciais logo desde o início.

Máquinas individuais de hipertexto conseguirão servir vários utilizadores ao mesmo tempo. Mesmo sem qualquer ligação ao mundo exterior, ajudarão empresas, associações e grupos de investigação a lidar com informação complexa.

Contudo, as ligações externas serão fáceis de estabelecer. O número de bases de dados disponíveis publicamente cresceu de

algumas dezenas nos meados dos anos 1960 para algumas centenas nos anos 1970 e para alguns milhares nos anos 1980. As empresas disponibilizaram essas bases de dados através de redes informáticas. Os sistemas de hipertexto conseguirão ir buscar material a essas bases, armazenando os códigos de acesso em vez do texto em si. A informação parecerá estar no sistema de hipertexto, o que será suficiente para muitos fins.

As pessoas usarão os primeiros sistemas para fornecer um serviço de acesso telefónico à comunidade, semelhante aos quadros de avisos informáticos já existentes — mas melhor. Grupos de discussão dedicados a interesses específicos já emergiram nas redes informáticas; esses grupos encontrarão no hipertexto um meio superior para trocar informações e pontos de vista.

Os sistemas iniciais de hipertexto também ajudarão a construir e gerir organizações. A conferência informática tradicional (baseada apenas na troca de mensagens curtas) já facilita a comunicação entre grupos. As vantagens em relação às reuniões presenciais incluem menores custos (dispensa de deslocações), interações mais fluidas (dispensa de interrupções ou esperas) e um melhor encontro de ideias (graças a mensagens mais claras e menos conflitos de personalidade). A comunicação via hipertexto ampliará esses benefícios, ao fornecer melhores ferramentas para referenciar, comparar e resumir conteúdos. Como os debates em hipertexto não precisarão de um único editor, permitirão que as organizações se tornem mais abertas.

Utilizar um serviço de hipertexto a partir de um computador doméstico, via telefone, durante as horas de menor tráfego, custará provavelmente vários dólares por hora, numa fase inicial. Esse custo, contudo, tenderá a diminuir com o tempo. Há várias décadas que o custo real dos computadores tem vindo a cair cerca de um factor de dez a cada dez anos; o custo das comunicações também tem seguido essa trajetória descendente. Os sistemas de hipertexto tornar-se-ão acessíveis para um número considerável de pessoas praticamente desde o momento em que estiverem disponíveis. Dentro de dez anos, é provável que os custos tenham descido o suficiente para permitir o seu uso generalizado.

A publicação eletrónica já está a ganhar terreno. A Academic American Encyclopedia, estruturada como um simples hipertexto, foi disponibilizada a 90.000 assinantes, incluindo 200 bibliotecas e oito escolas. A revista *Time*⁴ relata que as crianças a utilizam com entusiasmo. Terminais instalados em bibliotecas já permitem o acesso ao texto de dezenas de jornais, revistas e publicações profissionais.

Não precisaremos de esperar por um sistema universal para desfrutar de benefícios universais, pois o hipertexto começará a fazer a diferença muito cedo. Precisamos de pôr o hipertexto nas mãos de estudantes, escritores, investigadores e gestores, pela mesma razão que precisamos de manuais escolares nas escolas, instrumentos nos laboratórios e ferramentas nas oficinas. Alguns livros provocaram grandes mudanças, mesmo quando lidos por menos de uma pessoa em mil, porque fizeram novas ideias propagar-se pela sociedade. O hipertexto fará o mesmo: ajudará a

refinar ideias que depois se espalharão mais amplamente através dos meios impressos e audiovisuais já estabelecidos.

6. Hipertexto e Imprensa

Como se comparará a revolução do hipertexto com a revolução de Gutenberg? Alguns números sugerem a resposta.

A impressão com caracteres móveis reduziu dramaticamente o custo dos livros. No século XIV, o Advogado do Rei de França possuía apenas setenta e seis livros — e isto era considerado uma biblioteca considerável. Cada livro representava semanas de trabalho especializado — os copistas eram letrados. As massas camponesas não podiam pagar livros, nem sabiam lê-los.

Hoje, um ano de trabalho permite adquirir milhares de livros. Muitas casas têm centenas; grandes bibliotecas possuem milhões. A impressão reduziu o custo dos livros em mais de cem vezes, lançando as bases da alfabetização em massa, da educação generalizada e da revolução contínua da tecnologia e da democracia.

E o hipertexto? Gutenberg mostrou à Europa como organizar tipos metálicos para imprimir páginas; o hipertexto permitirá reorganizar textos armazenados e enviá-los através do país à velocidade da luz. A impressão colocou pilhas de livros nas casas e montanhas de livros nas bibliotecas; o hipertexto, na prática, trará essas montanhas de livros a cada terminal. O hipertexto prolongará

a revolução de Gutenberg, aumentando a quantidade de informação disponível⁵.

Contudo, as suas outras vantagens parecem ainda maiores. Hoje, seguir uma referência numa biblioteca leva tipicamente alguns minutos; com sorte, umas centenas de segundos — mas pode demorar dias ou mais, se o material for impopular e, por isso, inexistente, ou demasiado popular e, por isso, em falta. O hipertexto reduzirá este intervalo de centenas de segundos para cerca de um segundo. Assim como a revolução de Gutenberg reduziu o custo laboral de produção de texto em várias centenas de vezes, a revolução do hipertexto reduzirá o custo laboral de encontrar texto numa proporção semelhante. Isto será uma verdadeira revolução.

Como já referi, tornar os vínculos (links) mais convenientes mudará a própria textura do texto, provocando uma revolução não apenas em quantidade, mas também em qualidade. Este aumento de qualidade assumirá várias formas. Índices mais eficazes tornarão a informação mais fácil de localizar. Discussões críticas mais refinadas eliminarão disparates e ajudarão boas ideias a prosperar. Apresentações mais claras dos conjuntos revelarão as lacunas no nosso conhecimento.

Com informação abundante, acessível e de alta qualidade, pareceremos mais inteligentes. E isso aumentará as nossas hipóteses de lidar corretamente com os avanços que se avizinham. O que poderia ser mais útil? Da próxima vez que vir uma mentira a

espalhar-se ou uma má decisão tomada por pura ignorância, pára um instante e pensa no hipertexto.

CAPÍTULO 15

Mundos Suficientes, e Tempo

A dificuldade não está nas novas ideias, mas em escapar às antigas, que se ramificam, para aqueles que foram criados como a maioria de nós, em todos os cantos da nossa mente.

— JOHN MAYNARD KEYNES

DESCREVI como os avanços na química e na biotecnologia conduzirão à criação de montadores moleculares (assemblers), os quais trarão consigo nanocomputadores, replicadores e máquinas de reparação celular. Descrevi ainda como os avanços no campo do software nos levarão à engenharia automatizada e à inteligência artificial. Em conjunto, esses progressos tornarão possível um futuro rico em possibilidades — uma das quais é a nossa própria destruição. Se usarmos fóruns de factos e hipertexto para fortalecer a nossa capacidade de previsão, talvez consigamos evitar a aniquilação e seguir em frente — mas rumo a quê?

Rumo a uma transformação global que poderá, se formos bem-sucedidos, trazer abundância e longevidade a todos os que as desejarem¹. E esta é uma perspetiva que, de forma bastante natural, desperta sonhos de utopia.

Uma utopia padronizada, como todos sabemos, seria estática, monótona e insuportável — na verdade, não seria uma utopia de todo. No entanto, vezes sem conta, os sonhos utópicos mudaram a História, para o bem ou para o mal. Sonhos perigosos levaram pessoas a matar em nome do amor, e a escravizar em nome da fraternidade. Demasiadas vezes, o sonho era impossível, e a tentativa de o realizar revelou-se desastrosa.

Precisamos de sonhos úteis para guiar as nossas ações. Um sonho útil deve mostrar-nos um objetivo possível e desejável, sendo que os passos dados na sua direção devem gerar resultados positivos. Para nos ajudar a cooperar na orientação da corrida tecnológica, precisaremos de objetivos que atraiam pessoas com sonhos distintos — mas que objetivos poderão servir? Parece que terão de incluir espaço para a diversidade. Do mesmo modo, que objetivos escolhidos hoje, tão perto da aurora da inteligência, poderão ser dignos do potencial do futuro? Parece que terão de incluir espaço para o progresso.

Apenas um tipo de futuro parece suficientemente amplo para ter um apelo igualmente amplo: um futuro aberto, de liberdade, diversidade e paz. Um futuro com espaço para a prossecução de muitos sonhos diferentes atrairá muitos tipos diferentes de pessoas. Planos mais grandiosos — como o estabelecimento de uma ordem mundial uniforme — parecem mais perigosos. Se “um só mundo, ou nenhum” significar impor um único sistema social a um mundo com potências nucleares hostis, então isso parece uma receita para o desastre. “Muitos mundos, ou nenhum” parece ser a nossa

verdadeira escolha — se conseguirmos desenvolver escudos ativos que garantam a paz.

Talvez possamos fazê-lo. Usando sistemas de engenharia automatizada como os descritos no Capítulo 5, poderemos explorar os limites do possível a um milhão de vezes a velocidade humana. Assim, ser-nos-á possível delinear os limites últimos da corrida tecnológica, incluindo a corrida armamentista. Com escudos baseados nesse conhecimento, parece plausível alcançar uma paz estável e duradoura².

A tecnologia emergente não precisa de empurrar o mundo para um único molde. Durante muito tempo, muitos temeram que máquinas cada vez maiores e organizações cada vez mais vastas dominassem o nosso futuro, esmagando a diversidade e a liberdade humana. De facto, as máquinas podem crescer, e algumas crescerão. As organizações também podem expandir-se, e algumas expandir-se-ão. Mas máquinas barulhentas e malcheirosas, e burocracias pesadas, já começaram a parecer antiquadas em comparação com microcircuitos, biotecnologia e organizações fluidas.

Hoje conseguimos antever os contornos de uma tecnologia mais elevada e à escala humana, de um mundo com máquinas que não fazem barulho, fábricas químicas que não poluem e sistemas de produção que não utilizam pessoas como peças de engrenagem. A nanotecnologia mostra que os avanços podem trazer um estilo diferente de tecnologia. Montadores moleculares e IA permitir-nos-ão criar produtos complexos sem recorrer a organizações

complexas. Escudos ativos permitir-nos-ão garantir a paz sem um vasto complexo militar-industrial. Estas tecnologias ampliarão as nossas escolhas ao afrouxarem os nossos constrangimentos, criando espaço para maior diversidade e independência. Estabelecer uma Era de riqueza universal exigirá apenas que os vastos e ainda por reclamar recursos do espaço venham a ser um dia divididos de forma a garantir a todos uma parte significativa.

Nas próximas secções, farei uma panorâmica de algumas possibilidades extremas que os novos recursos e os novos motores de criação abrirão para nós — extremos que vão desde a ficção científica até formas de vida semelhantes à da Idade da Pedra. Pense nesses extremos como cores primárias intensas, e depois mistura a sua própria paleta para pintar um futuro ao seu gosto.

1. Nanotecnologia e Vida Quotidiana

A tecnologia em avanço pode pôr fim à vida ou prolongá-la, mas também pode transformar a sua qualidade. Os produtos baseados em nanotecnologia irão permear o quotidiano das pessoas que optarem por usá-los. Algumas consequências serão triviais; outras poderão ser profundas.

Certos produtos terão efeitos tão banais como simplificar as tarefas domésticas (e tão relevantes como reduzir as causas de conflitos familiares). Não deverá ser nenhum feito extraordinário, por exemplo, fazer com que tudo, desde pratos a carpetes, se torne autolimpante, e que o ar doméstico se mantenha permanentemente

fresco. Para nanomáquinas devidamente concebidas, a sujidade seria simplesmente alimento.

Outros sistemas baseados em nanotecnologia poderiam permitir a produção de alimentos frescos — carne genuína, cereais, vegetais e afins — em casa, durante todo o ano. Estes alimentos resultam do crescimento celular em determinados padrões presentes em plantas e animais; ora, essas células podem ser induzidas a crescer nesses mesmos padrões noutros ambientes. Cultivadores domésticos de alimentos permitirão às pessoas manter dietas convencionais sem necessidade de matar qualquer ser vivo. O movimento pelos direitos dos animais (o precursor de um movimento mais amplo de proteção de todas as entidades conscientes e sensíveis?) será conseqüentemente fortalecido.

A nanotecnologia tornará possível ecrãs de altíssima resolução que projetam imagens diferentes para cada olho; o resultado será uma televisão tridimensional tão real que o ecrã parecerá uma janela para outro mundo. Ecrãs deste tipo poderiam forrar o interior do capacete de um fato semelhante ao fato espacial descrito no Capítulo 6. O próprio fato, em vez de ser programado para transmitir forças e texturas provenientes do exterior, poderia aplicar diretamente à pele forças e texturas definidas por um programa complexo e interativo. Uma combinação de fato e capacete desta natureza poderia simular a maioria das visões e sensações de um ambiente inteiro, fosse ele real ou imaginário. Ou seja, a nanotecnologia possibilitará formas de arte vívidas e mundos de fantasia muito mais envolventes do que qualquer livro, jogo ou filme.

As tecnologias avançadas permitirão um mundo inteiro de produtos que farão com que as comodidades modernas pareçam desconfortáveis ou até perigosas. Por que não haveriam os objetos de ser leves, flexíveis, duráveis e cooperativos? Por que não haveriam as paredes de parecer exatamente como desejamos, e de transmitir apenas os sons que queremos ouvir? E por que haveriam os edifícios e os automóveis de esmagar ou carbonizar os seus ocupantes? Para quem assim o deseje, o ambiente da vida quotidiana poderá assemelhar-se a algumas das descrições mais extravagantes da ficção científica.

2. Outros Sonhos de Ficção Científica

Em direção a muitos extremos encontram-se os sonhos da ficção científica, para aqueles que desejem vivê-los. Estes variam desde casas que colaboram connosco para o nosso conforto até oportunidades de trabalho em planetas distantes. Os autores de ficção científica imaginaram muitas coisas — algumas possíveis e outras em clara contradição com as leis naturais conhecidas. Alguns sonharam com a viagem espacial — e a viagem espacial tornou-se realidade. Outros sonharam com robôs — e os robôs também chegaram. Alguns sonharam com viagens espaciais baratas e robôs inteligentes — e esses também estão a caminho. Outros sonhos parecem igualmente possíveis.

Autores escreveram sobre a partilha direta de pensamentos e emoções de mente para mente. A nanotecnologia parece vir a tornar possível uma forma disso, através da ligação de estruturas neurais por meio de transdutores e sinais eletromagnéticos. Apesar

de limitada à velocidade da luz, este tipo de telepatia parece tão plausível quanto a telefonia.

Naves estelares, colônias espaciais e máquinas inteligentes tornar-se-ão todas possíveis. Tudo isto ocorre fora da pele, por assim dizer; no entanto, os autores escreveram também sobre transformações dentro da pele — e essas, também, tornar-se-ão possíveis. Tornar-se completamente saudável, em corpo e cérebro, é uma forma de mudança. No entanto, algumas pessoas desejarão mais. Procurarão transformações num nível mais profundo do que a mera saúde e riqueza. Alguns procurarão a realização no mundo do espírito; embora essa busca transcenda o âmbito de uma tecnologia material bruta, as novas possibilidades físicas proporcionarão novos pontos de partida — e tempo suficiente para tentar. A tecnologia subjacente aos sistemas de reparação celular permitirá que as pessoas transformem os seus corpos de formas que vão desde o trivial ao extraordinário, passando pelo bizarro. Tais transformações parecem ter poucos limites evidentes. Algumas pessoas poderão abandonar por completo a forma humana, tal como uma lagarta se transforma para voar; outras poderão conduzir a humanidade comum a uma nova perfeição. Haverá ainda quem simplesmente cure as suas verrugas, ignore as novas borboletas... e vá pescar.

Alguns autores sonharam com viagens no tempo rumo ao passado, mas a natureza parece pouco cooperante nesse domínio³. No entanto, a biostase abre a porta à viagem para o futuro, uma vez que pode fazer com que os anos passem num abrir e fechar de olhos. Os entediados com o presente poderão procurar as novidades

de um futuro mais distante — talvez esperando pelo amadurecimento lento das artes, da sociedade ou pela cartografia dos mundos da galáxia. Se for esse o caso, escolherão o sono: passarão de época em época, à procura de um tempo que lhes convenha. Futuros estranhos permanecem abertos, contendo mundos para além da nossa imaginação.

3. Simplicidade Avançada

E. F. Schumacher, autor de *Small Is Beautiful*, escreveu:

Não tenho dúvidas de que é possível dar uma nova direção ao desenvolvimento tecnológico — uma direção que o reconduza às verdadeiras necessidades do ser humano, o que também significa: *à verdadeira escala do ser humano*. O homem é pequeno, e por isso o pequeno é belo.

Schumacher não se referia à nanotecnologia — mas poderá uma tecnologia tão avançada fazer parte de uma vida mais simples, à escala humana?

Nos tempos pré-históricos, as pessoas utilizavam dois tipos de materiais: os produtos dos processos naturais de larga escala (como a pedra, a água, o ar e o barro), e os produtos da maquinaria molecular natural (como o osso, a madeira, a pele e a lã). Hoje usamos esses mesmos materiais, mas aliados a processos industriais complexos para sustentar os produtos da nossa

civilização industrial global. Se os sistemas tecnológicos cresceram para além da escala humana, a culpa cabe, em grande parte, à tecnologia de larga escala e às máquinas “estúpidas”: para tornar os sistemas complexos, tivemos de os tornar grandes. Para os tornar capazes, tivemos de os preencher com pessoas. O sistema resultante alastra-se agora por continentes, enredando as pessoas numa teia global. Ofereceu uma fuga ao trabalho penoso da agricultura de subsistência, prolongando vidas e gerando riqueza — mas a um custo que alguns consideram demasiado alto.

A nanotecnologia abrirá novas escolhas. Sistemas autorreplicantes serão capazes de fornecer alimentos, cuidados de saúde, abrigo e outras necessidades — sem depender de burocracias ou fábricas gigantescas. Pequenas comunidades autossuficientes poderão colher os seus benefícios.

Um teste à liberdade que uma tecnologia oferece é saber se ela permite às pessoas regressar a modos de vida primitivos. A tecnologia moderna falha neste teste; a tecnologia molecular passa-o. Como caso experimental, imaginemos o regresso a um estilo de vida da Idade da Pedra — mas sem ignorar a tecnologia molecular: usando-a.

Aldeões de estilo neolítico, sem educação moderna, não compreenderiam a maquinaria molecular — mas isso pouco importa. Desde a Antiguidade que os povos utilizam a maquinaria molecular do fermento, das sementes e dos cabritos sem qualquer entendimento a nível molecular. Se criaturas tão complexas e imprevisíveis como cabritos se adaptam a formas de vida

primitivas, então outras formas de maquinaria molecular também poderão servir. Os seres vivos demonstram que a maquinaria interna de um sistema autorreplicante pode ser ignorada — ao contrário do que acontece com a maquinaria de um automóvel. Assim, um grupo humano poderia cultivar "plantas" e "animais" novos para suavizar os rigores da existência, vivendo, no essencial, uma vida semelhante à da Idade da Pedra. Poderiam até restringir-se a plantas e animais comuns, selecionados ao longo de milénios de reprodução seletiva.

Com possibilidades tão amplas, haverá quem continue a preferir viver como hoje: com o ruído do trânsito, os cheiros, o perigo; com dentes estragados e brocas estridentes; com articulações doridas e pele flácida; com alegrias compensadas por medo, esforço e a morte iminente. Mas, a menos que tenham sofrido uma lavagem cerebral para obliterarem o conhecimento de alternativas melhores, quantas pessoas aceitariam de boa vontade uma vida assim? Talvez algumas — mas poucas.

Poderá imaginar-se viver uma vida comum numa colónia espacial? Uma colónia seria grande, complexa e localizada no espaço — mas a Terra também o é: grande, complexa e localizada no espaço. Mundos no espaço poderiam ser tão autossustentáveis como a Terra, e tão vastos como um continente, inundados de luz solar, cheios de ar, contendo um biocilindro (estrutura de suporte de vida) — se não mesmo uma biosfera inteira.

Esses mundos não terão de ser produtos de um projeto humano direto. Por detrás de grande parte da beleza da natureza encontra-

se uma forma peculiar de ordem desordenada. As nervuras de uma folha, os ramos de uma árvore, as formas do relevo — todos contêm uma liberdade de forma dentro de padrões que se assemelham ao que os matemáticos chamam fractais⁴. Terras no espaço não terão de ser modeladas como campos de golfe ou loteamentos suburbanos. Algumas serão moldadas com o auxílio de computadores programados com um conhecimento profundo dos processos naturais, fundindo o propósito humano com uma qualidade natural que nenhuma mente ou mão humana pode produzir diretamente. Montanhas e vales — em terras que se assemelham à natureza selvagem — refletirão as formas de rochas sonhadas e solos sonhados, esculpidos por idades sonhadas de água eletrônica. Mundos no espaço serão mundos.

4. Espaço Suficiente para Sonhos

Esta, então, é a dimensão da promessa do futuro. Embora continuem a existir limites ao crescimento, poderemos colher energia solar um trilião de vezes superior a toda a energia atualmente utilizada pela humanidade. A partir dos recursos do nosso sistema solar, ser-nos-á possível criar uma área de terra um milhão de vezes maior do que a da Terra. Com montadores (assemblers), engenharia automatizada e os recursos do espaço, poderemos adquirir riqueza — em quantidade e qualidade — para além de tudo o que alguma vez se sonhou. Os limites últimos da longevidade permanecerão, mas a tecnologia de reparação celular tornará possível uma saúde perfeita e vidas indefinidamente longas para todos. Estas conquistas trarão também novos instrumentos de

destruição, mas possibilitarão igualmente escudos ativos e sistemas de controlo de armamento capazes de estabilizar a paz.

Resumindo, temos uma oportunidade de futuro com espaço suficiente para muitos mundos e muitas escolhas, e com tempo suficiente para os explorar. Uma tecnologia domada poderá alargar os nossos limites, fazendo com que a forma da tecnologia deixe de apertar e distorcer a forma da humanidade. Num futuro aberto à riqueza, ao espaço e à diversidade, os grupos serão livres para formar praticamente qualquer sociedade que desejem — livres para falhar ou para dar um exemplo brilhante ao mundo. A menos que os seus sonhos exijam que domine todos os outros, é provável que outras pessoas queiram partilhá-los consigo. Se for esse o caso, você e essas pessoas poderão escolher unir-se para moldar um novo mundo. Se um começo promissor falhar — se resolver problemas a mais ou a menos — poderá sempre tentar de novo. O nosso problema hoje não é planejar ou construir utopias, mas encontrar a oportunidade de tentar.

5. Preparativos

Podemos falhar. Montadores replicantes (assemblers) e Inteligência Artificial trarão problemas de complexidade sem precedentes — e ameaçam chegar com uma brusquidão igualmente sem precedentes. Não podemos esperar por um erro fatal para então decidir o que fazer; devemos usar estas novas tecnologias para construir escudos ativos antes que as ameaças se libertem.

Felizmente, as descobertas que se avizinham tornar-se-ão gradualmente mais evidentes. Acabarão por captar a atenção pública, garantindo pelo menos um certo grau de previsão. Mas quanto mais cedo começarmos a planear, melhores serão as nossas hipóteses. O mundo tornar-se-á em breve hospitaleiro a memes (ideias replicáveis) que pretendem descrever políticas sensatas para os avanços dos montadores e da IA. Esses memes espalhar-se-ão e enraizar-se-ão — com ou sem mérito. Teremos melhores hipóteses se, quando esse momento chegar, um conjunto sólido de ideias já tiver sido moldado e começado a difundir-se — a opinião pública e a política terão então mais probabilidade de avançar numa direção sensata à medida que a crise se aproxima. Esta situação torna importante, desde já, o debate cuidadoso e a educação pública. Orientar a tecnologia exigirá também novas instituições — e as instituições não evoluem da noite para o dia. Isto torna urgente o desenvolvimento de fóruns de factos e hiperligações em hipermédia (hipertexto). Se estiverem prontos para serem usados, também crescerão em popularidade à medida que a crise se avizinha.

Apesar do apelo alargado de um futuro aberto, algumas pessoas irão opor-se. Os sedentos de poder, os idealistas intolerantes e alguns poucos misantropos acharão repugnante a perspetiva de liberdade e diversidade. A questão é: serão eles a moldar a política pública? Os governos inevitavelmente subsidiarão, atrasarão, classificarão, gerirão mal ou guiarão os avanços que se aproximam. As democracias cooperantes podem cometer um erro fatal, mas se o fizerem, será provavelmente fruto de confusão pública sobre que políticas terão que consequências.

Haverá oposição genuína a um futuro aberto — baseada em valores e objetivos diferentes (muitas vezes não declarados). Contudo, haverá ainda maiores desacordos sobre propostas específicas, baseados em crenças divergentes sobre factos. E, embora muitos desacordos provenham de diferenças de julgamento, muitos decorrerão, inevitavelmente, da simples ignorância. Mesmo factos sólidos e bem estabelecidos permanecerão, de início, pouco conhecidos.

Pior ainda: a perspetiva de tecnologias tão fundamentais como os montadores, a IA e as máquinas de reparação celular perturbará inevitavelmente muitas ideias antigas e enraizadas de uma só vez. Isso causará conflitos nas mentes das pessoas (sei-o por experiência própria). Em algumas mentes, esses conflitos ativarão o reflexo de rejeição do novo — o mecanismo mental mais básico do sistema imunitário cognitivo da humanidade. Esse reflexo tornará a ignorância resistente.

Ainda pior: a disseminação de meias-verdades causará também danos. Para funcionarem bem, alguns memes têm de estar ligados a outros. Se a ideia de nanotecnologia estivesse dissociada da ideia de perigo, a nanotecnologia tornar-se-ia mais perigosa do que já é. Mas num mundo cada vez mais cauteloso em relação à tecnologia, esta ameaça parece menor. Contudo, outros fragmentos de ideias espalhar-se-ão, semeando mal-entendidos e conflitos.

A ideia do “fórum de factos”, quando discutida sem distinguir entre factos, valores e políticas, parecerá tecnocrática. Escudos ativos, quando propostos sem menção ao hipertexto ou aos fóruns

de factos, parecerão inverosímeis. O perigo e inevitabilidade da nanotecnologia, para quem desconhece os escudos ativos, gerará desespero. O perigo da nanotecnologia, quando a sua inevitabilidade não é compreendida, estimulará esforços locais fúteis para travar o seu avanço global. Escudos ativos, quando não motivados pelos requisitos futuros de controlo da tecnologia molecular, parecerão trabalhosos demais. Se forem chamados “projetos de defesa”, sem distinção entre defesa e ataque, parecerão ameaças à paz.

Do mesmo modo, a ideia de vida longa, quando não acompanhada pela expectativa de abundância e de novas fronteiras, parecerá perversa. A abundância, quando imaginada sem o desenvolvimento espacial ou sem replicadores controlados, parecerá ambientalmente destrutiva. A ideia de biostase, para quem nada sabe sobre reparação celular e confunde morte com dissolução, parecerá absurda.

A menos que sejam mantidas juntas por capas de livros ou por hiperligações em hipertexto, as ideias tenderão a fragmentar-se ao espalharem-se. Precisamos de desenvolver e divulgar uma compreensão do futuro como um todo — um sistema de perigos e oportunidades interligados. Isto exige o esforço de muitas mentes. O incentivo para estudar e divulgar essa informação será forte: os temas são fascinantes e importantes, e muitas pessoas quererão que os seus amigos, famílias e colegas participem na reflexão sobre o que está para vir. Se pressionarmos nas direções certas — aprendendo, ensinando, debatendo, ajustando a rota e pressionando mais — ainda poderemos conduzir a corrida

tecnológica rumo a um futuro com espaço suficiente para os nossos sonhos.

Éons de evolução e milénios de história prepararam este desafio — e apresentaram-no silenciosamente à nossa geração. Os próximos anos trarão o maior ponto de viragem da história da vida na Terra. Conduzir a vida e a civilização por esta transição é a grande tarefa do nosso tempo.

Se formos bem-sucedidos (e se você sobreviver), talvez venha a ser honrado com perguntas intermináveis dos seus bisnetos curiosos:

— “Como era quando eras criança, antes da Grande Descoberta?”

— “Como era envelhecer?”

— “O que pensaste quando soubeste que a Descoberta se aproximava?”

— “E o que fizeste então?”

Pelas suas respostas, contará uma vez mais a história de como o futuro foi conquistado.

Motores da Criação tenta fazer uma revisão do mundo para o qual a tecnologia nos está a levar, e nos anos desde a primeira publicação, a tecnologia avançou muito em direção a esse mundo.

O primeiro capítulo mostra como a engenharia de proteínas, ao criar máquinas moleculares tal como as células vivas o fazem, poderia fornecer um caminho para sistemas mais avançados, mas é cauteloso quanto ao tempo necessário para resolver os problemas mais básicos. Dois anos após a publicação, William DeGrado, na DuPont, reportou o primeiro sucesso sólido no projeto de proteínas de novo (do zero). Atualmente, existe uma revista intitulada *Protein Engineering (Engenharia de Proteínas)*, e um fluxo crescente de resultados. Para além disso, surgiram caminhos adicionais para o mesmo objetivo, baseados em moléculas e métodos diferentes. O Prémio Nobel de Química de 1988 foi atribuído a Cram, Pedersen e Lehn pelo seu trabalho na construção de grandes estruturas moleculares a partir de partes que se automontam. O Prémio Feynman de Nanotecnologia de 1995 foi atribuído a Nadrian Seeman, da Universidade de Nova Iorque, pelo projeto e síntese de estruturas de DNA unidas para formar uma estrutura cúbica. Os químicos começaram a falar de fazer “nanquímica” (química molecular em escala nanométrica). Nos últimos anos, a automontagem molecular emergiu como um campo próprio.

Na secção de notas, *Motores da Criação* menciona a possibilidade de sistemas mecânicos — microscópios de sondagem capazes de

mover pontas afiadas sobre superfícies com precisão atômica — poderem ser usados para posicionar ferramentas moleculares. Desde então, Donald Eigler, na IBM, demonstrou a capacidade de mover átomos de forma vívida e memorável, formando a palavra “IBM” numa superfície usando 35 átomos de xenônio precisamente arranjados. A manipulação atômica também se tornou um campo de investigação em ascensão.

Talvez o indicador mais claro seja linguístico. Quando *Motores da Criação* foi publicado, a palavra “nanotecnologia” era quase desconhecida. Desde então, tornou-se uma palavra em voga na ciência, engenharia, futurologia e ficção. Tanto nas nossas capacidades laboratoriais como nas nossas expectativas, estamos a caminho.

Há até esperança de que possamos aprender a lidar melhor com as nossas tecnologias, desta vez. O capítulo “Rede do Conhecimento” descreve como um meio de publicação em hipertexto poderia acelerar a evolução do conhecimento, e talvez da sabedoria. A *World Wide Web* é um passo importante nessa direção, e os desenvolvedores de software estão a trabalhar para adicionar as capacidades necessárias restantes para ir muito além da mera publicação, para suportar discussão, crítica, deliberação e construção de consensos.

Glossário

Este glossário contém termos utilizados para descrever assuntos relacionados com tecnologia avançada. Foi compilado pelo Grupo de Estudos de Nanotecnologia do MIT, com a colaboração especial de David Darrow, da Universidade de Indiana.

ESCUDO ATIVO: Um sistema defensivo com restrições incorporadas para limitar ou impedir o seu uso ofensivo.

AMINOÁCIDOS: Moléculas orgânicas que são os blocos de construção das proteínas. Existem cerca de duzentos aminoácidos conhecidos, dos quais vinte são muito utilizados nos organismos vivos.

ANTIOXIDANTES: Produtos químicos que protegem contra a oxidação, que provoca ranço nas gorduras e danos no ADN.

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA): Um campo de investigação que visa compreender e construir máquinas inteligentes; este termo também pode referir-se à própria máquina inteligente.

MONTADOR (Assembler): Uma máquina molecular que pode ser programada para construir praticamente qualquer estrutura ou dispositivo molecular a partir de blocos de construção químicos mais simples. Análogo a uma oficina mecânica controlada por computador. (Ver Replicador.)

ÁTOMO: A partícula mais pequena de um elemento químico (cerca de três décimos de bilionésimos de metro de diâmetro). Os átomos

são os blocos de construção das moléculas e dos objetos sólidos; consistem numa nuvem de elétrons em torno de um núcleo denso cem mil vezes mais pequeno que o próprio átomo. As nanomáquinas funcionam com átomos, não com núcleos.

ENGENHARIA AUTOMATIZADA: A utilização de computadores para executar projetos de engenharia, gerando, em última análise, projetos detalhados a partir de especificações amplas, com pouca ou nenhuma ajuda humana. A engenharia automatizada é uma forma especializada de inteligência artificial.

BACTÉRIAS: Organismos vivos unicelulares, tipicamente com cerca de um micrómetro de diâmetro. As bactérias estão entre os tipos de células mais antigas, simples e mais pequenas.

BIOCHAUVINISMO: O preconceito de que os sistemas biológicos têm uma superioridade intrínseca que lhes dará sempre o monopólio da autorreprodução e da inteligência.

BIOSTASE: Condição na qual as estruturas celulares e teciduais de um organismo são preservadas, permitindo a restauração posterior por máquinas de reparação celular.

TECNOLOGIA EM MASSA: Tecnologia baseada na manipulação de átomos e moléculas em massa, em vez de individualmente; a maioria das tecnologias atuais enquadra-se nesta categoria.

CAPILARES: Vasos sanguíneos microscópicos que transportam o sangue oxigenado para os tecidos.

CÉLULA: Unidade delimitada por membrana, tipicamente com micrómetros de diâmetro. Todas as plantas e animais são constituídos

por uma ou mais células (triliões, no caso dos seres humanos). De um modo geral, cada célula de um organismo pluricelular contém um núcleo que contém toda a informação genética do organismo.

MÁQUINA DE REPARAÇÃO CELULAR: Um sistema que inclui nanocomputadores, sensores e ferramentas à escala molecular, programado para reparar danos em células e tecidos.

CHIP: Ver Circuito integrado.

RETICULAÇÃO: Processo que forma ligações químicas entre duas cadeias moleculares separadas.

CRIOBIOLOGIA: A ciência da biologia a baixas temperaturas; a investigação em criobiologia tornou possível a congelação e armazenamento de espermatozoides e sangue para uso posterior.

MALHA CRISTALINA: O padrão tridimensional regular dos átomos num cristal.

PROJETO(DESIGN) AVANÇADO: A utilização de princípios conhecidos da ciência e da engenharia para projetar sistemas que só podem ser construídos com ferramentas ainda não disponíveis; isto permite uma exploração mais rápida das capacidades das novas ferramentas.

DIVERSIDADE DO PROJETO(DESIGN): Uma forma de redundância em que componentes de projeto diferente servem o mesmo propósito; isto pode permitir que os sistemas funcionem corretamente, apesar das falhas de projeto.

DESMONTADOR(DISSASSEMBLER): Um sistema de nanomáquinas capaz de desmontar um objeto, alguns átomos de cada vez, enquanto regista a sua estrutura a nível molecular.

DISSOLUÇÃO: Deterioração num organismo, de tal forma que a sua estrutura original não pode ser determinada a partir do seu estado atual.

ADN (Ácido Desoxirribonucleico): As moléculas de ADN são longas cadeias constituídas por quatro tipos de nucleótidos; a ordem destes nucleótidos codifica a informação necessária para construir moléculas proteicas. Estas, por sua vez, constituem grande parte da maquinaria molecular da célula. O ADN é o material genético das células. (Ver também RNA.)

ENGENHARIA: O uso do conhecimento científico e da tentativa e erro para projetar sistemas. (Ver Ciência.)

ENTROPIA: Uma medida da desordem de um sistema físico.

ENZIMA: Uma proteína que atua como catalisador numa reação bioquímica.

EURISKO: Um programa de computador desenvolvido pelo Professor Douglas Lenat, capaz de aplicar regras heurísticas para realizar diversas tarefas, incluindo a invenção de novas regras heurísticas.

EVOLUÇÃO: Um processo no qual uma população de entidades autorreplicantes sofre variação, com as variantes bem-sucedidas a espalharem-se e a tornarem-se a base para variações futuras.

CRESCIMENTO EXPONENCIAL: Crescimento que ocorre de forma caracterizada por duplicações periódicas.

FÓRUM DE FACTOS: Um procedimento para procurar factos através de um debate estruturado e arbitrado entre especialistas.

RADICAL LIVRE: Uma molécula que contém um eletrão desemparelhado, tipicamente altamente instável e reativa. Os radicais livres podem danificar a maquinaria molecular dos sistemas biológicos, levando à reticulação e à mutação.

PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG: Um princípio da mecânica quântica que tem como consequência que a posição e o momento de um objeto não podem ser determinados com precisão. O princípio de Heisenberg ajuda a determinar o tamanho das nuvens de eletrões e, consequentemente, o tamanho dos átomos.

HEURÍSTICA: Regras práticas utilizadas para orientar alguém na direção de soluções prováveis para um problema.

HIPERTEXTO: Um sistema baseado em computador para ligar texto e outras informações com referências cruzadas, tornando o acesso rápido e as críticas fáceis de publicar e encontrar.

CIRCUITO INTEGRADO (CI): Um circuito eletrónico que consiste em muitos dispositivos interligados numa única peça semicondutora, normalmente com 10 milímetros de lado. Os CI são os principais blocos de construção dos computadores atuais.

ÍON: Um átomo com mais ou menos eletrões do que os necessários para anular a carga eletrónica do núcleo. Um ião é um átomo com carga elétrica líquida.

KEVLAR(TM): Uma fibra sintética fabricada pela E. I. du Pont de Nemours & Co., Inc. Mais resistente do que a maioria dos aços, o Kevlar está entre os materiais mais resistentes disponíveis comercialmente e é utilizado na construção aeroespacial, coletes à prova de bala e outras aplicações que exigem uma elevada relação resistência-peso.

LIGHTSAIL: Um sistema de propulsão de uma nave espacial que ganha impulso a partir da pressão da luz que atinge uma fina película metálica.

MONTADOR LIMITADO: Um montador com limites incorporados que restringem a sua utilização (por exemplo, para dificultar ou impossibilitar utilizações perigosas, ou para construir apenas uma coisa).

MEME: Uma ideia que, tal como um gene, se pode replicar e evoluir. Exemplos de memes (e sistemas de memes) incluem teorias políticas, religiões proselitistas e a própria ideia de memes.

TECNOLOGIA MOLECULAR: Ver Nanotecnologia.

MOLÉCULA: A mais pequena partícula de uma substância química; tipicamente um grupo de átomos unidos num padrão específico, por ligações químicas.

MUTAÇÃO: Uma modificação hereditária numa molécula genética, como o ADN. As mutações podem ser boas, más ou neutras nos seus efeitos sobre um organismo; a competição elimina as más, deixando as boas e as neutras.

NANO-: Prefixo que significa dez elevado à nona potência, ou um bilionésimo.

NANOCOMPUTADOR: Um computador constituído por componentes (mecânicos, eletrónicos ou outros) à escala nanométrica.

NANOTECNOLOGIA: Tecnologia baseada na manipulação de átomos e moléculas individuais para construir estruturas com especificações atómicas complexas.

SIMULAÇÃO NEURAL: Imitação das funções de um sistema neural — como o cérebro — simulando a função de cada célula.

NEURÓNIO: Uma célula nervosa, como as que se encontram no cérebro.

NUCLEOTÍDEO: Uma pequena molécula constituída por três partes: uma base azotada (uma purina ou pirimidina), um açúcar (ribose ou desoxirribose) e fosfato. Os nucleótidos servem como blocos de construção dos ácidos nucleicos (ADN e ARN).

NÚCLEO: Em biologia, uma estrutura em células avançadas que contém os cromossomas e o aparelho para transcrever o ADN em ARN. Em física, o núcleo pequeno e denso de um átomo.

MOLÉCULA ORGÂNICA: Uma molécula que contém carbono; as moléculas complexas nos sistemas vivos são todas moléculas orgânicas neste sentido.

POLÍMERO: Uma molécula constituída por unidades mais pequenas ligadas para formar uma cadeia.

SOMA POSITIVA: Um termo utilizado para descrever uma situação em que uma ou mais entidades podem ganhar sem que outras entidades sofram uma perda igual — por exemplo, uma economia em crescimento. (Ver Soma Zero.)

REDUNDÂNCIA: A utilização de mais componentes do que os necessários para executar uma função; isto pode permitir que um sistema opere corretamente apesar da falha de componentes.

REPLICADOR: Nas discussões sobre evolução, um replicador é uma entidade (como um gene, um meme ou o conteúdo de um disco de memória de computador) que pode ser copiada, incluindo quaisquer alterações que possa ter sofrido. Num sentido mais amplo, um replicador é um sistema que pode fazer uma cópia de si próprio, não copiando necessariamente quaisquer alterações que possa ter sofrido. Os genes de um coelho são replicadores no primeiro sentido (uma alteração num gene pode ser herdada); o próprio coelho é um replicador apenas no segundo sentido (um entalhe feito na sua orelha não pode ser herdado).

ENZIMA DE RESTRIÇÃO: Enzima que corta o ADN num local específico, permitindo aos biólogos inserir ou remover material genético.

RIBONUCLEASE: Enzima que corta as moléculas de RNA em pedaços mais pequenos.

RIBOSSOMA: Máquina molecular, existente em todas as células, que constrói moléculas proteicas de acordo com instruções lidas a

partir de moléculas de RNA. Os ribossomas são estruturas complexas constituídas por moléculas proteicas e de RNA.

RNA: Ácido ribonucleico; uma molécula semelhante ao ADN. Nas células, a informação do ADN é transcrita para o ARN, que por sua vez é "lido" para direccionar a construção das proteínas. Alguns vírus utilizam o RNA como material genético.

CIÊNCIA: O processo de desenvolvimento de um conhecimento sistematizado do mundo através da variação e do teste de hipóteses. (Ver Engenharia.)

TRIBUNAL DA CIÊNCIA: Nome (originalmente aplicado pelos meios de comunicação social) para um fórum de factos conduzido pelo governo.

LABORATÓRIO DE MONTADORES SELADO: Um espaço de trabalho contendo montadores, encapsulado de forma a permitir o fluxo de informação, mas não permitindo a fuga dos montadores ou dos seus produtos.

SINAPSE: Estrutura que transmite sinais de um neurónio para um neurónio adjacente (ou outra célula).

VÍRUS: Um pequeno replicador que consiste em pouco mais do que um pacote de ADN ou ARN que, quando injetado numa célula hospedeira, pode direccionar a maquinaria molecular da célula para produzir mais vírus.

SOMA ZERO: Termo utilizado para descrever uma situação em que uma entidade só pode ganhar se outras entidades sofrerem uma perda igual; por exemplo, um jogo de póquer privado. (Ver Soma Positiva.)

Notas e Referências

Capítulo 1

¹ As ideias neste capítulo baseiam-se em argumentos técnicos apresentados no meu artigo "Engenharia Molecular: Uma Abordagem para o Desenvolvimento de Capacidades Gerais para Manipulação Molecular" (Proceedings of the National Academy of Sciences (USA), Vol. 78, pp. 5275-78, 1981), que apresenta um caso para a viabilidade de projetar moléculas de proteína e desenvolver sistemas de uso geral para direcionar a montagem molecular.

² Ver "Engenharia de proteínas", de Kevin Ulmer (Science, vol. 219, pp. 666-71, 11 de fevereiro de 1983). O Dr. Ulmer é atualmente o diretor do Centro de Investigação Avançada em Biotecnologia.

³ The American Heritage Dictionary of the English Language, editado por William Morris (Boston: Houghton Mifflin, 1978).

⁴ Ver "Gene Machines: The Second Wave", de Jonathan B. Tucker (High Technology, pp. 50-59, Março de 1984).

⁵ Ver Capítulo 27 de Bioquímica, de Albert L. Lehninger (Nova Iorque: Worth Publishers, 1975). Este livro de texto padrão é uma excelente fonte de informação sobre a maquinaria molecular da vida. Para uma discussão sobre o motor flagelar bacteriano, ver "Ion Transport and the Rotation of Bacterial Flagella", de P. Lauger (Nature, Vol. 268, pp. 360-362, 28 de julho de 1977).

⁶ Para uma descrição da automontagem molecular, incluindo a do fago T4 e do ribossoma, ver o Capítulo 36 de Lehninger's Biochemistry (referenciado acima).

⁷ A natureza demonstrou uma vasta gama de máquinas proteicas, mas isso não nos limitará a desenhar com proteínas. Para exemplos de estruturas não proteicas bastante complexas, ver "Supramolecular Chemistry: Receptors, Catalysts, and Carriers", de Jean-Marie Lehn (Science, Vol. 227, pp. 849-56, 22 de fevereiro de 1985), que também fala sobre o projeto de "componentes, circuitos e sistemas para o tratamento de sinais e informação a nível molecular".

⁸ As técnicas modernas podem sintetizar qualquer sequência de ADN desejada, que pode ser utilizada para direcionar os ribossomos para produzir qualquer sequência de aminoácidos desejada. Adicionar um grupo prostético é outra questão, no entanto.

⁹ Para uma comparação entre a tarefa de prever estruturas de proteínas naturais e a de conceber estruturas previsíveis, ver "Engenharia Molecular", referenciado no início desta secção.

¹⁰ Ver "Tecnologia Molecular: Designing proteins and Peptides", de Carl Pabo (*Nature*, Vol. 301, p. 200, 20 de janeiro de 1983).

¹¹ Consulte "Design, Synthesis, and Characterization of a 34-Residue Polypeptide That Interacts with Nucleic Acids", de B. Gutte et al. (*Nature*, Vol. 281, pp. 650-55, 25 de Outubro de 1979).

¹² Para uma referência a esta e uma discussão geral sobre a engenharia de proteínas, ver o artigo de Kevin Ulmer (referenciado perto do início desta secção).

¹³ Ver "Um Grande Aumento da Afinidade Enzima-Substrato pela Engenharia de Proteínas", de Anthony J. Wilkinson et al. (*Nature*, Vol. 307, pp. 187-188, 12 de janeiro de 1984). Foram também utilizadas técnicas de engenharia genética para tornar uma enzima mais estável, sem perda de atividade. Ver "Ligação Dissulfeto Projetada na Lisozima T4: Estabilização da Proteína em Direção à Inativação Térmica", de L. Jeanne Perry e Ronald Weutzel, da Genentech, Inc. (*Science*, Vol. 226, pp. 555-57, 2 de novembro de 1984).

¹⁴ in *Nature and Man's Fate* (Nova Iorque: New American Library, 1959), p. 283

¹⁵ Ver "Biological Frontiers", de Frederick J. Blattner (*Science*, vol. 222, pp. 719-720, 18 de novembro de 1983).

¹⁶ Ver *Enzyme Engineering*, de William H. Rastetter (*Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 8, pp. 423-436, 1983). Este artigo de revisão descreve vários esforços bem-sucedidos para alterar a especificidade do substrato das enzimas.

¹⁷ Para os atas do primeiro, ver *Molecular Electronic Devices*, editado por Forrest L. Carter (Nova Iorque: Marcel Dekker, 1982). Os atas do segundo aparecem em *Molecular Electronic Devices II*, também editado por Forrest L. Carter (Nova Iorque: Marcel Dekker, 1986). Para um artigo de resumo, ver "Molecular Level Fabrication Techniques and Molecular Electronic Devices", de Forrest L. Carter (*Journal of Vacuum Science and Technology*, B1(4), pp. 953-68, out.-dez. 1983).

¹⁸ Ver *The Institute* (uma publicação do IEEE), janeiro de 1984, p. 1.

¹⁹ Reportado em *Microelectronic Manufacturing and Testing*, Set. 1984, p. 49

²⁰ A força de uma ligação simples entre dois átomos de carbono é de cerca de seis nanonewtons, o suficiente para suportar o peso de cerca de 30.000 trilhões de átomos de carbono. Ver *Sólidos Fortes*, de A. Kelly, p. 12 (Oxford: Clarendon Press, 1973).

²¹ O diamante é também mais de dez vezes mais rígido que o alumínio. Ver *Sólidos Fortes* (referenciado acima), Anexo A, Tabela 2.

²² Ver "Sculpting Horizons in Organic Chemistry", de Barry M. Trost (*Science*, Vol. 227, pp. 908-16, 22 de fevereiro de 1985), que também menciona os condutores elétricos orgânicos e a promessa de interruptores moleculares para a eletrônica molecular.

²³ Os químicos já estão a desenvolver catalisadores que melhoram as enzimas; Ver "Catalysts That Break Nature's Monopoly", de Thomas H. Maugh II (*Science*, vol. 221, pp. 351-354, 22 de julho de 1983). Para mais informações sobre ferramentas moleculares não proteicas, ver "Artificial Enzymes", de Ronald Breslow (*Science*, vol. 218, pp. 532-537, 5 de novembro de 1982).

²⁴ Ver a primeira referência nesta seção. Um dispositivo relatado em 1982, chamado microscópio de tunelamento de varrimento, pode posicionar uma agulha afiada perto de uma superfície com uma precisão de uma fração de um diâmetro atômico. Para além de demonstrar a viabilidade deste posicionamento, pode ser capaz de substituir a maquinaria molecular no posicionamento de ferramentas moleculares. Ver "Scanning Tunneling Microscopy", de G. Binnig e H. Rohrer (*Physica* 127B, pp 37-45, 1985).

²⁵ Os montadores serão capazes de criar arranjos de moléculas reagentes que, de outra forma, seriam improváveis (superando os fatores de entropia de ativação) e serão capazes de direcionar a ação de espécies químicas altamente reativas. Isto permitirá a utilização em síntese controlada de reações que, de outra forma, ocorreriam apenas a uma taxa insignificante ou com um número e uma taxa excessivos de reações colaterais. Além disso, os montadores serão capazes de aplicar forças mecânicas de magnitude capaz de romper ligações para fornecer energia de ativação às reações, e poderão empregar condutores à escala molecular ligados a fontes de voltagem para manipular campos elétricos de forma direta e inovadora. Embora as técnicas fotoquímicas não sejam tão úteis (porque os comprimentos de onda típicos dos fótons são grandes à escala molecular), resultados semelhantes podem, por vezes, ser alcançados pela transferência de excitação eletrônica de molécula para molécula de forma controlada e localizada.

Embora os montadores sejam poderosos (e possam até ser orientados para expandir os seus próprios kits de ferramentas montando novas ferramentas), não serão capazes de construir tudo o que poderia existir. Por exemplo, pode ser concebida uma estrutura delicada que, tal como um arco de pedra, se autodestruiria a menos que todas as suas peças já estivessem no lugar. Se não houvesse espaço no projeto para a colocação e remoção de um andaime, a estrutura poderia ser impossível de construir. Poucas estruturas de interesse prático parecem propensas a apresentar tal problema, no entanto. (De facto, a reversibilidade das leis que governam o movimento molecular implica que todos os objetos destrutíveis são, em princípio, construíveis; mas se todos os mecanismos de destruição envolverem um colapso explosivo, então as tentativas de construção

através do mecanismo inverso podem ter uma hipótese insignificante de sucesso, devido a considerações que envolvem a incerteza das trajetórias das partes recebidas e a baixa entropia do estado alvo.)

²⁶ Ver "Comparative Rates of Spontaneous Mutation", de John W. Drake (Nature, vol. 221, p. 1132, 22 de março de 1969). Para uma discussão geral deste mecanismo, ver o Capítulo 32 de Bioquímica de Lehninger (referenciado acima).

²⁷ A bactéria *Micrococcus radiodurans* possui mecanismos vigorosos de reparação molecular que lhe permite sobreviver ao equivalente a mais de um milhão de anos de radiação terrestre de fundo normal, aplicada numa única dose. (Ver "Inibição da Síntese de ADN de Reparação em *M. radiodurans* após Irradiação com Raios Gama", de Shigeru Kitayama e Akira Matsuyama, em Agricultura e Química Biológica, vol. 43, pp. 229-305, 1979.) Isto é cerca de mil vezes a dose de radiação letal para os humanos, e suficiente para tornar o Teflon fraco e quebradiço.

²⁸ Os organismos vivos construíram estruturas celulares e dispositivos moleculares simples a partir de lípidos e açúcares (e construíram conchas de sílica e cal), mas a falta de sistemas de montagem programáveis para estes materiais impediu que a vida os explorasse para formar as partes principais de máquinas moleculares complexas. O RNA, tal como as proteínas, tem uma estrutura diretamente determinada pelo ADN e, por vezes, desempenha funções semelhantes às das proteínas. Ver "First True RNA Catalyst Found" (Science, vol. 223, p. 266, 20 de janeiro de 1984).

²⁹ Ver Bioquímica de Lehninger. p. 119

³⁰ Ver o Capítulo 2 de Bit by Bit An Illustrated History of Computers, de Stan Augarten (Nova Iorque: Ticknor & Fields, 1984).

³¹ Se forem utilizados dois grupos laterais diferentes num polímero semelhante ao polietileno para representar os uns e os zeros do código binário, o polímero pode servir como uma fita de armazenamento de dados. Se, por exemplo, o flúor e o hidrogénio fossem utilizados como os dois grupos laterais, e fosse deixado um espaço considerável para os mecanismos de leitura, escrita e manuseamento da fita, meio micrometro cúbico armazenaria cerca de mil milhões de bytes. Os tempos de acesso podem ser mantidos na gama dos microssegundos porque as fitas podem ser muito curtas. Um esquema mecânico de memória de acesso aleatório permite o armazenamento de apenas cerca de 10 milhões de bytes no mesmo volume, embora isto possa provavelmente ser melhorado. Para uma discussão mais detalhada, ver "Molecular Machinery and Molecular Electronic Devices", de K. Eric Drexler, in Molecular Electronic Devices II, editado por Forrest L. Carter (Nova Iorque: Marcel Dekker, 1986).

³² Estes poderiam ser enviados empurrando e puxando barras de carbyne, uma forma de carbono cujos átomos estão ligados em linha reta por ligações simples e triplas alternadas, do tamanho de um átomo. Ver "Maquinaria Molecular e Dispositivos Eletrónicos Moleculares".

³³ Ver o seu artigo "Quantum Mechanical Computers" (Optics News, Vol. 11, pp. 11-20, fev. 1985). Feynman conclui que "as leis da física não representam qualquer barreira à redução do tamanho dos computadores até que os bits tenham o tamanho de átomos e o comportamento quântico tenha domínio".

³⁴ Haverá também limites para os desmontadores: por exemplo, pode-se presumivelmente conceber uma estrutura sensível que se desfaria (ou explodiria) quando adulterada, impedindo a desmontagem controlada.

Capítulo 2

¹ Ver The Sciences of the Artificial (Segunda Edição), de Herbert A. Simon (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1981). Este livro explora uma série de questões relacionadas com a engenharia, a resolução de problemas, a economia e a inteligência artificial.

² Devido às regras de emparelhamento de nucleótidos, as cópias assemelham-se realmente a negativos fotográficos, e apenas uma cópia de uma cópia corresponde ao original.

³ Uma discussão do seu trabalho nesta área aparece em "The Origin of Genetic Information", de Manfred Eigen et al. (Scientific American, Vol. 244, pp. 88-117, abril 1981).

⁴ Richard Dawkins discute os replicadores em *O Gene Egoísta* (Nova Iorque: Oxford University Press, 1976). Este livro de fácil leitura oferece uma excelente introdução aos conceitos modernos de evolução, com foco nos replicadores da linha germinal como as unidades que sofrem variação e seleção na evolução.

⁵ Em *O Gene Egoísta*

⁶ *A Origem das Espécies*, by Charles R. Darwin (London: Charles Murray, 1859).

⁷ Veja a p. 59 de *The Constitution of Liberty*, de Friedrich A. Hayek (Chicago: University of Chicago Press, 1960) para uma discussão dos trabalhos anteriores sobre a evolução linguística, institucional e até biológica, que aparentemente desenvolveram "o aparato conceptual empregado por Darwin". Veja também a p. 23 de *Law, Legislation and Liberty*, Vol. 1, *Rules and Order* (Chicago: University of Chicago Press, 1973). Noutras partes, estes livros discutem o conceito de liberdade perante a lei e a distinção crucial entre uma lei e uma ordem. Estes pontos serão importantes para os assuntos discutidos nos Capítulos 11 e 12.

⁸ Em *O Gene Egoísta*.

⁹ Editado por Stewart Brand (Sausalito, Califórnia: POINT: distribuído por Random House, Nova Iorque, 1980).

¹⁰ Ver *Em Busca da Excelência*. Lições das Corporações Mais Bem Administradas da América, de Thomas J. Peters e Robert H. Waterman Jr. (Nova Iorque: Warner Books, 1982).

¹¹ Em *Ciência e o Mundo Moderno* (Nova Iorque: Macmillan Company, 1925).

¹² Mas convertê-los em bons gráficos e vídeos de computador ajudará muito.

¹³ Meme — é um meme que foi lançado no último capítulo de *O Gene Egoísta*.

¹⁴ Em *A Evolução da Cooperação* (Nova Iorque: Basic Books, 1984), o politólogo Robert Axelrod utiliza um jogo de computador multifacetado e exemplos históricos para explorar as condições necessárias para que a cooperação evolua entre entidades egoístas. Ser bondoso, retaliador e perdoador é importante para o desenvolvimento de uma cooperação estável. O Capítulo 7 deste valioso livro aborda "Como Promover a Cooperação".

¹⁵ *O Fenótipo Estendido* por Richard Dawkins (São Francisco: W. H. Freeman, 1982).

¹⁶ Ver *A autodestruição dos Xosás*, Elias Canetti, *Crowds and Power* (Nova Iorque: Continuum, 1973), p. 193.

Capítulo 3

¹ De *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, de Sir Karl Popper (Nova Iorque: Basic Books, 1962).

² "Há muito espaço no fundo", reimpresso em *Miniaturization*, editado por H. D. Gilbert (Nova Iorque: Reinhold, 1961).

³ Citado por Karl Popper em *Conhecimento Objetivo: Uma Abordagem Evolutiva* (Oxford: Clarendon Press, 1972).

⁴ As ideias que evoluíram para parecer verdadeiras (pelo menos para mentes acríticas) podem, na verdade, ser bastante falsas. Uma excelente obra que compara o julgamento humano ingênuo ao julgamento auxiliado por técnicas científicas e estatísticas é "Human Inference", um livro de Richard Nisbett e Lee Ross na Century Psychology Series (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1980). Mostra que, tal como sofremos de ilusões de ótica e de pontos cegos, também sofremos de ilusões cognitivas e de pontos cegos. Outras experiências mostram que as pessoas incultas partilham mal-entendidos sistemáticos sobre factos elementares como a direção que uma bola se moverá quando girada em círculo e depois lançada; filósofos medievais eruditos (que negligenciaram testar as suas ideias contra a realidade) desenvolveram sistemas inteiros de "ciência" baseados em mal-entendidos idênticos. Ver "Intuitive Physics", de Michael McClosky (Scientific American, vol. 248, pp. 122-30, abril de 1983).

⁵ Em rigor, isto aplica-se apenas aos sobreviventes que são, eles próprios, teorias gerais e uniformes. A teoria de que todas as rochas cairão para cima na próxima quarta-feira não foi refutada (e teria consequências práticas), mas a referência especial à quarta-feira torna-a não uniforme.

⁶ Ver o seu livro *Logic of Scientific Discovery*, pp. 124 e 419 (Nova Iorque: Harper & Row, 1965). Ver também *Objective Knowledge*, p. 15.

⁷ In *Technology Development* (Science, Vol. 220, pp. 576-80, May 6, 1983).

⁸ Só eram claras a baixas velocidades; embora Leonardo tivesse certamente algum sentido intuitivo de dinâmica, uma descrição da dinâmica adequada para prever o comportamento de peças de máquinas de movimento rápido e de alta aceleração só surgiu com Newton.

⁹ A familiaridade com o progresso constante na tecnologia de fabrico de chips levou algumas empresas a conceber microprocessadores cujo fabrico exigia técnicas não disponíveis na altura do projeto.

¹⁰ Para o fazer bem, será necessária a simulação de sistemas moleculares. Uma discussão sobre um sistema para simulação molecular aparece na tese de doutoramento de Robert Brucoleri, "Macromolecular Mechanics and Protein Folding" (Universidade de Harvard, maio de 1984). Para os resultados de uma simulação, ver "Dynamics and Conformational Energetics of a Peptide Hormone: Vasopressin", de A. T. Hagler et al. (Science, vol. 227, pp. 1309-15, 15 de março de 1985). Ambas as referências descrevem simulações clássicas, que descrevem como as moléculas se movem em resposta a forças; tais simulações serão adequadas para a maioria das partes de uma máquina molecular típica. Outros trabalhos requerem simulações mecânicas quânticas mais fundamentais (e mais dispendiosas), que descrevem a distribuição de eletrões nas moléculas. Estes cálculos serão necessários para descrever a formação e a quebra de ligações por ferramentas de montagem. Para uma discussão sobre simulações moleculares que incluem cálculos de mecânica quântica da formação de ligações, ver "Theoretical Chemistry Comes Alive: Full Partner with Experiment", de William H. Goddard III (Science, vol. 227, pp. 912-923, 22 de fevereiro de 1985). Ver também Lecture Notes in Chemistry, 19, Computational Aspects for Large Chemical Systems, de Enrico Clementi (Nova Iorque: Springer-Verlag, 1980). Finalmente, para uma discussão sobre as ferramentas de projeto atuais, ver "Designing Molecules by Computer", de Jonathan B. Tucker (High Technology, pp. 52-59, janeiro de 1984). Os computadores de processamento paralelo auxiliarão significativamente a química computacional e o projeto assistido por computador.

¹¹ Os primeiros esforços de *projeto antecipado* parecem provavelmente visar a definição de um sistema montador viável; não tem de ser ideal, desde que tenha capacidades bastante amplas. Uma vez que as capacidades deste projeto de montador padrão estejam razoavelmente bem especificadas — mesmo antes de o projeto estar completo — será possível (1) começar a desenvolver uma biblioteca de projetos de nanomáquinas adequados para construção por este montador padrão (ou por montadores que o montador padrão poderia construir) e (2) preparar uma biblioteca correspondente de procedimentos para a montagem desses projetos. Depois, quando o primeiro montador rudimentar for desenvolvido, poderá ser utilizado (talvez através de uma fase intermédia de construção de ferramentas) para construir um montador padrão. Este, por sua vez, poderá ser utilizado para construir qualquer coisa na biblioteca de projeto. Os primeiros montadores irão ampliar significativamente a nossa capacidade de fabricar coisas. Mesmo com um *projeto antecipado* limitado, o advento dos montadores resultará quase imediatamente em saltos substanciais na qualidade do hardware. Uma vez que os montadores serão construídos por montadores, alguma forma de sistema autorreplicante será uma consequência natural imediata do *projeto antecipado* e do avanço do montador. Consequentemente, o advento dos montadores pode possibilitar não só um salto na qualidade do hardware, mas também a produção em massa quase imediata desse hardware em quantidades sem precedentes (ver Capítulo 4). Para o bem e para o mal, isto possibilitará uma mudança abrupta e invulgar na tecnologia, na economia e nos assuntos mundiais.

Capítulo 4

¹ From Scientific Quotations: The Harvest of a Quiet Eye, selected by A. L. Mackay, edited by M. Ebison (New York: Crane, Russak, 1977).

² O antigo administrador da NASA, Robert Frosch, disse praticamente a mesma coisa na Convocação Técnica do Centenário do IEEE (ver The Institute, p. 6, dezembro de 1984).

³ Num sentido evolutivo, os genes de um animal são replicadores, mas o animal em si não o é; apenas as alterações nos genes, e não as alterações no corpo do animal, são replicadas nas gerações seguintes. Esta distinção entre replicadores genéticos e os sistemas que moldam é essencial para a compreensão da evolução, mas a utilização do termo "replicador" para se referir a todo o sistema é mais conveniente quando se discutem os sistemas replicantes como ativos produtivos.

⁴ Ver "Production: A Dynamic Challenge", de M. E. Merchant (IEEE Spectrum, pp. 36-39, maio de 1983). Esta edição do IEEE Spectrum contém uma extensa discussão sobre a automatização baseada em computadores.

⁵ A organização em estilo celular, no entanto, apresenta vantagens. Por exemplo, apesar dos vários mecanismos de transporte ativo, as células transportam normalmente componentes moleculares por difusão, em vez de transportadores. Este liga eficazmente todas as máquinas (no mesmo compartimento de membrana) de forma robusta; transportadores, por outro lado, podem avariar, exigindo reparação ou substituição. Mas pode ser que o transporte baseado em transportadores implementado adequadamente tenha fortes vantagens e, ainda assim, não tenha evoluído. Os sistemas baseados em transportadores seriam mais difíceis de evoluir porque exigem que uma nova máquina molecular tenha uma localização, orientação e interface adequadas com o transportador antes de poder funcionar. Se não cumprisse qualquer um destes requisitos, seria inútil, e as pressões seletivas geralmente eliminá-la-iam antes que uma variante útil tivesse a oportunidade de aparecer. Para que uma nova máquina molecular funcione num sistema baseado em difusão, no entanto, apenas necessita de estar presente. Se fizer algo útil, a seleção irá favorecê-la imediatamente.

⁶ Ver *Biochemistry* de Albert L. Lehninger, p. 208 (nas referências do Capítulo 1). Além disso, cada molécula da enzima catalase pode decompor 40 milhões de moléculas de peróxido de hidrogénio por segundo; ver *Enzyme Structure and Mechanism*, de Alan Fersht, p. 132 (São Francisco: W. H. Freeman & Co., 1977). Nas reações enzimáticas típicas, as moléculas devem posicionar-se em relação às "ferramentas" da enzima, aguardar que vibrações térmicas aleatórias provoquem uma reação e, em seguida, afastar-se novamente. Estas etapas ocupam quase todo o tempo da enzima; o tempo necessário para formar ou quebrar uma ligação é muito menor. Como os eletrões de uma ligação são mais de mil vezes mais leves e móveis do que os núcleos que definem as posições atómicas, o movimento mais lento de átomos inteiros define o ritmo. A velocidade típica dos átomos sob agitação térmica a temperaturas normais é superior a 100 metros por segundo, e a distância que um átomo necessita de percorrer para formar ou quebrar uma ligação é tipicamente de cerca de um décimo de bilionésimo de metro, pelo que o tempo necessário é de cerca de um trilionésimo de segundo. Ver o Capítulo 12 de "Molecular Thermodynamics", de John H. Knox (Nova Iorque: Wiley-Interscience, 1971).

⁷ Esta relação de escala pode ser verificada observando (1) que as perturbações mecânicas viajam à velocidade do som (chegando a metade do tempo se viajarem metade da distância) e (2) que, para uma tensão constante no material do braço, reduzir o comprimento do braço (e, portanto, a massa por unidade de secção transversal) para metade duplica a aceleração na ponta, enquanto reduz para metade a distância percorrida pela ponta, o que permite que a ponta se mova para a frente e para trás em metade do tempo (uma vez que o tempo necessário para um movimento é a raiz quadrada de uma quantidade proporcional à distância percorrida dividida pela aceleração).

⁸ Dependendo da inteligência (ou falta de inteligência) do esquema de codificação, a fita pode ter mais massa do que o resto do sistema junto. Mas, como a duplicação da fita é uma função simples e especializada, não tem de ser executada pelo próprio montador.

⁹ devido a raras flutuações no ruído térmico e a danos por radiação durante o processo de montagem. Os montadores de alta fiabilidade incluirão um sistema de controlo de qualidade para identificar variações indesejadas na estrutura. Este sistema pode consistir num braço sensor utilizado para sondar a superfície da peça de trabalho para identificar as saliências ou cavidades não planeadas que marcariam um erro recente. As omissões (tipicamente mostradas por cavidades) podem ser corrigidas adicionando os átomos omitidos. Os grupos mal posicionados (tipicamente mostrados por saliências) podem ser corrigidos ajustando o braço do montador com ferramentas para remover os átomos mal posicionados. Em alternativa, uma pequena peça de trabalho pode ser simplesmente concluída e testada. Os erros podem então ser descartados antes de terem a possibilidade de serem incorporados num sistema maior e mais valioso. Estas etapas de controlo de qualidade irão atrasar um pouco o processo de montagem.

¹⁰ Consulte as notas do Capítulo 6.

¹ Citado da Business Week, 8 de março de 1982.

² Ver "Why the Law of Effect Will Not Go Away", em Daniel C. Dennett, *Brainstorms: Philosophical Essays on Mind and Psychology* (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1981). Este livro explora uma série de questões interessantes, incluindo a evolução e a inteligência artificial.

³ Veja-se o seu livro *The Society of Mind* (Nova Iorque: Simon & Schuster, a publicar em 1986). Tive a oportunidade de rever grande parte desta obra sob a forma de manuscrito; oferece valiosas revelações sobre o pensamento, a linguagem, a memória, a psicologia do desenvolvimento e a consciência — e sobre a forma como estes se relacionam entre si e com a inteligência artificial.

⁴ American Heritage Dictionary, editado por William Morris (Boston: Houghton Mifflin Company, 1978).

⁵ Ver Bit by Bit, nas referências do Capítulo 1.

⁶ editado por Avron Barr e Edward A. Feigenbaum (Los Altos, Califórnia: W. Kaufmann, 1982).

⁷ Ver "The Turing Test: A Coffeehouse Conversation" em *The Mind's I*, composto e arranjado por Douglas R. Hofstadter e Daniel C. Dennett (Nova Iorque: Basic Books, 1981).

⁸ Como diz o engenheiro de software Mark Miller: "Por que é que as pessoas devem ser capazes de gerar inteligência no quarto, mas não no laboratório?"

⁹ De "Computing Machinery and Intelligence", por Alan M. Turing (*Mind*, Vol. 59, No. 236, 1950); excerto em *The Mind's I* (referenciado acima).

¹⁰ As capacidades sociais e técnicas podem advir de uma base comum ou de subsistemas interligados; os limites podem facilmente confundir-se. Ainda assim, sistemas específicos de IA podem claramente merecer um nome ou outro. Os esforços para tornar os sistemas técnicos de IA o mais úteis possível envolverão inevitavelmente esforços para os fazer compreender o discurso e os desejos humanos.

¹¹ Os sistemas avançados de IA social apresentam perigos óbvios. Um sistema capaz de passar o teste de Turing teria de ser capaz de planejar e definir objetivos como um ser humano faria — ou seja, teria de ser capaz de tramar e esquematizar, talvez persuadir as pessoas a darem-lhe ainda mais informação e competências. As pessoas inteligentes já causaram grandes danos apenas com palavras, e um sistema que passasse o teste de Turing seria necessariamente concebido para compreender e enganar as pessoas (e não teria necessariamente de estar imbuído de padrões éticos rigorosos, embora possa estar). O Capítulo 11 discute o problema de como viver com sistemas de IA avançados e como construir sistemas de IA dignos de confiança.

¹² Ver a referência anterior ao artigo de Turing, "Computing Machinery and Intelligence".

¹³ e por ele descrito numa série de artigos sobre "The Nature of Heuristics" (*Artificial Intelligence*, Vol. 19, pp. 189-249, 1982; Vol. 21, pp. 31-59 e 61-98, 1983; Vol. 23, pp. 269-93, 1984).

¹⁴ Ver referência anterior, Vol. 21, pp. 73-83.

¹⁵ Lenat considera que o mais grave é a capacidade limitada da EURISKO para desenvolver novas representações para novas informações.

¹⁶ Ver "The 'Star Wars' Defense Won't Compute", por Jonathan Jacky (*The Atlantic*, vol. 255, pp. 18-30, Junho de 1985).

¹⁷ Ver "The 'Star Wars' Defense Won't Compute", por Jonathan Jacky (*The Atlantic*, vol. 255, pp. 18-30, Junho de 1985).

¹⁸ Ver "Designing the Next Generation", de Paul Wallich (*IEEE Spectrum*, pp. 73-77, Novembro de 1983).

¹⁹ Hubert Dreyfus, no seu conhecido livro "What Computers Can't Do: The Limits of Artificial Intelligence" (Nova Iorque: Harper & Row, 1979), apresenta um argumento filosófico vagamente fundamentado de que os computadores digitais nunca poderão ser programados para realizar toda a gama de atividades intelectuais humanas. Mesmo que se aceitasse os seus argumentos, isso não afetaria as principais conclusões que tiro sobre o futuro da IA: a automatização dos projetos de engenharia não está sujeita aos seus argumentos porque não requer o que ele considera ser inteligência genuína; duplicar a mente humana através da simulação neural evita (e enfraquece) os seus argumentos filosóficos quando se lida com processos mentais a um nível em que esses argumentos não se aplicam.

²⁰ Ver Capítulo 7.

²¹ Estes dispositivos podem ser eletromecânicos e serão provavelmente controlados por microprocessadores; não serão tão simples como os transístores. Uma simulação neural rápida como a que descrevo será possível mesmo que cada sinapse simulada necessite de ter as suas propriedades controladas por um dispositivo tão complexo como um microprocessador.

²² que se alteram em pouco mais de 12 picossegundos estão descritos em "The HEMT: A Superfast Transistor", por Hadis Morkoc e Paul M. Solomon (IEEE Spectrum, pp. 28-35, fev. 1984).

²³ no seu livro *The Enchanted Loom: The Mind in the Universe* (Nova Iorque: Simon & Schuster, 1981).

²⁴ O cérebro é constituído principalmente por estruturas semelhantes a fios (os axónios e dendrites) e estruturas semelhantes a interruptores (as sinapses). No entanto, esta é uma simplificação exagerada, uma vez que pelo menos algumas estruturas semelhantes a fios podem ter a sua resistência modulada numa escala de tempo curta (como discutido em "A Theoretical Analysis of Electrical Properties of Spines", de C. Koch e T. Poggio, Memorando do Laboratório de IA do MIT nº 713, abril de 1983). Além disso, as sinapses comportam-se menos como interruptores do que como circuitos de comutação modificáveis; podem ser moduladas numa escala de tempo curta e inteiramente reconstruídas numa escala de tempo mais longa (ver "Cell Biology of Synaptic Plasticity", de Carl W. Cotman e Manuel Nieto-Sampedro, *Science*, vol. 225, pp. 1287-1294, 21 de setembro de 1984).

O cérebro pode aparentemente ser modelado por um sistema de componentes nanoeletrónicos modulados e reconstruídos por nanomáquinas comandadas por nanocomputadores mecânicos. Suponha que um nanocomputador é designado para regular cada uma das cerca de quatrilhões de "sinapses" no cérebro modelo, e que cada um regula também secções correspondentes de "axónio" e "dendrite". Uma vez que o volume de cada nanocomputador (se equivalente a um microprocessador moderno) será de cerca de 0,0003 micrón cúbico (consulte *Molecular Machinery and Molecular Electronic Devices*", referenciado no Capítulo 1), estes dispositivos ocuparão um total de cerca de 0,3 centímetros cúbicos. A divisão de mais 0,3 centímetros cúbicos igualmente entre memória de acesso aleatório rápida e memória de fita relativamente rápida daria a cada processador um total de cerca de 3,7 K bytes de RAM e 275 K bytes de fita. (Isto não impõe limites à complexidade do programa, uma vez que vários processadores poderiam partilhar uma memória de programa maior.) Esta quantidade de informação parece mais do que suficiente para fornecer um modelo adequado do estado funcional de uma sinapse. As máquinas moleculares (capazes de modular componentes nanoeletrónicos) e os sistemas de montagem (capazes de os reconstruir) ocupariam relativamente pouco espaço. A troca de informação entre os computadores que utilizam barras de carbyne poderá simular uma sinalização química mais lenta no cérebro.

De entre os componentes nanoeletrónicos, os fios ocuparão o maior volume. Os dendritos típicos têm mais de um micrón de diâmetro e servem principalmente como condutores. O diâmetro dos fios finos pode ser inferior a um centésimo de micrón, determinado pela espessura do isolamento necessário para limitar o tunelamento de eletrões (cerca de três nanómetros, no máximo). A sua condutividade pode facilmente exceder a de um dendrito. Como o volume do cérebro inteiro é aproximadamente igual ao de uma caixa de dez centímetros, fios cem vezes mais finos (um décimo de milésimo da secção transversal) ocuparão no máximo 0,01 centímetros cúbicos (considerando também o seu menor tamanho). Os interruptores eletromecânicos modulados por maquinaria molecular podem aparentemente ser reduzidos aproximadamente no mesmo fator, em comparação com as sinapses. Assim, os circuitos nanoeletrónicos que simulam o comportamento eletroquímico do cérebro podem aparentemente caber num pouco mais de 0,01 centímetros cúbicos. Uma generosa margem de volume para os nanocomputadores simularem as funções mais lentas do cérebro totaliza 0,6 centímetros cúbicos, como calculado acima. Um centímetro cúbico parece, portanto, suficiente.

²⁵ No entanto, esta pode ser uma suposição pessimista. Por exemplo, considerem-se os axónios e os dendritos como sistemas elétricos que transmitem sinais. Mantendo tudo o resto constante, uma operação um milhão de vezes mais rápida requer correntes um milhão de vezes maiores para atingir um determinado limiar de voltagem. O aquecimento resistivo varia consoante o quadrado da corrente dividido pela condutividade. Contudo, o cobre possui cerca de quarenta milhões de vezes a condutividade dos neurónios (ver "A Theoretical Analysis of Electrical Properties of Spines", referenciado acima), o que reduz o aquecimento resistivo para um nível inferior ao assumido (mesmo num dispositivo como o descrito no texto, que é algo mais compacto do que um cérebro). Para outro exemplo, considere-se a energia dissipada no disparo de uma sinapse: dispositivos que exigem menos energia por disparo resultariam numa dissipação de potência inferior à assumida no texto. Parece não haver razão para crer que os neurónios estejam próximos dos limites de eficiência energética no processamento de informação; para uma discussão sobre onde se situam estes limites, veja-se "Thermodynamics of Computation — A Review", de C. H. Bennett (International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, pp. 219-53, 1982). Esta referência indica que os neurónios dissipam uma energia superior a mil milhões de eletrões-volt por descarga. Os cálculos mostram que os relés mecânicos ativados eletrostaticamente podem ligar ou desligar em menos de um nanossegundo, operando a menos de 0,1 volt (tal como os neurónios) e consumindo menos de cem eletrões-volt por operação. (Não há motivo para acreditar que os relés mecânicos serão os melhores comutadores, mas o seu desempenho é fácil de calcular.) As capacitâncias de interligação também podem ser muito mais baixas do que as do cérebro.

²⁶ Esta é uma imagem algo tola, visto que os montadores podem criar conetores que funcionam melhor do que parafusos e sistemas de arrefecimento que funcionam melhor do que água corrente. Mas tentar discutir sistemas baseados inteiramente em hardware avançado construído por montadores arrastaria, na melhor das hipóteses, detalhes de importância secundária e, na pior, soaria como uma falsa previsão do que será construído, em vez de uma projeção sólida do que poderia ser construído. Assim, descreverei frequentemente sistemas construídos por montadores em contextos que a nanotecnologia, de facto, tornaria obsoletos.

²⁷ Ver *Machines Who Think*, de Pamela McCorduck, p. 344 (São Francisco: W. H. Freeman & Company, 1979). Este livro é uma agradável e divertida visão geral da inteligência artificial, na perspectiva das pessoas e da história do campo.

²⁸ Em *U.S. News & World Report*, P. 65, 2 de Novembro de 1981.

Capítulo 6

¹ Para o transporte órbita a órbita, uma alternativa atraente é utilizar foguetões que queimam combustível produzido no espaço a partir de recursos espaciais.

² Para mais informações, ver "Sailing on Sunlight May Give Space Travel a Second Wind" (Smithsonian, pp. 52-61, fev. 1982), "High Performance Solar Sails and Related Reflecting Devices" (Velas Solares de Alto Desempenho e Dispositivos Refletivos Relacionados), AIAA Paper 79-1418, em *Space Manufacturing III*, editado por Jerry Grey e Christine Krop (Nova Iorque: Instituto Americano de Aeronáutica e Astronáutica, 1979), e MIT Space Systems Laboratory Report 5-79, por K. Eric Drexler. A World Space Foundation (P.O. Box Y, South Pasadena, Califórnia 91030) é uma organização sem fins lucrativos, orientada para os associados, que está a construir uma vela solar experimental e a apoiar a procura de asteróides acessíveis.

³ Para uma discussão sobre os recursos asteróides, ver "Asteroid Surface Materials: Mineralogical Characterizations from Reflectance Spectra", de Michael J. Gaffey e Thomas B. McCord (Space Science Reviews, n.º 21, p. 555, 1978) e "Finding "Paydirt" on the Moon and Asteroids", de Robert L. Staehle (Astronautics and Aeronautics, pp. 44-49, Novembro de 1983).

⁴ A erosão por micrometeoroides é um problema menor, e os danos causados por grandes meteoroides são extremamente raros.

⁵ Ver o seu livro "The High Frontier: Human Colonies in Space" (Nova Iorque: William Morrow, 1976). O Space Studies Institute (285 Rosedale Road, P.O. Box 82, Princeton, N.J. 08540) é uma organização sem fins lucrativos, focada nos membros, que visa promover o desenvolvimento económico e a ocupação do espaço, atuando principalmente através de projetos de investigação. A L5 Society (1060 East Elm, Tucson, Arizona 85719) é uma organização sem fins lucrativos, focada nos membros, que visa promover o desenvolvimento económico e a ocupação do espaço, atuando principalmente através da educação pública e da ação política.

⁶ Que energia elétrica pode fornecer uma dada massa de coletor solar? Como a energia elétrica é facilmente convertível em energia química, isto indicará a rapidez com que um coletor solar de uma dada massa pode fornecer energia suficiente para construir uma massa igual de outra coisa. As células solares experimentais de silício amorfo convertem a luz solar em eletricidade com cerca de 10% de eficiência numa camada ativa com cerca de um micron de espessura, gerando cerca de 60 quilowatts de potência por quilograma de massa ativa. As células solares construídas por montadores serão aparentemente capazes de se sair muito melhor e não precisam de substratos pesados ou ligações elétricas pesadas de baixa tensão. Sessenta quilowatts de energia fornecem energia suficiente em poucos minutos para quebrar e reorganizar todas as ligações químicas num quilograma de material típico. Assim, uma nave espacial com uma pequena fração da sua massa investida em coletores solares será capaz de retrabalhar inteiramente a sua própria estrutura em aproximadamente uma hora. Mais importante, porém, este cálculo indica que os replicadores alimentados a energia solar serão capazes de reunir energia suficiente para suportar várias duplicações por hora.

⁷ Para ter a força especificada, apenas cerca de um por cento da área da secção transversal do material deve consistir em fibras de diamante (hastes telescópicas ocas, numa das implementações) que correm numa direção de suporte de carga. Existe um padrão de tecelagem tridimensional e regular (com fibras a correr em sete direções diferentes para suportar todos os tipos possíveis de carga, incluindo cisalhamento) no qual as fibras cilíndricas compactas preenchem cerca de 45 por cento do volume total. Em qualquer direção dada, apenas algumas das fibras podem suportar uma carga substancial, e o uso de fibras ocas e telescópicas (e, em seguida, estendê-las por um fator de dois no comprimento) torna a tecelagem menos densa. Estes fatores consomem a maior parte da margem entre 45 por cento e um por cento, deixando o material apenas tão forte como um aço comum.

Para que o fato mude de forma mantendo um volume interno e uma pressão constantes, e o faça de forma eficiente, a energia mecânica absorvida ao esticar o material num local deve ser recuperada e usada para realizar trabalho mecânico na contração do material noutro local — por exemplo, no outro lado de uma articulação do cotovelo. Uma forma de conseguir isso é através de motores eletrostáticos, reversíveis como geradores, ligados a um sistema elétrico comum. As leis de escala favorecem os motores eletrostáticos em detrimento dos eletromagnéticos em pequenas dimensões.

Um exercício de projeto (com aplicações não limitadas a hipotéticos fatos espaciais) resultou num dispositivo com cerca de 50 nanômetros de diâmetro que funciona com base no princípio de um gerador Van de Graaff estilo "pelletron", usando o tunelamento de elétrons através de pequenas lacunas para carregar pellets e usando um rotor no lugar de uma cadeia de pellets. (O dispositivo também se assemelha a uma roda de água tipo balde.) A operação DC seria a 10 volts, e a eficiência de conversão de energia (tanto para como a partir de energia mecânica) parece ser excelente, limitada principalmente por perdas por atrito. A densidade de conversão de energia (para uma velocidade de aro do rotor de um metro por segundo e pellets carregados por um único elétron) é de cerca de três bilhões de watts por metro cúbico. Isto parece mais do que adequado.

Quanto às perdas por atrito em geral, os rolamentos rotativos com resistências superiores a 6 nano-Newtons podem ser feitos de ligações de carbono — veja "Strong Solids", de A. Kelly (Oxford: Clarendon Press, 1973) — e os rolamentos que usam um par de átomos de carbono de ligação tripla devem permitir uma rotação quase perfeitamente desimpedida. Os rolamentos de rolos baseados em cilindros ocos atômicamente perfeitos com protuberâncias que rolam como engrenagens em pistas atômicamente perfeitas têm pelo menos dois modos significativos de dissipação de energia, um resultante da radiação de fónons (som) através da ligeira irregularidade do movimento de rolamento, o outro resultante da dispersão de fónons existentes pelo ponto de contato em movimento. Estimativas de ambas as formas de atrito (para rolos com pelo menos alguns nanômetros de diâmetro a moverem-se a velocidades modestas) sugerem que dissiparão muito pouca energia, pelos padrões convencionais.

Motores eletrostáticos e rolamentos de rolos podem ser combinados para fazer fusos de macaco telescópicos em escala submicrónica. Estes, por sua vez, podem ser usados como fibras num material capaz de se comportar da maneira descrita no texto.

⁸ Uma exceção a isto é uma força que causa aceleração geral: por exemplo, o equilíbrio exige que as forças exercidas na planta dos pés de uma pessoa de pé dentro de um foguete em aceleração forneçam suporte, e o fato deve transmiti-las sem amplificação ou diminuição. Lidar com isto suavemente pode ser deixado como um exercício para futuros projetistas de sistemas de controlo e programadores de nanocomputadores.

⁹ Desmontadores, montadores, energia e arrefecimento — juntos, estes elementos são suficientes para reciclar todos os materiais de que uma pessoa precisa e para manter um ambiente confortável. Energia e arrefecimento são cruciais.

No que diz respeito à energia, uma pessoa típica consome em média menos de 100 watts; a energia solar que incide sobre uma superfície do tamanho de uma folha de papel (à distância da Terra em relação ao Sol) é quase tão grande. Se o fato for revestido com uma película que atue como uma célula solar de alta eficiência, a luz solar que o atinge deve fornecer energia suficiente. Onde isto for insuficiente, um parasol de células solares poderá ser usado para recolher mais energia.

Quanto ao arrefecimento, toda a energia absorvida deve ser eventualmente dissipada como calor residual — no vácuo, através de radiação térmica. À temperatura corporal, uma superfície pode irradiar mais de 500 watts por metro quadrado. Com células solares eficientes e um projeto adequado (e tendo em mente a possibilidade de aletas de arrefecimento e ciclos de refrigeração), o arrefecimento não deverá ser um problema numa vasta gama de ambientes. O material do fato pode, naturalmente, conter canais para o fluxo de um fluido refrigerante, de modo a manter a pele do utilizador à temperatura preferida.

¹⁰ A cabeça de um alfinete comporta cerca de um milímetro cúbico de material (dependendo do alfinete, claro). Isto é espaço suficiente para codificar uma quantidade de texto superior à de um trilhão de livros (as grandes bibliotecas armazenam apenas milhões). Mesmo considerando que uma imagem vale mais do que mil palavras, este espaço é presumivelmente suficiente para armazenar plantas para uma gama suficientemente ampla de dispositivos.

¹¹ Os sistemas de IA de engenharia descritos no Capítulo 5, sendo um milhão de vezes mais rápidos do que os engenheiros humanos, poderiam executar vários séculos de trabalho de projeto numa só manhã.

¹² Os montadores no vácuo podem fornecer qualquer ambiente desejado num local de reação química, posicionando o conjunto adequado de ferramentas moleculares. Com um projeto adequado e mecanismos de reparação e substituição ativos, a exposição à radiação natural do espaço não será um problema.

¹³ Mas e quanto à poluição do espaço? Os detritos na órbita da Terra representam um perigo significativo e precisam de ser controlados, mas muitos problemas ambientais na Terra não podem ocorrer no espaço: o espaço carece de ar para poluir, de água subterrânea para contaminar ou de uma biosfera para danificar. O espaço já está inundado de radiação natural. À medida que a vida se move para o espaço, será protegida do ambiente espacial em bruto. Além disso, o espaço é grande; o volume do sistema solar interior, por si só, é muitos triliões de vezes maior do que o do ar e dos oceanos da Terra. Se a tecnologia na Terra tem sido como um touro numa loja de porcelanas, então a tecnologia no espaço será como um touro em campo aberto.

¹⁴ Citado em *The High Frontier: Human Colonies in Space*, de Gerard K. O'Neill (Nova Iorque: William Morrow, 1976).

¹⁵ Este conceito foi apresentado pela primeira vez por Robert L. Forward em 1962.

¹⁶ Ele discutiu isto numa palestra numa sessão informal da "Reunião de Discussão sobre as naves espaciais Gossamer" de 15 de maio de 1980, realizada no Laboratório de Propulsão a Jato em Pasadena, Califórnia.

¹⁷ No seu artigo "Roundtrip Interstellar Travel Using Laser-Pushed Lightsails" (*Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 21, pp. 187-95, Jan.-Feb. 1984), Forward aborda o problema de tornar uma vela de inversão de feixe leve o suficiente, mas com qualidade ótica (limitada pela difração) para cumprir a sua função. Uma estrutura ativamente controlada, baseada em filmes metálicos finos, posicionados por atuadores e computadores à escala nanométrica, parece ser uma abordagem viável para resolver este problema.

No entanto, a nanotecnologia permitirá uma abordagem diferente para acelerar as velas solares e parar a sua carga. Os montadores replicadores (*replicating assemblers*) facilitarão a construção de lasers, lentes e velas de grandes dimensões. As velas podem ser feitas de um dielétrico cristalino, como o óxido de alumínio, que possui uma resistência extremamente elevada e baixa absorção ótica. Tais velas poderiam suportar luz laser intensa, dispersando-a e acelerando a muitas "forças G", aproximando-se da velocidade da luz em uma fração de ano. Isto permitirá que as velas atinjam os seus destinos em tempo quase mínimo. (Para uma discussão sobre a aceleração de objetos dielétricos a muitas "forças G", consulte "Applications of Laser Radiation Pressure", de A. Ashkin [*Science*, Vol. 210, pp. 1081-88, Dec. 5, 1980].)

Em voo, sistemas de montagem (assembler systems) controlados por computador a bordo da vela (alimentados por ainda mais luz laser do ponto de partida) poderiam reconstruir a vela numa longa e fina aceleradora de onda progressiva. Esta pode então ser usada para acelerar eletricamente uma casca oca de material resistente com vários microns de raio e contendo cerca de um micron de carga; a tal casca pode ser dada uma elevada razão carga-massa. Os cálculos indicam que um acelerador de 1.000 quilómetros de comprimento (há espaço suficiente, no espaço) será mais do que adequado para acelerar a casca e a carga a mais de 90 por cento da velocidade da luz. Uma massa de um grama por metro para o acelerador (resultando num sistema de uma tonelada) parece mais do que adequada. À medida que o acelerador mergulha no sistema estelar alvo, ele dispara para trás a uma velocidade escolhida para deixar a carga quase em repouso. (Para uma discussão sobre a aceleração eletrostática de pequenas partículas, consulte "Impact Fusion and the Field Emission Projectile", de E. R. Harrison [Nature, Vol. 291, pp. 472-73, June 11, 1981].)

A velocidade residual do projétil pode ser direcionada para o fazer atingir a atmosfera de um planeta semelhante a Marte ou Vénus (selecionado previamente por meio de um grande telescópio espacial). Uma casca fina do tipo descrito irradiará o calor de entrada atmosférica rapidamente o suficiente para se manter fria. A carga, que consiste num sistema de montagem (assembler) e num nanocomputador, pode então usar a luz do sol local e carbono, hidrogénio, nitrogénio e oxigénio locais (provavelmente encontrados em qualquer atmosfera planetária) para replicar-se e construir estruturas maiores.

Um projeto inicial seria a construção de um recetor para futuras instruções de casa, incluindo planos para dispositivos complexos. Estes podem incluir foguetões capazes de sair do planeta (usado como alvo principalmente pelo seu amortecimento atmosférico) para alcançar um melhor local para trabalhos de construção. O sistema resultante de montadores replicadores (replicating assemblers) poderia construir praticamente qualquer coisa, incluindo sistemas inteligentes para exploração. Para resolver o problema da paragem das velas solares para os veículos de passageiros maciços que poderiam seguir, o sistema poderia construir uma matriz de lasers de travagem tão grande quanto os lasers de lançamento em casa. A sua construção poderia ser concluída em questão de semanas após a entrega da "semente" de um micron cúbico. Este sistema ilustra uma forma de espalhar a civilização humana pelas estrelas a uma velocidade apenas ligeiramente inferior à da luz.

¹⁸ Dois dias de viagem com aceleração de um grau podem levar uma pessoa da Terra a qualquer ponto de um disco com mais de 20 milhões de vezes a área da Terra — e este cálculo permite a existência de um buraco no meio do disco com um raio cem vezes maior do que a distância Terra-Lua. Mesmo assim, o bordo exterior do disco atinge apenas um vigésimo do caminho até ao Sol.

¹⁹ Assumindo a conversão de energia solar em energia cinética com uma eficiência de aproximadamente 10%, o que pode ser conseguido de várias formas.

Capítulo 7

¹ Ver o seu artigo "Comparative Biochemistry and Drug Design for Infectious Disease" (*Science*, Vol. 205, pp. 964-71, 7 de Setembro de 1979).

² Ver "A Conformationally Constrained Vasopressin Analog with Antidiuretic Antagonistic Activity", por Gerald Skala et al. (*Science*, Vol. 226, pp. 443-45, 26 de Outubro de 1984).

³ *The American Heritage Dictionary of the English Language*, editado por William Morris (Boston: Houghton Mifflin Company, 1978).

⁴ Serão utilizados tanto para ajudar a projetar instrumentos moleculares quanto para direcionar o seu uso. Com dispositivos capazes de ir a locais específicos, capturar moléculas e analisá-las, o estudo das estruturas celulares tornar-se-á relativamente fácil de automatizar.

⁵ As máquinas de reparação poderiam utilizar dispositivos semelhantes aos robôs hoje utilizados em trabalhos de montagem industrial. Mas a remontagem de estruturas celulares não exigirá máquinas tão precisas (ou seja, tão precisas para o seu tamanho). Muitas estruturas em células automontar-se-ão se os seus componentes estiverem simplesmente confinados uns aos outros, com liberdade para se movimentarem; não precisam de ser manipuladas de forma complexa e precisa. As células

já contêm todas as ferramentas necessárias para montar estruturas celulares, e nenhuma é tão complexa como um robô industrial.

⁶ Ver pp. 1022-23 of Biochemistry, by Albert L. Lehninger (New York: Worth Publishers, 1975).

⁷ O conteúdo de lipofuscina varia de acordo com o tipo de célula, mas algumas células cerebrais (em animais idosos) contêm em média cerca de 17%; os grânulos típicos de lipofuscina têm um a três micrómetros de diâmetro. Ver "Lipofuscin Pigment Accumulation as a Function of Age and Distribution in Rodent Brain" (Acumulação de Pigmentos de Lipofuscina em Função da Idade e da Distribuição no Cérebro de Roedores), de William Reichel et al. (Journal of Gerontology, vol. 23, pp. 71-81, 1968). Ver também "Lipoprotein Pigments — Their Relationship to Aging in the Human Nervous System" (Pigmentos das Lipoproteínas — A sua Relação com o Envelhecimento no Sistema Nervoso Humano), de D. M. A. Mann e P. O. Yates (Brain, vol. 97, pp. 481-88, 1974).

⁸ A relação implícita não é exata, mas mostra a tendência correta: por exemplo, o segundo número deveria ser 2,33 erros não corrigidos num milhão de milhões, e o terceiro deveria ser 4,44 num milhão de milhões de milhões (de acordo com alguns cálculos bastante complexos baseados num algoritmo de correção um pouco mais complexo).

⁹ As células imunes que produzem diferentes anticorpos possuem genes diferentes, editados durante o desenvolvimento. A reparação destes genes exigirá regras especiais (mas a viabilidade demonstrada do desenvolvimento de um sistema imunitário demonstra que os padrões de informação corretos podem ser gerados).

¹⁰ Note-se que qualquer molécula suficientemente danificada para ter um efeito anormal na maquinaria molecular da célula será, da mesma forma, suficientemente danificada para ter um efeito distinto nos sensores moleculares.

¹¹ Para uma monografia que discute este tema com mais detalhe, incluindo cálculos de volumes, velocidades, potências e cargas computacionais, ver "Cell Repair Systems", de K. Eric Drexler (disponível no The Foresight Institute, Palo Alto, Califórnia).

¹² Por exemplo, através de fibras ocas de um ou dois nanômetros de diâmetro, cada uma transportando uma haste de sinalização carbyne, do tipo utilizado em nanocomputadores mecânicos. Os repetidores de sinal podem ser utilizados quando necessário.

¹³ Isto não requer a resolução de problemas de reconhecimento de padrões muito complexos, exceto nos casos em que a estrutura celular está gravemente alterada. Cada estrutura celular contém tipos padrão de moléculas num padrão que varia dentro de limites estereotipados, e um algoritmo simples pode identificar até mesmo proteínas substancialmente danificadas. A identificação das moléculas padrão numa estrutura determina o seu tipo; mapeá-la torna-se então uma questão de preencher tipos de detalhes conhecidos.

¹⁴ As experiências moleculares podem ser realizadas cerca de um milhão de vezes mais rapidamente do que as experiências macroscópicas, uma vez que um braço montador pode executar ações a uma velocidade um milhão de vezes superior à de um braço humano (ver Capítulo 4). Assim, as máquinas moleculares e os sistemas de IA rápidos têm velocidades equivalentes.

¹⁵ utilizando 2-MEA, BHT e etoxiquina; os resultados dependeram da estirpe do ratinho, da dieta e da substância química empregue. Ver "Free Radical Theory of Aging", de D. Harman (Triangle, Vol. 12, nº 4, pp. 153-158, 1973).

¹⁶ de acordo com o Press-Telegram, Long Beach, Califórnia, 26 de abril de 1985.

¹⁷ A reparação celular também dependerá de novas ciências, mas de uma forma diferente. Como foi discutido no Capítulo 3, faz sentido prever o que vamos aprender, mas não o que vamos aprender. Prolongar a vida através de máquinas de reparação celular exigirá que aprendamos sobre as estruturas celulares antes de as repararmos, mas o que aprendemos não afetará a viabilidade dessas reparações. Prolongar a vida por meios convencionais, por outro lado, dependerá da forma como a maquinaria molecular do corpo se consegue reparar quando tratada adequadamente. Aprenderemos mais sobre isso, mas o que aprendermos poderá ser desanimador.

¹ Ver "Evolution of Aging," um artigo de revisão de T. B. L. Kirkwood (Nature, Vol. 270, pp. 301-4, 1977).

² Em *The Uniqueness of the Individual* (Londres: Methuen, 1957). Ver também a discussão em *The Selfish Gene*, pp. 42-45 (nas referências do Capítulo 2).

³ Ver a referência acima, que inclui uma explicação alternativa (mas amplamente semelhante) para o resultado de Hayflick.

⁴ Para uma referência a uma declaração desta teoria (por D. Dykhuizen em 1974), juntamente com uma crítica e uma refutação, ver as cartas de Robin Holliday e de John Cairns e Jonathan Logan, em "Cancer and Cell Senescence" (Nature, Vol. 306, p. 742, 29 de dezembro de 1983).

⁵ Estes animais podem ainda ter uma elevada taxa de cancro devido à elevada incidência de relógios avariados.

⁶ O que é carne para um sistema é veneno para outro; os automóveis "comem" um produto tóxico do petróleo. Mesmo entre os organismos, algumas bactérias prosperam com uma combinação de metanol (álcool de madeira) e monóxido de carbono (ver "Single-Carbon Chemistry of Acetogenic and Methanogenic Bacteria", de J. G. Zeikus et al., Science, vol. 227, pp. 1167-1171, 8 de março de 1985), enquanto outras foram criadas para sobreviver com triclorofenol ou com o herbicida 2,4,5-T. Podem até desfluorar o pentafluorofenol. (Ver "Microbial Degradation of Halogenated Compounds", de D. Chousal et al., Science, vol. 228, pp. 135-142, 12 de abril de 1985.)

⁷ através da utilização de combustíveis produzidos através da energia solar.

⁸ Em termos de tonelagem, o dióxido de carbono é talvez o nosso maior problema de poluição. No entanto, surpreendentemente, um cálculo simples mostra que a luz solar que atinge a Terra num dia contém energia suficiente para dividir todo o dióxido de carbono da atmosfera em carbono e oxigénio (considerações de eficiência à parte). Mesmo considerando várias limitações práticas e estéticas, teremos energia suficiente para concluir esta grande limpeza no espaço de uma única década.

⁹ Ver "Gene Samples from an Extinct Animal Cloned", por J. A. Miller (Science News, Vol. 125, p. 356, 9 de junho de 1984).

¹⁰ A *Ilíada*, de Homero (cerca do século VIII a.C.), citada por Eric Hoffer em *The True Believer* (Nova Iorque: Harper & Brothers, 1951). (Sarpedon é de facto morto na batalha.)

¹¹ Do épico de Gilgamesh, traduzido por N. K. Sandars (Middlesex: Penguin Books, 1972).

Capítulo 9

¹ Em *O Sr. Franklin*, uma seleção das suas cartas pessoais, por L. W. Labaree e W. J. Bell, Jr. (New Haven: Yale University Press, 1956), pp. 27-29.

² Com órgãos e tecidos cultivados a partir das próprias células do recetor, não haverá qualquer problema de rejeição.

³ Experiências demonstram que as variações na experiência produzem rapidamente variações visíveis na forma dos espinhos dendríticos (pequenas protuberâncias portadoras de sinapses nos dendritos). Consulte "A Theoretical Analysis of Electrical Properties of Spines," de C. Koch e T. Poggio (MIT AI Lab Memo No. 713, abril de 1983).

Em "Cell Biology of Synaptic Plasticity" (Science, Vol. 225, pp. 1287-94, 21 de setembro de 1984), Carl W. Cotman e Manuel Nieto-Sampedro escrevem que "O sistema nervoso é especializado para mediar a resposta adaptativa do organismo... Para este fim, o sistema nervoso é unicamente modificável, ou plástico. A plasticidade neuronal é largamente a capacidade das sinapses de modificar a sua função, de serem substituídas e de aumentar ou diminuir em número quando necessário." Mais ainda, "porque o neocórtex é considerado um dos locais de aprendizagem e memória, a maioria dos estudos sobre o efeito sináptico de estímulos naturais tem-se concentrado nesta área." Aumentos na ramificação dendrítica no neocórtex "são causados pela idade (experiência) tanto em roedores como em humanos. Aumentos menores, mas reproduzíveis, são observados após a aprendizagem de tarefas particulares..." Estas alterações na estrutura celular podem ocorrer "em poucas horas".

Para uma discussão sobre memória de curto e longo prazo, e sobre como a primeira pode ser convertida na segunda, consulte "The Biochemistry of Memory: A New and Specific Hypothesis," de Gaty Lynch e Michel Baudry (Science, Vol. 224, pp. 1057-63, 8 de junho de 1984).

Atualmente, cada teoria viável de memória de longo prazo envolve alterações na estrutura e no conteúdo proteico dos neurónios. Existe uma ideia popular persistente de que a memória poderia, de alguma forma, ser armazenada (exclusivamente?) "em moléculas de ARN", um rumor aparentemente fomentado por uma analogia com o ADN, a "memória" responsável pela hereditariedade. Esta ideia deriva de experiências antigas que sugeriam que comportamentos aprendidos podiam ser transferidos para planárias não "educadas" injetando-lhes ARN extraído de vermes "educados". Infelizmente para esta teoria, os mesmos resultados foram obtidos usando ARN de células de levedura completamente não "educadas". Consulte "Biology Today", de David Kirk, p. 616 (Nova Iorque: Random House, 1975).

Outra ideia popular persistente é que a memória poderia ser armazenada sob a forma de padrões reverberantes de atividade elétrica, um rumor aparentemente fomentado por uma analogia com as memórias de acesso aleatório dinâmico (RAM) dos computadores modernos. Esta analogia, contudo, é inadequada por várias razões: (1) As memórias de computador, ao contrário dos cérebros, são projetadas para serem apagadas e reutilizadas repetidamente. (2) Os padrões na "memória de longo prazo" de um computador — o seu disco magnético, por exemplo — são, de facto, mais duráveis do que a RAM dinâmica. (3) Os chips de silício são projetados para estabilidade estrutural, enquanto o cérebro é projetado para mudança estrutural dinâmica. À luz da evidência moderna para o armazenamento de memória de longo prazo em estruturas cerebrais duradouras, não é surpreendente que "a cessação total da atividade elétrica do cérebro geralmente não apaga as memórias, embora possa afetar seletivamente as mais recentemente armazenadas" (A. J. Dunn). A teoria da reverberação elétrica foi proposta por R. Lorente de No (Journal of Neurophysiology, Vol. 1, p. 207) em 1938. A evidência moderna falha em apoiar tais teorias de memória efêmera.

⁴ Por razões técnicas, este estudo foi realizado em moluscos, mas a neurobiologia revelou-se surpreendentemente uniforme. Ver "Molecular Biology of Learning: Modulation of Transmitter Release", de Eric R. Kandel e James H. Schwartz (Science, Vol. 218, pp. 433-43, 29 de outubro de 1982), que relata o trabalho de C. Baily e M. Chen.

⁵ O tempo entre a expiração e a dissolução define a janela para o sucesso da biotase, mas este tempo é incerto. Como a experiência médica demonstra, é possível destruir o cérebro (causando a dissolução irreversível da mente e da memória) mesmo enquanto um paciente respira. Em contraste, pacientes foram reanimados com sucesso após um período significativo da chamada "morte clínica". Com máquinas de reparação celular, o requisito básico é que as células cerebrais permaneçam estruturalmente intactas; enquanto estiverem vivas, presumivelmente estão intactas, pelo que a viabilidade fornece um indicador conservador.

Existe um mito comum de que o cérebro "não consegue sobreviver" por mais de alguns minutos sem oxigénio. Mesmo que isso fosse verdade em relação à sobrevivência da capacidade (espontânea) de retomar a função, a sobrevivência da estrutura celular característica seria ainda outra questão. E, de facto, as estruturas celulares nos cérebros de cães falecidos, mesmo quando mantidos à temperatura ambiente, mostram apenas alterações moderadas após seis horas, e muitas estruturas celulares permanecem visíveis por um dia ou mais; veja "Studies on the Epithalamus", de Duane E. Haines e Thomas W. Jenkins (Journal of Comparative Neurology, Vol. 132, pp. 405-17, março de 1968).

Mas, na verdade, o potencial para a função cerebral espontânea pode sobreviver por mais tempo do que este mito (e a definição médica de "morte cerebral") sugere. Uma variedade de experiências que empregam medicamentos e cirurgia mostram isso: macacos adultos recuperaram completamente após um corte de dezasseis minutos da circulação para o cérebro (uma condição, chamada "isquemia", que claramente também bloqueia o fornecimento de oxigénio); veja "Thiopental Therapy After 16 Minutes of Global Brain Ischemia in Monkeys", de A. L. Bleyaert et al. (Critical Care Medicine, Vol. 4, pp. 130-31, março/abril de 1976). Cérebros de macaco e gato sobreviveram por uma hora à temperatura corporal sem circulação, e depois recuperaram a função elétrica; veja "Reversibility of Ischemic Brain Damage", de K.-A. Hossmann e Paul Kleihues (Archives of Neurology, Vol. 29, pp. 375-84, dezembro de 1973). O Dr. Hossmann conclui que qualquer célula nervosa no cérebro "pode sobreviver" por uma hora sem sangue (depois de o coração parar de bombear, por exemplo). O problema não é que as células nervosas morram quando a circulação pára, mas que problemas secundários (como um ligeiro inchaço do cérebro dentro da sua caixa óssea apertada) podem impedir a circulação de recomeçar. Quando arrefecidos a perto do ponto de congelamento, cérebros de cães recuperaram atividade elétrica após quatro horas sem circulação (e recuperaram

atividade metabólica substancial mesmo após quinze dias); veja "Prolonged Whole-Brain Refrigeration with Electrical and Metabolic Recovery", de Robert J. White et al. (Nature, Vol. 209, pp. 1320-22, 26 de março de 1966).

As células cerebrais que retêm a capacidade de reanimação espontânea no momento em que são submetidas a biostase devem ser fáceis de reparar. Uma vez que o sucesso requer principalmente que as estruturas celulares características permaneçam intactas, a janela de tempo para iniciar os procedimentos de biostase é provavelmente de pelo menos várias horas após a expiração, e possivelmente mais. Hospitais cooperantes podem, e têm, tornado esse tempo muito mais curto.

⁶ Para micrografias eletrônicas de alta voltagem que mostram detalhes à escala molecular em células preservadas por fixação com glutaraldeído, ver "The Ground Substance of the Living Cell", de Keith R. Porter e Jonathan B. Tucker (Scientific American, vol. 244, pp. 56-68, março de 1981). A fixação por si só não parece suficiente; a estabilização da estrutura a longo prazo parece exigir o congelamento ou a vitrificação, isoladamente ou em adição à fixação. O arrefecimento em azoto — a -196°C — pode preservar as estruturas dos tecidos durante milhares de anos.

⁷ Ver "Vitrification as an Approach to Cryopreservation," de G. M. Fahy et al. (Cryobiology, Vol. 21, pp. 407-26, 1984).

⁸ Ver "Ice-free Cryopreservation of Mouse Embryos at -196 degrees C by Vitrification," by W. F. Rall and G. M. Fahy (Nature, Vol. 313, pp. 573-75, Feb. 14, 1985).

⁹ The Prospect of Immortality (Nova Iorque: Doubleday, 1964; uma versão preliminar foi publicada em privado em 1962).

¹⁰ É sabido que os espermatozoides humanos e os embriões em fase inicial sobrevivem à congelação e ao armazenamento; em ambos os casos, foram relatados sucessos nos meios de comunicação de massa. Sucessos menos espetaculares com outros tipos de células (o sangue congelado e descongelado é utilizado para transfusões) são numerosos. É também interessante notar que, após tratamento com glicerol e congelação a -20°C, os cérebros de gatos podem recuperar a atividade elétrica espontânea após mais de 200 dias de armazenamento; ver "Viability of Long Term Frozen Cat Brain In Vitro", por I. Suda, K. Kito e C. Adachi (Nature, vol. 212, pp. 268-70, 15 de outubro de 1966).

¹¹ Um grupo do Laboratório de Criobiologia da Cruz Vermelha Americana (9312 Old Georgetown Road, Bethesda, Md. 20814) está a procurar a preservação de órgãos humanos inteiros para permitir o estabelecimento de bancos de órgãos para transplante; ver "Vitrification as an Approach to Cryopreservation", referenciado acima.

¹² Como descobri quando a evidente viabilidade da reparação celular me levou finalmente a examinar a literatura sobre críonica. O livro original de Robert Ettinger, por exemplo (referenciado acima), fala do eventual desenvolvimento de "enormes máquinas cirurgiãs" capazes de reparar tecidos "célula a célula, ou mesmo molécula a molécula em zonas críticas". Em 1969, Jerome B. White publicou um artigo sobre "Reparo Induzido por Viral de Neurónios Danificados com Preservação de Conteúdo Informativo a Longo Prazo", propondo que poderiam ser encontrados meios para direcionar a reparação utilizando vírus artificiais; ver o resumo citado em "Man into Superman", de Robert C. W. Ettinger (Nova Iorque: St. Martin's Press, 1972, p. 298). Em "The Anabolocyte: A Biological Approach to Repairing Cryo-injury" (Life Extension Magazine, pp. 80-83, julho/agosto de 1977), Michael Darwin propôs que seria possível utilizar a engenharia genética para produzir glóbulos brancos altamente modificados, capazes de desmembrar e reconstruir células danificadas. Em "Como nos trarão de volta, daqui a 200 anos?" (The Immortalist, vol. 12, pp. 5-10, março de 1981), Thomas Donaldson propôs que os sistemas de máquinas moleculares (com dispositivos tão pequenos como vírus e agregados de dispositivos tão grandes como edifícios, se necessário) poderiam realizar quaisquer reparações necessárias em tecidos congelados.

A ideia dos sistemas de reparação celular, portanto, já existe há muitos anos. Os conceitos do montador (assembler) e do nanocomputador permitiram ver claramente como tais dispositivos podem ser construídos e controlados, e que podem, de facto, caber dentro das células.

¹³ No entanto, os hamsters foram arrefecidos a uma temperatura que congelou mais de metade do conteúdo de água nos seus corpos (e cérebros) e depois reviveram com recuperação completa; ver Efeitos biológicos do congelamento e do sobrearrefecimento, por Audrey U. Smith (Baltimore: Williams & Wilkins, 1961).

¹⁴ Em Designing the Future: The Role of Technological Forecasting (Philadelphia: Chilton Book Co., 1967).

¹⁵ Outros fatores têm sido igualmente desencorajadores — principalmente o custo e a ignorância. Para um paciente pagar um procedimento de biostase e estabelecer um fundo que providencie armazenamento indefinido em nitrogénio líquido, o valor ascende agora a 35.000 dólares ou mais, dependendo do procedimento de biostase escolhido. Este custo é tipicamente coberto pela aquisição de uma apólice de seguro de vida adequada. Enfrentando este custo e não tendo uma imagem clara de como os danos causados pelo congelamento podem ser reparados, apenas alguns pacientes, de entre milhões, optaram até agora por este caminho. A pequena procura, por sua vez, impediu que as economias de escala fizessem baixar o custo do serviço. Mas isto pode estar prestes a mudar. Grupos de críonica reportam um aumento recente nos contratos de biostase, aparentemente resultante do conhecimento dos avanços na biologia molecular e na compreensão das futuras capacidades de reparação celular.

Três grupos nos EUA oferecem atualmente serviços de biostase. Por ordem do seu aparente tamanho e qualidade, são eles:

- The Alcor Life Extension Foundation, 4030 North Palm No. 304, Fullerton, Calif. 92635, (714) 738-5569. (A Alcor também tem uma filial e instalações no sul da Flórida.)
- Trans Time, Inc., 1507 63rd Street, Emeryville, Calif. 94707, (415) 655-9734.
- The Cryonics Institute, 24041 Stratford, Oak Park, Mich. 48237, (313) 967-3115.

Por razões práticas baseadas na experiência, exigem que os arranjos legais e financeiros sejam concluídos antecipadamente.

¹⁶ O crescimento de cristais de gelo pode deslocar as estruturas celulares em alguns milionésimos de metro, mas não as destrói, nem parece provável que cause qualquer confusão significativa sobre onde estavam antes de serem deslocadas. Uma vez congelados, não se mexem mais. As reparações podem começar antes que o descongelamento permita que se movam novamente.

¹⁷ Os procedimentos atuais de biostase envolvem a lavagem da maior parte do sangue do paciente; as nanomáquinas recuperam quaisquer células sanguíneas restantes à medida que estas saem do sistema circulatório.

¹⁸ Isto exclui, por exemplo, a córnea, mas outros meios podem ser utilizados para obter acesso ao interior destes tecidos, ou podem simplesmente ser substituídos.

¹⁹ As moléculas do protetor estão ligadas entre si por ligações tão fracas que se rompem à temperatura ambiente devido às vibrações térmicas. Mesmo a baixas temperaturas, as máquinas de remoção de protetores não terão dificuldade em remover estas moléculas das superfícies.

²⁰ Este poderia ser construído com hastes nanométricas de espessura, concebidas para se encaixarem. As moléculas podiam ser fixadas à estrutura com dispositivos semelhantes a garras jacaré de ponta dupla.

²¹ As etiquetas podem ser feitas a partir de pequenos segmentos de fita de polímero codificada. Um segmento de alguns nanómetros de comprimento pode especificar uma localização em qualquer lugar com uma precisão de um micron cúbico a um nanómetro.

²² De facto, um feixe de fibras de transmissão de sinal com um diâmetro nanométrico, equivalente ao de um dedo (com ramificações finas ao longo dos capilares do paciente), pode, em menos de uma semana, transmitir uma descrição molecular completa de todas as células do paciente para um conjunto de computadores externos. Embora aparentemente desnecessário, o uso de computadores externos eliminaria a maior parte das restrições significativas de volume, velocidade e dissipação de energia na quantidade de computação disponível para planear procedimentos de reparação.

²³ As células possuem estruturas estereotipadas, cada uma construída a partir de tipos padrão de moléculas ligadas de formas padronizadas, de acordo com programas genéticos padronizados. Isto simplificará bastante o problema de identificação.

²⁴ Destacou a possibilidade de fabricar dispositivos com fios de apenas dez ou cem átomos de largura; ver "There's Plenty of Room at the Bottom", em *Miniaturization*, editado por H. D. Gilbert (Nova Iorque: Reinhold, 1961), pp. 282-96.

²⁵ Em "The Idea of Progress" (*Astronautics and Aeronautics*, p. 60, May 1981).

²⁶ Em "Basic Medical Research: A Long-Term Investment" (Technology Review, pp. 46-47, May/June 1981).

²⁷ Ver Volume V, "Fine Chemical Products" in A History of Technology, editado por C. J. Singer e outros (Oxford: Clarendon Press, 1958).

²⁸ Ver *A History of Technology*, referenciado acima.

Capítulo 10

¹ O princípio da relatividade do movimento significa que os objetos "em movimento" podem ser considerados em repouso — o que significa que um piloto de uma nave espacial que tentasse aproximar-se da velocidade da luz nem sequer saberia em que direção acelerar. Além disso, diagramas simples de Minkowski mostram que a geometria do espaço-tempo faz com que viajar mais rápido do que a luz seja equivalente a viajar para trás no tempo — e para onde se aponta um foguetão para se mover nessa direção?

² Em *Profiles of the Future: An Inquiry into the Limits of the Possible*, first edition (New York: Harper & Row, 1962).

³ Para um relato de algumas teorias modernas que tentam unificar toda a física em termos do comportamento do vácuo, ver "The Hidden Dimensions of Spacetime", de Daniel Z. Freedman e Peter van Nieuwenhuizen (Scientific American, Vol. 252, pp. 74-81, Março de 1985).

⁴ Por exemplo, as medições quânticas podem afetar o resultado de outras medições quânticas instantaneamente a uma distância arbitrariamente grande — mas os efeitos são apenas estatísticos e de um tipo subtil que foi matematicamente comprovado como incapaz de transmitir informação. Veja-se a discussão bastante legível sobre o teorema de Bell e o paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen em *Quantum Reality*, de Nick Herbert (Garden City, Nova Iorque: Anchor Press/Doubleday, 1985). Apesar dos rumores em contrário (alguns passados nas páginas finais de *Quantum Reality*), nada parece sugerir que a consciência e a mente dependam da mecânica quântica de alguma forma especial. Para uma excelente discussão sobre o funcionamento da consciência (e sobre a pouca consciência que temos realmente), ver *The Society of Mind*, de Marvin Minsky (Nova Iorque: Simon & Schuster, 1986).

⁵ Mas agora a física pode responder a estas questões com matemática clara. Os cálculos baseados nas equações da mecânica quântica mostram que o ar é gasoso porque os átomos de azoto e oxigénio tendem a formar pares fortemente ligados, não ligados a mais nada. O ar é transparente porque a luz visível não tem energia suficiente para excitar os seus eletrões fortemente ligados a estados quânticos mais elevados, pelo que os fótons passam sem absorção. Uma mesa de madeira é sólida porque contém átomos de carbono que (como demonstrado pelos cálculos da mecânica quântica) são capazes de formar as cadeias fortemente ligadas da celulose e da lignina. Ela é castanha porque os seus eletrões estão numa variedade de estados, alguns capazes de serem excitados pela luz visível; absorve preferencialmente fótons mais azuis e de maior energia, tornando a luz refletida amarelada ou avermelhada.

⁶ Em "The Edge of Spacetime" (American Scientist, Vol. 72, pp. 355-59, Jul.-Aug. 1984).

⁷ Os eletrões, os prótons e os neutrões possuem antipartículas estáveis com propriedades praticamente idênticas, exceto por cargas opostas e pela capacidade de se aniquilarem quando emparelhados com as suas partículas gêmeas, libertando energia (ou partículas mais leves). Por isso, têm aplicações óbvias no armazenamento de energia. Além disso, os objetos de antimatéria (feitos a partir de antipartículas da matéria comum) podem ter utilidade como elétrodos negativos em sistemas eletrostáticos de alto campo: o campo não teria tendência para remover os positrões (como faria com os eletrões), fazendo com que a rutura mecânica da superfície do eletrodo fosse o principal limite para a intensidade do campo. Tais elétrodos teriam de ser feitos e posicionados sem contato com a matéria comum, claro.

Várias teorias físicas preveem uma variedade de outras partículas estáveis (e até mesmo linhas massivas, semelhantes a partículas), mas todas teriam uma interação tão fraca que seriam quase indetetáveis (como os neutrinos, só que mais) ou seriam muito massivas (como os hipotéticos monopólos magnéticos). Tais partículas poderiam ainda ser muito úteis, se encontradas.

⁸ Os efeitos moleculares e de campo utilizados na espectroscopia de ressonância magnética nuclear alteram a orientação de um núcleo, mas não a sua estrutura.

⁹ Foi sugerido que os núcleos excitados poderiam até servir como meio de transmissão de laser num laser de raios gama.

¹⁰ Antes que os núcleos se aproximem o suficiente para interagir, as estruturas atômicas associadas fundem-se para formar uma "matéria degenerada" sólida, semelhante a um metal, estável apenas sob uma enorme pressão. Quando os núcleos finalmente interagem, a troca de neutrões e outras partículas logo os transmuta em tipos semelhantes, obliterando muitos dos padrões que se poderia tentar construir e utilizar.

¹¹ Este é um objetivo simples de definir, mas as estruturas ideais (pelo menos onde é necessária alguma resistência à compressão) podem ser bastante complexas. Os cristais normais transmitem bem o calor, tornando a irregularidade desejável, e a irregularidade significa complexidade.

¹² E em alguns casos, podemos conceber o melhor sistema possível, mas nunca ter a certeza de que não existem sistemas melhores.

¹³ Em *The Lean Years: Politics in the Age of Scarcity* (New York: Simon & Schuster, 1980).

¹⁴ *Entropy: A New World View* (New York: Viking Press, 1980).

¹⁵ Apesar desta declaração, Rifkin embarcou numa nova cruzada moral, desta vez contra a ideia de evolução e contra a modificação dos genes dos seres humanos, mesmo de formas que os vírus e as bactérias fazem há milhões de anos. Novamente, alerta para as consequências cósmicas. Mas aparentemente ainda acredita no mundo hermeticamente fechado e eternamente moribundo que descreveu em *Entropia*: "Vivemos pela graça do sacrifício. Toda a ampliação do nosso ser deve a sua existência a alguma diminuição em algum outro lugar." Tendo provado em *Entropia* que não compreende como funciona o cosmos, procura agora aconselhar-nos sobre o que pretende: "Os interesses do cosmos não são diferentes dos nossos... Como representamos então melhor os interesses do cosmos? Retribuindo na medida em que recebemos." Mas parece ver todas as conquistas humanas como fundamentalmente destrutivas, afirmando que "o único legado vivo que podemos deixar é a doação que nunca tocamos" e declarando que "a vida exige a morte". Para mais misantropia e equívocos, ver Algeny, de Jeremy Rifkin (Nova Iorque: Viking, 1983).

Para uma afirmação confiante de que a engenharia genética é impossível em primeiro lugar, feita pelo "profeta e professor" de Rifkin, Nicholas Georgescu Roegen, ver *The Entropy Law and the Economic Process* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1971).

¹⁶ A transição demográfica — a redução das taxas médias de natalidade com o crescimento económico — é basicamente irrelevante para isso. O crescimento exponencial de uma pequena minoria torná-la-ia rapidamente numa maioria e, então, consumiria todos os recursos disponíveis.

¹⁷ A razão para tal baseia-se num argumento evolucionário muito básico. Suponha que uma civilização diversa e competitiva começa a expandir-se no espaço. Que grupos serão encontrados na fronteira? Precisamente aqueles grupos que se expandem mais rapidamente. A competição pelo acesso à fronteira proporciona uma pressão evolutiva que favorece a velocidade máxima de viagem e de colonização, e esta velocidade máxima é ligeiramente inferior à velocidade da luz (ver notas do Capítulo 6). Em cem milhões de anos, estas civilizações espalhar-se-iam não só pelas galáxias, mas pelo espaço intergaláctico. Que mil ou um milhão de vezes mais civilizações possam entrar em colapso antes de chegarem ao espaço, ou possam sobreviver sem se expandirem, é simplesmente irrelevante. Uma lição fundamental da evolução é que, no que diz respeito aos replicadores, um único sucesso pode superar um número ilimitado de fracassos.

¹⁸ Mesmo o número de moléculas de ADN possíveis com 50 nucleótidos de comprimento (quatro elevado à quinquagésima potência) é superior ao número de moléculas num copo de água.

¹⁹ De Donella H. Meadows et al. (New York: Universe Books, 1972).

²⁰ De Mihajlo D. Mesarovic and Eduard Pestel (New York: Dutton, 1974).

Capítulo 11

¹ Temos problemas, mesmo que sejam feitos de maquinaria molecular convencional. As bactérias também são difíceis de controlar, mas superficialmente são quase indefesas. Cada célula bacteriana assemelha-se a uma pequena caixa rígida e sem boca — para se alimentar, uma bactéria precisa de estar imersa numa película de água que pode transportar os nutrientes dissolvidos para que os absorva. Em contraste, as "superbactérias" baseadas em montadores poderiam funcionar com ou sem água; poderiam alimentar a sua maquinaria molecular com matérias-primas recolhidas por "bocas" capazes de atacar estruturas sólidas.

² Ver "The Fifth Generation: Taking Stock", de M. Mitchell Waldrop (Science, vol. 226, pp. 1061-63, 30 de novembro de 1984) e "Military Robots", de Joseph K. Corrado (Design News, pp. 45-66, 10 de outubro de 1983).

³ Para ser preciso, um objeto pode ser montado com uma probabilidade insignificante de colocar átomos no lugar errado. Durante a montagem, os erros podem ser arbitrariamente improváveis por um processo de testes e correções repetidos (ver notas do Capítulo 4). Por exemplo, suponha que os erros são bastante comuns. Suponha ainda que um teste por vezes falha, permitindo que um em cada mil erros passe despercebido. Se assim for, uma série de vinte testes tornará a hipótese de falha na deteção e correção de um erro tão baixa que as hipóteses de colocar um único átomo no lugar errado seriam pequenas, mesmo quando se cria um objeto do tamanho da Terra. Mas os danos causados pela radiação (que ocorrem a uma taxa proporcional ao tamanho e à idade do objeto) acabarão por deslocar até mesmo átomos colocados corretamente, pelo que este grau de cuidado seria inútil.

⁴ Pode parecer que a blindagem eliminaria este problema, mas os neutrinos capazes de penetrar toda a espessura da Terra — ou de Júpiter, ou do Sol — podem ainda causar danos por radiação, embora a uma taxa muito pequena. Ver "The Search for Proton Decay", de J. M. LoSecco et al. (Scientific American, vol. 252, p. 59, Junho de 1985).

⁵ Ver "Fault-Tolerant Systems in Commercial Applications," by Omri Serlin (Computer, Vol. 17, pp. 19-30, Aug. 1984).

⁶ Ver "Fault Tolerance by Design Diversity: Concepts and Experiments," by Algirdas Avizienis and John P. J. Kelly (Computer, Vol. 17, pp. 67-80, Aug. 1984).

⁷ A bactéria *Micrococcus radiodurans* possui, aparentemente, ADN quádruplo redundante, o que lhe permite sobreviver a doses extremas de radiação. Ver "Multiplicidade dos Equivalentes de Genoma na Bactéria *Micrococcus radiodurans* Resistente à Radiação", de Mogens T. Hansen, in *Journal of Bacteriology*, pp. 7 1-75, Abril de 1978.

⁸ A correção de erros baseada em múltiplas cópias é mais fácil de explicar, mas os discos de áudio digitais (por exemplo) utilizam outros métodos que permitem a correção de erros com muito menos informação redundante. Para uma explicação de um código comum de correção de erros, ver "The Reliability of Computer Memory", de Robert McEliece (Scientific American, vol. 248, pp. 88-92, Jan. 1985).

⁹ Ver *The Society of Mind*, by Marvin Minsky (New York: Simon & Schuster, 1986).

¹⁰ De William A. Kornfeld e Carl Hewitt (MIT AI Lab Memo No. 641, Jan. 1981).

¹¹ A segurança não exige que todos os sistemas de IA sejam fiáveis, desde que alguns sejam fiáveis e nos ajudem a planear precauções para os restantes.

¹² Este é um conceito que está a ser desenvolvido por Mark Miller e por mim; está relacionado com as ideias discutidas em "Sistemas Abertos", de Carl Hewitt e Peter de Jong (MIT AI Lab Memo n.º 692, Dezembro de 1982).

¹³ apenas porque os sistemas de IA rápidos (como os descritos no Capítulo 5) serão capazes de encontrar e corrigir erros um milhão de vezes mais rapidamente.

¹⁴ Ver "The Role of Heuristics in Learning by Discovery", de Douglas B. Lenat, em *Machine Learning*, editado por Michalski et al. (Palo Alto, Califórnia: Tioga Publishing Company, 1983). Para uma discussão sobre a evolução bem-sucedida dos programas

concebidos para evoluir, ver pp. 243-285. Para uma discussão sobre a evolução mal sucedida de programas concebidos para evoluir, mas não adequadamente concebidos para tal, ver pp. 288-292.

¹⁵ Sem isso, a "gosma cinzenta" pode substituir-nos e ainda assim não conseguir evoluir para algo interessante.

¹⁶ Os cálculos permitirão ao sistema visualizar estruturas moleculares que não foram diretamente caracterizadas. No entanto, os cálculos podem levar a resultados ambíguos em casos extremos — os resultados reais podem até depender de tunelamento aleatório ou ruído térmico. Neste caso, a medição de algumas posições atômicas selecionadas (realizada por sondagem mecânica direta da superfície da peça) deve ser suficiente para distinguir entre as possibilidades, corrigindo assim os cálculos. Isto também pode corrigir a acumulação de erros em cálculos da geometria de grandes estruturas.

¹⁷ Como descrito, estas camadas de sensores devem ser penetradas por fios, o que pode parecer representar um problema de segurança: e se algo passasse pelos sensores, corroendo um fio? Na prática, tudo o que possa transmitir sinais e energia (incluindo fibras óticas, sistemas de transmissão mecânica e assim por diante) poderia ser utilizado em vez de fios. Estes canais podem ser protegidos baseando-se em materiais com propriedades extremas: se um fio muito fino for feito do material mais condutor, ou se um sistema de transmissão mecânica for feito do material mais resistente (e utilizado perto da sua tensão de rutura), qualquer tentativa de substituir um segmento por outra coisa (como um replicador que escapa) resultará numa maior resistência elétrica ou numa peça fraturada. Assim, os próprios sistemas de transmissão podem atuar como sensores. Por uma questão de redundância e diversidade de projeto, diferentes camadas de sensores podem ser penetradas por diferentes sistemas de transmissão, cada um transmitindo sinais e energia ao seguinte.

¹⁸ Mas como fazer as pessoas esquecerem? Isto não é realmente necessário, pois o seu conhecimento seria disperso. No desenvolvimento de sistemas de hardware modernos, equipas diferentes trabalham em peças diferentes; não precisam de saber qual é a peça da outra equipa (muito menos como é feita), porque só a forma como interage é realmente importante para elas. Desta forma, as pessoas chegaram à Lua, embora nenhuma pessoa ou equipa soubesse alguma vez completamente como fazê-lo; o mesmo poderia acontecer com os montadores.

Como os primeiros projetos dos montadores serão documentos históricos, talvez seja melhor armazená-los em segurança, em vez de os destruir. Eventualmente, podem tornar-se parte da literatura aberta. Mas ocultar a informação de projeto será, na melhor das hipóteses, uma solução paliativa, uma vez que os métodos utilizados para o projeto do primeiro sistema montador serão mais difíceis de manter em segredo. Além disso, os laboratórios de montadores selados podem ser utilizados para desenvolver e testar máquinas que podem fabricar montadores, até mesmo máquinas que podem ser fabricadas sem montadores.

¹⁹ Os laboratórios montadores selados podem funcionar apesar disso. Não protegem o seu conteúdo do exterior; na verdade, são concebidos para o destruir quando adulterados. Em vez disso, protegem o exterior do seu conteúdo — e os seus espaços de trabalho selados são demasiado pequenos para albergar qualquer sistema de grande escala, malicioso ou não.

²⁰ Nos exemplos referidos, as entidades organizadas foram confrontadas com entidades semelhantes. Estas entidades poderiam, naturalmente, ser vaporizadas por bombas de hidrogénio, mas, perante a perspetiva de retaliação, nenhum atacante viu vantagem em lançar um ataque nuclear.

Capítulo 12

¹ Em princípio, esta poderia ser uma forma mínima de ocupação, controlando apenas os laboratórios de investigação, mas mesmo isso exigiria um grau de coerção aproximadamente equivalente à conquista.

² Poderá ser possível conceber formas de inspeção que deem a um grupo uma grande confiança naquilo que um sistema em desenvolvimento será (e não será) capaz de fazer, sem que esse grupo aprenda como esses sistemas são feitos. O desenvolvimento compartimentado dos componentes de um sistema poderia, em princípio, permitir que vários grupos cooperassem sem que nenhum grupo fosse capaz de construir e utilizar um sistema semelhante de forma independente.

³ Para uma discussão sobre naves espaciais autónomas, ver "Expanding Role for Autonomy in Military Space", de David D. Evans e Major Ralph R. Gajewski (Aerospace America, pp. 74-77, Fev. 1985). Ver também "Can Space Weapons Serve Peace?", de K. Eric Drexler (L5 News, vol. 9, pp. 1-2, jul. 1983).

⁴ Dizer que um escudo simétrico, com 50% de eficácia, seria inútil é como dizer que uma redução bilateral de 50% dos mísseis nucleares — um verdadeiro avanço no controlo de armas — seria inútil. A praticabilidade de tal escudo é outra questão. Até que escudos ativos realmente bons se tornem possíveis, a questão não é tornar um ataque nuclear inofensivo, mas, na melhor das hipóteses, torná-lo menos provável.

⁵ De facto, o Presidente Reagan falou em ceder tecnologia de defesa espacial dos EUA à União Soviética. Veja-se o *New York Times*, p. A15, 30 de março de 1983. Ver também — Partilhando "Star Wars, a tecnologia com os soviéticos é uma possibilidade distante, diz chefe do grupo de estudos do Pentágono", por John Horgan (The Institute, p. 10, março de 1984). Richard Ullman, professor de relações internacionais na Universidade de Princeton, propôs um programa de defesa conjunto com uma ampla partilha de tecnologia; ver "ONU — making missiles" (New York Times, p. A23, 28 de Abril de 1983).

Em princípio, um projeto conjunto poderia prosseguir com pouca transferência de tecnologia. Existe uma grande diferença entre (1) saber o que um dispositivo não pode fazer, (2) saber o que pode fazer, (3) saber o que é e (4) saber como o fabricar. Este define quatro níveis de conhecimento, cada um (mais ou menos) independente dos níveis acima dele. Por exemplo, se lhe entregasse uma caixa de plástico, um exame superficial poderia convencê-lo de que não pode voar ou disparar balas, mas não lhe diria o que pode fazer. Uma demonstração poderia, então, convencê-lo de que pode servir como telefone sem fios. Ao inspecioná-la mais de perto, poderia acompanhar os seus circuitos e obter uma excelente ideia do que é e de quais são os seus limites operacionais. Mas ainda não saberia necessariamente como fabricá-la.

A essência de um escudo ativo reside naquilo que não pode fazer — isto é, que não pode ser utilizado como arma. Para conduzir um projeto conjunto de escudo ativo baseado em componentes de alta tecnologia, seria necessário partilhar conhecimento principalmente nos níveis (1) e (2). Isto requer pelo menos uma partilha limitada no nível (3), mas não necessariamente no nível (4).

⁶ Como as questões do seu controlo, propósito e fiabilidade, e a questão fundamental da compreensão e aceitação política.

Capítulo 13

¹ Conforme citado pelo director da NSF, John B. Slaughter (Time, p. 55, 15 de Junho de 1981).

² Subintitulado "Scientists in the Political Arena", por Joel Primack e Frank von Hippel (Nova Iorque: Basic Books, 1974).

³ Em *Creating Alternative Futures: The End of Economics* (New York: Berkley Publishing, 1978).

⁴ Em *The Human Future Revisited: The World Predicament and Possible Solutions* (New York: Norton, 1978).

⁵ Para uma discussão sobre os fracassos na central nuclear de Three Mile Island, e uma discussão sobre (1) o notável grau de concordância sobre os problemas alcançado por um painel de especialistas, (2) como os media distorceram a história e (3) como o governo federal falhou em responder à realidade, ver "Saving American Democracy", de John G. Kemeny, reitor do Dartmouth College e presidente da comissão presidencial em Three Mile Island (Technology Review, pp. 65-75, Junho/Julho de 1980). Conclui que "o sistema atual não funciona".

⁶ Pior ainda, duas pessoas podem concordar sobre os factos e valores básicos (por exemplo, que a riqueza é boa e a poluição é má) e, ainda assim, discordar sobre a construção de uma fábrica — uma pessoa pode estar mais preocupada com a riqueza e a outra com a poluição. Nos debates emocionais, isto pode levar cada um dos lados a acusar o outro de valores pervertidos, como favorecer a pobreza ou não se importar com o ambiente. A nanotecnologia irá amenizar estes conflitos, alterando as compensações. Como podemos ter muito mais riqueza e muito menos poluição, os antigos adversários podem concordar com mais frequência.

⁷ Ver "The Scientific Community Metaphor", de William A. Kornfeld e Carl Hewitt (MIT AI Lab Memo n.º 641, Janeiro de 1981); ver também a discussão sobre o "raciocínio do devido processo" em "The Challenge of Open Systems", de Carl Hewitt (Byte, vol. 10, pp. 223-41, Abril de 1985).

⁸ Podem utilizar comunicações escritas, como nos diários, em vez de reuniões presenciais: julgar a verdade de uma declaração pela forma como é dita é útil nos tribunais, mas desempenha um papel menor na ciência.

⁹ Fê-lo em meados da década de 1960. Ver a sua discussão em "Controlling Democratic Technology" (American Scientist, Vol. 63, pp. 505-9, Set.-Out. 1975).

¹⁰ Este é o uso original do termo "tribunal científico", e muitas críticas à ideia do devido processo legal derivaram deste aspeto da proposta. A abordagem do fórum de factos é genuinamente diferente; o Dr. Kantrowitz está atualmente a desenvolvê-la sob o nome de "Procedimento Científico Adversário".

¹¹ Que, em 1960, tinha elaborado uma proposta de programa espacial para a Força Aérea. Salientava que aprender a montar sistemas em órbita terrestre (como estações espaciais e naves lunares) era, pelo menos, tão importante como construir propulsores maiores. Durante o debate subsequente sobre como chegar à Lua, Kantrowitz argumentou que a montagem em órbita terrestre seria talvez dez vezes mais barata do que a abordagem de encontro com um foguetão gigante e órbita lunar que foi finalmente escolhida. Mas os fatores políticos intervieram, e o assunto nunca recebeu uma audiência pública adequada. Ver "Arthur Kantrowitz Propõe um Tribunal Científico", uma entrevista com K. Eric Drexler (L5 News, Vol. 2, p. 16, Maio de 1977).

Para um relato de outro abuso na tomada de decisões técnicas durante a Apollo, ver The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age, de William McDougall, pp. 315-316 (Nova Iorque: Basic Books, 1985).

¹² Isto é descrito em "The Science Court Experiment: An Interim Report" (O Experimento do Tribunal Científico: Um Relatório Interino), pela Força-Tarefa do Grupo Consultivo Presidencial sobre Avanços Antecipados em Ciência e Tecnologia (Science, Vol. 193, pp. 653-56, 20 de agosto de 1976).

¹³ Ver os Anais do Colóquio sobre o Tribunal Científico, Leesburg, Virgínia, 20 e 21 de setembro de 1976 (National Technical Information Center, documento número PB261 305). Para um resumo e discussão das críticas expressas no colóquio, ver "The Science Court Experiment: Criticisms and Responses", de Arthur Kantrowitz (Bulletin of the Atomic Scientists, vol. 33, pp. 44-49, Abril de 1977).

¹⁴ A formação do Instituto de Efeitos na Saúde de Cambridge, Massachusetts, criado em 1980 para reunir adversários no domínio da poluição atmosférica, foi um passo nesse sentido. Ver "Health Effects Institute Links Adversaries", de Eliot Marshall (Science, vol. 227, pp. 729-730, 15 de Fevereiro de 1985).

¹⁵ Uma questão em aberto é até que ponto os procedimentos não públicos que incorporam alguns princípios do devido processo legal podem melhorar o julgamento de informações confidenciais.

¹⁶ Reportado em "Science court, would tackle knotty technological issues", por Leon Lindsay (Christian Science Monitor, p. 7, 23 de Março de 1983).

[Nota: Informações mais recentes estão disponíveis na Web em "[Retrospectiva de vinte e cinco anos sobre o Tribunal Científico](#)"]

¹⁷ Ver Getting to Yes (Boston: Houghton Mifflin Company, 1981).

¹⁸ Os procedimentos aqui descritos tratam as questões como bilaterais, mas isto pode parecer muito limitado, porque as "questões", tal como são comumente entendidas, têm frequentemente muitos lados. No debate sobre a energia, por exemplo, o gás, o carvão, a energia nuclear e a energia solar têm os seus defensores. No entanto, as questões multilaterais contêm muitas questões bilaterais: a probabilidade de um colapso do reator é baixa ou elevada? Os efeitos da queima de carvão na chuva ácida são pequenos ou grandes? Um coletor solar custará pouco ou muito? As reservas de gás são pequenas ou grandes? As questões multilaterais resolvem-se, portanto, frequentemente nas suas raízes factuais em microquestões numéricas.

Cientistas e engenheiros criteriosos raramente argumentarão a favor de números altos ou baixos como tais; argumentarão a favor dos números específicos que consideram mais prováveis ou simplesmente apresentarão provas. Mas, como a realização de um fórum pressupõe uma disputa, os defensores estarão envolvidos e, frequentemente, desejarão ir longe numa direção — os defensores da energia nuclear gostariam de provar que os reatores são muito baratos e seguros; os seus

adversários gostariam de provar que são demasiado caros e mortais. Como os números que medem o custo e o risco só podem ser maiores ou menores, estas microquestões tendem a ser bilaterais.

Capítulo 14

¹ É professor na Universidade de Tóquio e chefe principal do Projeto de Computadores de Quinta Geração do Japão.

² A sua abordagem ao hipertexto, atualmente em fase de demonstração, é designada por sistema Xanadu. Examinei as estruturas de dados proprietárias em que o sistema se baseia e é evidente que sistemas de hipertexto poderosos são de facto possíveis. Para um sistema menos ambicioso, mas ainda assim bastante poderoso, ver "A Network-Based Approach to Text Treatment for the Online Scientific Community", uma tese de Randall H. Trigg (University of Maryland, Department of Computer Science, TR-1346, Nov. 1983).

³ Ver Computer Lib/Dream Machines (publicação independente, distribuída pela The Distributors, South Bend, Indiana, 1974) e Literary Machines (Swarthmore, Pensilvânia: Ted Nelson, 1981). Computer Lib oferece uma visão divertida e peculiar dos computadores e do seu potencial, incluindo o hipertexto; uma nova edição está em preparação. Literary Machines concentra-se no hipertexto.

⁴ na p. 76, June 13, 1983.

⁵ Um sistema de hipertexto pode armazenar a informação mais utilizada em casa ou numa biblioteca local. Os discos compactos, como os utilizados para gravações áudio, custam cerca de três dólares a fabricar e podem armazenar tanto texto como cerca de 500 livros. Ver "Análise de Áudio II: Discos Ópticos de Leitura Apenas", de Christopher Fry (Computer Music Journal, Vol. 9, Verão de 1985).

Capítulo 15

¹ Os limites ao crescimento exponencial asseguram que a abundância universal e incondicional não pode durar indefinidamente. Isto levanta questões relativas à distribuição e propriedade dos recursos espaciais. Três abordagens básicas podem ser consideradas:

Uma delas é a abordagem "primeiro a chegar, primeiro a ser servido", como a reivindicação de herdades ou locais de mineração através do uso. Esta tem raízes no princípio Lockeano de que a propriedade pode ser estabelecida misturando o trabalho de alguém com um recurso previamente não possuído. Mas isto pode permitir que uma pessoa com um replicador adequado o liberte no espaço para retrabalhar — e assim reivindicar — cada objeto não reclamado no universo, tão rapidamente quanto pudesse ser alcançado. Esta abordagem de "o vencedor leva tudo" tem pouca justificação moral e teria consequências desagradáveis.

Um segundo extremo seria distribuir a propriedade dos recursos espaciais igualmente entre todas as pessoas, e continuar a redistribuí-los para manter a igualdade. Isto, também, teria consequências desagradáveis. Na ausência de limitações universais, rigorosas e compulsórias na natalidade, alguns grupos continuariam a crescer exponencialmente; princípios evolutivos praticamente garantem isto. Em um tempo surpreendentemente curto, o resultado da redistribuição interminável seria arrastar o padrão de vida de cada ser humano para o nível mínimo que permite a qualquer grupo reproduzir-se. Isto significaria fome e pobreza mais extremas e universais do que as de qualquer país do Terceiro Mundo. Se 99 por cento da raça humana limitasse voluntariamente a sua taxa de natalidade, isso meramente permitiria que o um por cento restante se expandisse até absorver quase todos os recursos.

Uma terceira abordagem básica (que tem muitas variações) toma um caminho intermédio: envolve a distribuição da propriedade dos recursos do espaço (propriedade genuína, permanente e transferível) igualmente entre todas as pessoas — mas fazendo-o apenas uma vez, deixando as pessoas proverem para a sua progénie (ou a de outros) a partir da sua própria vasta quota da riqueza do espaço. Isto permitirá que diferentes grupos busquem futuros diferentes e recompensará os frugais em vez dos perdulários. Pode fornecer a base para um futuro de diversidade ilimitada para um futuro indefinido, se escudos ativos forem usados para proteger as pessoas da agressão e do roubo. Ninguém ainda expressou uma alternativa plausível.

De uma perspectiva socialista, esta abordagem significa riquezas iguais para todos. De uma perspectiva libertária, não viola os direitos de propriedade de ninguém e fornece uma base para um futuro de liberdade. Nos termos de Thomas Schelling, a divisão igual é uma solução de ponto focal num jogo de coordenação (ver "The Strategy of Conflict", de Thomas Schelling, Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1960). O que "divisão igual" realmente significa é uma questão complexa, melhor deixada para os advogados.

Para que esta abordagem funcione, será necessário um acordo não apenas sobre um princípio de divisão, mas sobre uma data. O espaço foi declarado por tratado como "património comum de toda a humanidade", e precisamos de escolher um Dia da Herança. A análise de Schelling sugere a importância, num jogo de coordenação, de encontrar uma proposta específica e plausível e de a tornar visível o mais rapidamente possível. Sugere-se uma data? Um aniversário de voo espacial com número redondo pareceria apropriado, se não estivesse ligado exclusivamente aos EUA ou à URSS, ou fosse demasiado cedo, ou demasiado perto de uma data milenar no calendário. Estas restrições podem ser cumpridas; o candidato mais plausível é talvez 12 de abril de 2011: o trigésimo aniversário do voo da primeira nave espacial reutilizável do mundo, o Space Shuttle, e o quinquagésimo aniversário do voo do primeiro humano ao espaço, Yuri Gagarin.

Se, antes desta data, alguém encontrar e empregar um meio para aumentar as taxas de reprodução humana por um fator de dez ou mais, então o Dia da Herança deve ser imediatamente tornado retroativo a 12 de abril do ano anterior, e a papelada resolvida mais tarde.

² Os escudos ativos só conseguem fazer isto de forma fiável através do uso de redundância e amplas margens de segurança.

³ Para uma discussão sobre a aparente impossibilidade das máquinas do tempo na relatividade geral, ver "Singularities and Causality Violation", de Frank J. Tipler em *Annals of Physics*, Vol. 108, pp. 1-36, 1977. Tipler tem uma mente aberta; em 1974, defendeu o outro lado do caso.

⁴ Os padrões fractais têm partes semelhantes em diferentes escalas — tal como um ramo pode assemelhar-se a um ramo que, por sua vez, se assemelha a uma árvore, ou como as ravinas, riachos e rios podem ecoar as formas uns dos outros. Ver "The Fractal Geometry of Nature", de Benoit B. Mandelbrot (São Francisco: W. H. Freeman, 1982).