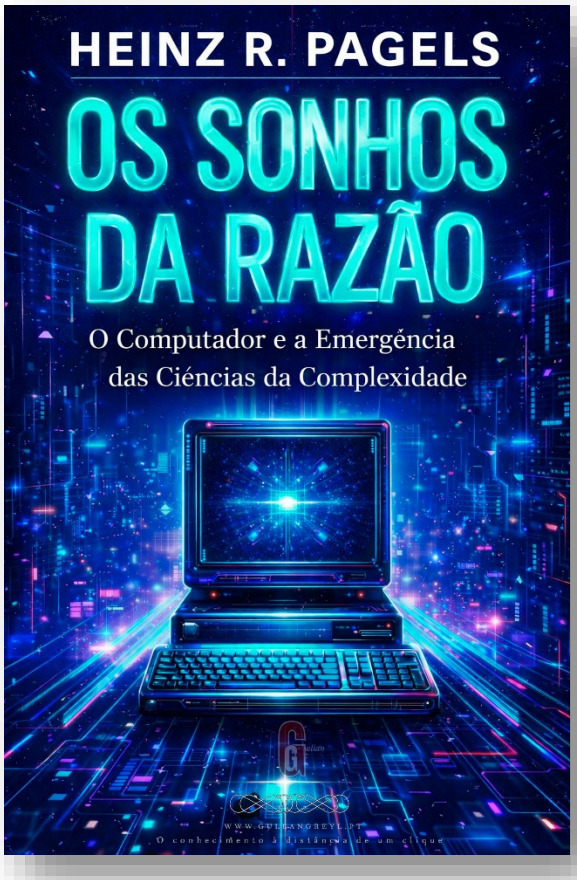


OS SONHOS DA RAZÃO

O Computador e a Emergência
das Ciências da Complexidade

Digitalizado, Corrigido e Adaptado por
Gullan Greyl
http://www.gullangreyl.pt

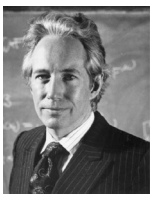
1ª Edição, 1987

05-11-2023

SINTESE

A conjunção da tecnologia do computador com o nascimento de novas disciplinas científicas está a mudar de forma determinante a nossa visão da realidade. Em *Os Sonhos da Razão*, o físico norte-americano Heinz Pagels faz um relato brilhante desta nova fronteira da complexidade e explica com entusiasmo e clareza os mais recentes desenvolvimentos sofridos pela ciência e as suas consequências no homem de hoje. Descreve com elegância o impacto filosófico e científico do computador nas sociedades atuais e oferece um retrato da civilização que surgirá desta síntese da tecnologia e das novas ciências da complexidade.

Ao contrário dos instrumentos de pesquisa convencionais, o computador pode *simular* a realidade, criando modelos de sistemas complexos como o cérebro ou o corpo humano, as macromoléculas, os sistemas caóticos e os padrões de evolução e de crescimento da população. Nesta sua obra, Pagels demonstra como esta capacidade alterará de forma radical o mundo do negócio, as telecomunicações, a ciência, as profissões em geral e até as forças armadas e conta como as nações e os povos que dominam as novas ciências da complexidade serão, no próximo século, as superpotências económicas, culturais e políticas. *Os Sonhos da Razão* constitui, pois, uma visão aliciante e acessível do futuro do homem, do computador e da própria ciência.



HEINZ R. PAGELS

Heinz Pagels, falecido em julho de 1988, era Diretor Executivo da Academias das Ciências de Nova Iorque e professor na Universidade de Rockefeller. Exercia igualmente o cargo de presidente da Liga Internacional dos Direitos do Homem e escreveu, entre outros, *O Código Cósmico* e *Simetria Perfeita*, ambos publicados nesta coleção.

Índice

Prefácio 1

RECORDAÇÕES INTRODUTÓRIAS 6

CAPÍTULO 1 6

– BIG SUR E AS MAÇÃS DE CÉZANNE – 6

PRIMEIRA PARTE – AS CIÊNCIAS DA COMPLEXIDADE – 23

CAPÍTULO 2 23

– UMA NOVA SÍNTESE DA CIÊNCIA – 23

CAPÍTULO 3 46

– ORDEM, COMPLEXIDADE E CAOS – 46

CAPÍTULO 4 67

– A VIDA PODE SER BASTANTE ILINEAR – 67

CAPÍTULO 5 87

– SIMULANDO A REALIDADE – 87

Simulando a Inteligência 90

Recristalização Simulada 95

Autómatos Celulares, Vida Artificial e Biologia Computacional 98

Modelando Moléculas 110

Sistemas Periciais: Modelando a Destreza 114

CAPÍTULO 6 120

– CONEXIONISMO / REDES NEURAIS – 120

Redes de Hopfield 137

Máquinas de Boltzmann 142

Os Sistemas Imunitário e Evolucionário 144

CAPÍTULO 7 154

– A “MASSA” RÁPIDA TORNA-SE MAIS RÁPIDA – 154

SEGUNDA PARTE – FILOSOFIA E ANTIFILOSOFIA – 165

CAPÍTULO 8 165

– O CÓDIGO DE CONSTRUÇÃO DO DEMIURGO – 165

CAPÍTULO 9 198

– ESPERANDO O MESSIAS – 198

CAPÍTULO 10 229

– O HOMEM QUE CONFUNDIU O SEU CÉREBRO COM A SUA MENTE – 229

CAPÍTULO 11 272

– O CORPO NUNCA MENTE – 272

CAPÍTULO 12 307

– GUERREIROS DO INFINITO – 307
CAPÍTULO 13 353
– OS INSTRUMENTOS DA CRIAÇÃO – 353
ALGUMAS REFLEXÕES EM CONCLUSÃO 369
CAPÍTULO 14 369
– OS SONHOS DA RAZÃO – 369
Bibliografia 380

Prefácio

Dá a sensação de que vivemos em dois mundos diferentes — o mundo da nossa mente e o mundo natural das coisas. Este dualismo, que é uma falha na ordem apreendida da realidade, representa um desafio persistente ao pensamento ocidental. Poderemos aceitá-lo?

Os cientistas naturais, em geral, são de opinião de que toda a vastidão do universo, desde o seu começo no tempo até ao seu fim último, desde as mais pequenas partículas quânticas até às maiores galáxias, está sujeita a regras — as leis naturais — compreensíveis para a mente humana. Tudo se ordena no universo de acordo apenas com essas regras. A vida na Terra é vista como uma complexa reação química que conduziu à evolução, à diferenciação das espécies e à eventual emergência da humanidade, com as suas instituições legais, religiosas e culturais. Creio que esta visão reducionista e materialista da natureza está, no essencial, correta.

Outras pessoas, com igual empenho intelectual, mantêm a opinião de que a própria ideia de natureza não passa de uma noção presente nas nossas mentes e que todo o nosso pensamento sobre a realidade material transcende necessariamente essa realidade. Para além disso, de acordo com esta visão, a matriz cultural da arte, da lei, da religião, da filosofia e da ciência forma um universo invisível de significados, devendo ser encontrada nesta ordem da mente a verdadeira base do ser. Também creio que esta visão transcendental, que afirma a prioridade epistemológica da mente sobre a natureza, está correta.

Estas duas visões da realidade — a natural e a transcendental — estão em conflito profundo e evidente. A mente, ao que parece, transcende a natureza. No entanto, de acordo com as ciências naturais, esse reino transcendente tem de ser suportado materialmente, e como tal está sujeito às leis naturais. A resolução deste conflito é, e continuará a ser, um dos principais desafios que se deparam à nossa civilização durante os próximos séculos. A grande tentação será a de resolver o conflito pela eliminação das diferenças entre as duas visões em benefício de um ou de outro ponto de vista e depois divulgar o resultado. Buda, diz-se, quando confrontado com uma tentação semelhante, levantou bem alto uma flor e sorriu, indicando que nem o dualismo nem o não dualismo fornecem uma solução. Essa

compreensão, no entanto, constitui para nós o início de um inquérito, e não o seu fim.

As novas ciências da complexidade emergentes e a ordem do ser que elas estudam são o primeiro passo para a resolução deste problema. Mas que são as ciências da complexidade?

A ciência explorou o microcosmo e o macrocosmo; temos um bom sentido da geografia do mundo. A grande fronteira inexplorada é a complexidade. Exemplos de sistemas complexos são o corpo e os seus órgãos, especialmente o cérebro, a economia, a população e os sistemas evolutivos, o comportamento animal, as moléculas de grandes dimensões — tudo objetos complicados. Alguns destes sistemas podem ser simulados em computadores e facilmente modelados com bastante exatidão; outros não podem ser modelados por nada mais simples que o próprio sistema. Os cientistas, num novo esforço interdisciplinar, começaram a enfrentar o desafio dos sistemas complexos e, o que é notável, estão a compreender como é que a complexidade pode emergir da simplicidade. Por exemplo, os autómatos celulares, um conjunto artificial de pontos num ecrã que se rearranjam de acordo com regras simples e bem definidas, são um exemplo de comportamento complexo que emerge da simplicidade. A evolução da vida e da cultura pode ser um outro exemplo; neste caso trata-se de um autómato celular tridimensional feito de átomos, em vez de pontos num ecrã, e que preenche a totalidade do universo. Toda a existência pode ser vista como um sistema complexo construído a partir de componentes simples.

Alguns dos temas das novas ciências da complexidade — a importância de princípios organizativos no mundo, a visão computacional das matemáticas e dos processos físicos, a ênfase nos sistemas de redes paralelas, a importância da dinâmica ilinear e dos sistemas seletivos, a nova compreensão do caos, a matemática experimental, as ideias conexionistas, as redes neurais e os processos de distribuição paralela — são descritos na primeira parte deste livro. Ninguém pode dizer para onde caminham todos estes novos desenvolvimentos. Mas eles anunciam uma nova síntese da ciência que irá alterar a nossa maneira tradicional de organizar a realidade. Institutos e centros para a pesquisa da complexidade estão já a surgir nas instituições académicas e em empresas de todo o mundo — trata-se de uma amostra do que está para a vir.

Neste livro vou focar três temas principais: primeiro, a ascensão das ciências da complexidade que estão no limiar da nova fronteira do

conhecimento; segundo, o papel do computador como instrumento de investigação e o reordenamento do conhecimento que esse instrumento implica, e, finalmente, a filosofia. O principal instrumento de trabalho das ciências da complexidade é o computador. Ele está a alterar a arquitetura das ciências e a imagem que formamos da realidade material. Desde a ascensão da ciência moderna, há três séculos atrás, que os instrumentos de investigação, como os telescópios e os microscópios, eram analíticos e promoviam uma visão reducionista da ciência. A física, por lidar com as entidades mais pequenas e últimas, era a ciência mais fundamental. A partir das leis da física podiam-se deduzir as leis da química, depois as da vida, e por aí fora, numa escala ascendente. Esta visão da natureza não está errada; mas foi poderosamente moldada pela instrumentação e tecnologia disponíveis.

O computador, com a sua capacidade de processar enormes quantidades de informação e de simular a realidade, fornece-nos uma nova janela sobre esta visão da natureza. Podemos começar a ver a realidade de uma outra maneira simplesmente porque o computador produz conhecimento de maneira diferente dos instrumentos analíticos tradicionais. Fornece uma nova perspetiva da realidade. Irei descrever algumas das utilizações do computador — simulação da inteligência, simulação da recristalização, modelação molecular, simulação computacional de vida real e artificial, descoberta do caos determinístico, dinâmica ilinear, modelação da evolução, redes neurais, máquinas de Boltzmann, matemática experimental, só para enumerar alguns exemplos. A tecnologia que emerge destas aplicações terá profundas repercussões no mundo comercial e nos negócios, na atividade de serviços financeiros, no exercício de profissões jurídicas e no campo militar. O mundo vai ser transformado. Como um novo método de produção, o computador cria não só uma nova classe de pessoas que lutam pela sua aceitação social e intelectual, mas também uma nova forma de pensar sobre o conhecimento. Vai transformar o empreendimento científico e fazer avançar uma nova visão do mundo.

A segunda parte do livro trata do impacto das ciências da complexidade na filosofia da ciência. A filosofia da ciência vive tempos difíceis, abandonada mesmo pelos filósofos profissionais, alguns dos quais pensam que chegou ao fim. Em tempos serva da teologia, a filosofia transformou-se, neste século, numa meretriz da ciência, estando hoje praticamente abandonada. Os cientistas ativos, como eu próprio, tendem a ser antifilósofos, rejeitando muitas vezes os esforços dos filósofos profissionais para clarificar e interpretar os nossos empreendimentos. Isto nem sempre se passou assim.

Há poucas décadas, muitos cientistas, especialmente os da minha tribo — os físicos —, estavam intelectualmente interessados, debatiam e escreviam sobre a filosofia da ciência. Hoje, o fiel da balança moveu-se do pensar para o fazer. As atividades externas dos cientistas estão mais inclinadas para a ética e menos para a filosofia. Alguns envolveram-se em polémicas — o ambiente, a guerra e a paz e os direitos humanos. Por isso, o facto de alguém, particularmente um "antifilósofo", estar hoje a escrever sobre a filosofia da ciência exige uma explicação.

Pensar e fazer ciência tornaram-se duas atividades profissionais muito distintas — uma, filosófica, a outra, de investigação empírica. Este cisma entre a filosofia da ciência e a ciência propriamente dita deve-se a Kant, há mais de dois séculos, tendo persistido até hoje. Creio que essas duas atividades se tornarão menos distintas no futuro, como resultado das novas ciências da complexidade. Gostaria de que assim fosse. Filósofos e cientistas podem começar a trabalhar mais diretamente, especialmente nas ciências cognitivas. Poder-se-á vir a concluir que a filosofia ainda não chegou ao fim, que é reintegrada no campo de atividade da ciência, o sítio onde estava antes do cisma kantiano.

Não sou um filósofo, e o que estou a escrever neste livro não se pode chamar de filosofia profissional, porque não contém suficiente argumentação de pormenor. Mas estou a tentar expor a nova visão da ciência que está a emergir do estudo da complexidade e a usar os temas e problemas da filosofia tradicional para o fazer — a natureza da realidade física, o problema da cognição, o problema do corpo-mente, o carácter da investigação científica, a natureza das matemáticas e o papel dos instrumentos na investigação.

Sou profundamente parcial nas minhas opiniões devido à minha formação de físico profissional. Como físico, estou mais à vontade a escrever sobre as ciências naturais. Mas alguns dos novos desenvolvimentos mais entusiasmantes nas ciências da complexidade tratam de comportamentos sociais, económicos e psicológicos. Curiosamente, a natureza interdisciplinar destas novas ciências passará em certos casos por cima das distinções tradicionais entre ciências sociais e ciências naturais. Este facto será aplaudido por uns e visto com horror por outros.

Um tema que persiste no meu pensamento sobre ciência é a noção de ""sistema seletivo", uma generalização da ideia de Darwin-Wallace de seleção natural a um sistema geral de reconhecimento de padrões. A própria

ciência empírica é um exemplo desse sistema seletivo. Em vez de selecionar espécies, a ciência natural seleciona teorias da natureza, que constituem o nosso reportório da realidade. A ciência empírica pode ser vista como um sistema seletivo que se destina a encontrar as regras invariantes da ordenação do universo. Enquanto estas ideias são familiares em biologia, o impacto nas ciências sociais e psicológicas de uma visão baseada em sistemas seletivos só agora se está a iniciar. Demorou muito a chegar, mas vai provocar mudanças profundas, a que alguns cientistas mais tradicionalistas oferecerão resistência.

Acredito que o problema do dualismo da mente e da natureza não será propriamente resolvido, antes acabará por desaparecer. Problemas fundamentais já desapareceram anteriormente. Há séculos atrás, os filósofos naturais debatiam a distinção entre “substância” e “aparência”, uma distinção que desapareceu com o amadurecimento da ciência empírica. Da mesma maneira, a distinção radical entre mente e natureza desaparecerá com o desenvolvimento das novas ciências da complexidade e com as categorias de pensamento que esse desenvolvimento impõe. À medida que aumentamos o nosso conhecimento sobre o modo como o mundo mental do significado é suportado e representado materialmente, um conhecimento que provém das ciências neurológicas, das ciências cognitivas, das ciências computacionais, da biologia, das matemáticas e da antropologia, para só enunciar algumas das ciências subsidiárias, terá por efeito uma nova síntese da ciência, uma nova civilização cosmopolita e uma nova visão cultural do mundo. Estou convencido de que as nações e pessoas que dominarem as novas ciências da complexidade se tornarão as superpotências económicas, culturais e políticas do próximo século. O propósito deste livro é articular os fundamentos desta nova síntese do conhecimento e lançar uma primeira olhada à civilização que a partir dessa síntese vai surgir.

RECORDAÇÕES INTRODUTÓRIAS

CAPÍTULO 1

– BIG SUR E AS MAÇÃS DE CÉZANNE –

Quando o pénis se levanta, a razão sai pela janela fora.

ROBERT M. HUTCHINS, da curta metragem satírica Zuckerkandel

Na separação de duas das maiores placas tectónicas do planeta, a Califórnia é um sítio geologicamente violento onde a estabilidade do terreno é apenas temporária. Aqui a placa do Pacífico, deslizando contra a massa continental terrestre ao longo da falha de Santo André, vai-se movendo para norte, acabando finalmente, na vizinhança das ilhas Aleútes, por mergulhar nas profundezas em fusão da Terra. A atividade geológica da Califórnia produz um dos encontros mais espetaculares entre terra e mar que já vi, especialmente a costa perto de Big Sur, a sul da cidade de Carmel e a norte da baía do Morro. Aqui as montanhas de Santa Lúcia, que há muito se moveram para norte com a placa, sobem uns trezentos metros para cima do Pacífico, num confronto direto com a força irresistível do mar.

Big Sur é um local maravilhoso, em geral ainda primitivo, que deve muita da sua magia ao seu tipo particular de luz — difusa no Inverno e nas neblinas matinais, lúcida e intensa nas tardes de Verão. As montanhas estão cobertas com ervas, secas e douradas no quente sol de Verão. Zonas mais frescas de floresta, sombreadas por cedros, pinheiros, carvalhos e pau-brasil, dão abrigo à vida selvagem. À beira da costa fica a estola gigante, um manto de algas que cobre o oceano, ondulando num padrão complexo em sintonia com as ondas. É uma costa rochosa interrompida pontualmente por praias ocasionais, que abrigam uma fauna marinha rica e variada, incluindo lagoeiros repletos de ouriços-do-mar de cor púrpura, estrelas-do-mar, caranguejos-eremitas, palmas marinhas e alguns moluscos californianos. Pelicanos, pássaros que parecem ter esquecido a evolução, patrulham a rebentação, enquanto corvos marinhos repousam nas

falésias, esperando o peixe que é atraído para as correntes ricas em plâncton que sobem das profundidades.

O principal vestígio da presença humana é a estrada costeira (estrada n.º 1), que foi construída na década de 30 por meio de trabalhos forçados, como parte do sistema de defesa costeira, e que é o único meio de acesso rápido à região. Com a estrada veio gente, sobretudo artistas e boémios, que se juntaram aos rancheiros que lá estavam; foram construídas umas tantas estalagens, restaurantes e casas, mas os invernos inóspitos e húmidos, assim como a inacessibilidade e a falta de empregos, travaram o grande desenvolvimento que a Califórnia conheceu noutros locais e impediram a chegada de mais gente.

Tendo vindo da costa leste, eu nunca ouvira falar de Big Sur até 1960, o meu primeiro ano como aluno de pós-graduação de Física na Universidade de Stanford. Tinha então 21 anos. Estudantes de pós-graduação como eu costumavam andar pelo velho fontanário da associação de estudantes esperando fazer amigos. Foi lá que conheci o Hal, que depois de ter servido numa unidade de informações do exército se tornou um perene estudante de Stanford. O Hal era um californiano de segunda geração e de ascendência irlandesa. Tinha uma pele profundamente bronzeada, cabelo negro e olhos azuis e, na tradição dos poetas irlandeses, era um rebelde aventureiro.

O Hal, que conhecia a zona de Big Sur, convidou-me um dia para passar lá um fim-de-semana prolongado; na realidade, ele ia fazer de Virgílio para o meu Dante. Possuía uma série de *Volkswagens* modificados de acordo com as suas próprias especificações — os tejadilhos, por exemplo, eram cortados pela base dos vidros — e equipados com motores *Porsche* exagerados para aquele tipo de veículos. Nos bordos despidos dos carros depois de cortados o Hal punha caixilhos de madeira branca polida que faziam com que os carros parecessem banheiras com rodas — banheiras muito rápidas, diga-se. Uma dessas banheiras seria o nosso meio de transporte.

A caminho de Stanford para Big Sur fomos por estradas secundárias (o Hal parecia conhecê-las todas) através dos campos de alcachofras que rodeavam a baía de Monterey. O cheiro

salgado do mar enchia o ar. Em Monterey passámos grande parte da manhã a explorar as velhas fábricas de conservas onde em tempos tinha sido enlatado o peixe que alimentou os Ingleses durante a Segunda Guerra Mundial. Não passavam agora de ruínas salgadas que, uma vez cumprida a sua tarefa, eram reclamadas pelo mar próximo. Isto era a região de John Steinbeck, um sítio rústico explorado por pessoas do submundo, um ponto de encontro dos vencidos da vida e de alguns vencedores. (Hoje, algumas das fábricas, restauradas, são uma atração turística burguesa; o aquário da baía de Monterey, inaugurado em 1985, mostra a fauna marinha da região.) O Hal conhecia alguns pescadores italianos que abasteciam os restaurantes e ainda se lembrava dos dias em que a baía estava cheia de peixe.

Depois de Monterey dirigimo-nos para sul pela estada n.º 1, passámos Carmel e a igreja carmelita, Point Lobos e os seus ciprestes obstinados, o farol de Point Sur, e entrámos nas montanhas de Santa Lúcia, que caíam a pique sobre o mar, com as ondas a ribombar nas rochas centenas de metros mais abaixo. Tudo se tornou estranhamente silencioso, como se tivéssemos entrado num espaço e num tempo primitivos, com todo o pensamento de regresso desaparecido. Tínhamos ultrapassado um limiar. Mas onde é que eu tinha estado?

O filósofo dinamarquês Kierkegaard notou uma vez que a ironia da vida consiste no facto de ser vivida para a frente mas compreendida para trás. Em retrospetiva, foi importante para mim ter conhecido Big Sur naquela altura da minha vida; o poder da natureza abriu-me para os meus próprios sentimentos e reflexões sobre a existência. Eu era jovem, um idealista intelectual muito verboso (era mais nessa época do que sou agora), empenhado numa grande aventura da mente humana. Na escola de pós-graduação frequentei as disciplinas que mais me desafiavam — física de alta energia e a sua linguagem matemática da teoria quântica de campos; não conseguia imaginar-me a fazer mais nada além de investigação em física. Ganhar dinheiro parecia-me desnecessário e desinteressante, tal como a muitos dos meus contemporâneos que tinham crescido nos anos de grande abundância da América do pós-guerra. Existiam ideias

intelectualmente estimulantes no ar, problemas que esperavam por ser resolvidos, reputações para serem feitas.

As universidades da costa oeste estavam a retirar às universidades da costa leste os seus docentes mais talentosos. Em Stanford os físicos planeavam o "monstro", um acelerador linear gigantesco que impulsionava eletrões ao longo de um tubo de três quilómetros até um alvo. Foi aqui que os *quarks*, os constituintes de matéria nuclear, foram descobertos. Os biólogos tinham desvendado o código genético; a biologia nuclear dava grandes passos e uma abordagem fundamental do problema da vida estava a ser preparada. Os psicólogos exploravam novos terrenos com a teoria da dissonância cognitiva. A econometria tinha nascido. Os engenheiros eletrotécnicos estavam profundamente empenhados no desenvolvimento de novas teorias de controle eletrónico e sistemas de informação. Fred Terman, o enérgico director da universidade, tinha conseguido uma mudança da legislação federal, no fim da década de 50, de forma a permitir à universidade arrendar propriedades num novo parque industrial: seria a semente para o crescimento de Silicon Vallery[1]. Desenvolveu uma ligação íntima entre as comunidades técnica e financeira, que falta noutras partes dos Estados Unidos e que assegurou o futuro do desenvolvimento da tecnologia de ponta nas vizinhanças de Stanford. Na região de Santa Clara os pomares de damasqueiros foram abatidos para dar lugar a habitações e escritórios. Uma nova revolução tecnológica baseada no computador eletrónico, que iria deslocar populações de cidades inteiras e transferir o centro do poder económico, criar e destruir empregos e transformar os meios bélicos, esteve prestes a deflagrar.

Para além da física teórica, sentia-me atraído por outros prazeres intelectuais. Sobretudo arte e filosofia. Comecei a estudar pintura, tentando compreender a obra dos artistas contemporâneos e sair da jurisdição das minhas convenções visuais. Mais do que qualquer outro pintor foi Cézanne quem primeiro me ensinou que existiam diferentes formas de ver o mundo comum e que a imagem da minha experiência era o produto da minha cultura.

Um amigo meu, John Ketchum, organizava seminários na sua casa em Palo Alto, e eu lia aí Emmanuel Kant e Edmund Husserl, os filósofos transcendentais. Com os meus colegas, também estudantes de pós-graduação, aprendi fragmentos de programação dinâmica, econometria, biologia molecular e bioquímica. Assisti a algumas aulas na universidade, não para obter créditos, mas por divertimento, e lembro-me de que numa dessas cadeiras Donald Davidson, um filósofo analítico, tentou explicar o conceito semântico de verdade segundo Tarski a uma turma de estudantes de licenciatura: isto envolve a análise da oração: "A neve é branca se e só se a neve é branca." Nunca percebi o conceito semântico de verdade, nem a maior parte da filosofia da linguagem, com os seus níveis hierárquicos de verdade. Isto, no entanto, não foi por culpa dos meus professores de filosofia.

Suponho que a minha mente ficou incapaz para a filosofia por estudar demasiada física, com o seu pragmatismo simples (há quem diga ingénuo). Os físicos distinguem a física da matemática, a linguagem formal que usam para expressar as leis físicas. Os físicos teóricos, que frequentemente se deixam absorver totalmente pela beleza das matemáticas, perdendo de vista a física, fazem-me lembrar os filósofos da linguagem que perderam de vista o próprio mundo de que a linguagem trata. Todas as respostas que obtive quando perguntava o que os filósofos da linguagem realmente faziam me convenceram de que era a mesma coisa que os linguistas tinham sempre feito — perceber como é que as palavras são devidamente usadas.

Parecia-me óbvio que, se se pretendia compreender uma língua falada, se devia estudar as pessoas que a falam bem. Os tradutores simultâneos, muitas vezes empregados por instituições governamentais, são mestres da língua falada. Um deles, um cidadão soviético, é realmente notável, pois sabe dúzias de línguas, tanto orientais como ocidentais. Se se quiser perceber como é que as linguagens funcionam, este é o tipo de pessoa que deve ser conhecido e estudado. Depois de ouvir alguém falar, o intérprete traduz os comentários para qualquer língua que seja necessária — qualquer uma de entre dúzias. Como é que consegue isso? Segundo ele, "ouve" os comentários não como uma linguagem qualquer, mas como uma "matriz de significados"

— um qualquer formato conceptual que ele próprio cria. Quando lhe é pedido que traduza o discurso para uma dada linguagem, ele consulta a matriz e expressa o significado numa linguagem. Dá a sensação de que a língua falada é subordinada a um formato não verbal, uma estrutura lógica profunda que é independente de qualquer linguagem específica. Isto só era claro para poucas pessoas no início da década de 60, embora hoje seja mais bem aceite, especialmente depois dos trabalhos de Noem Chomsky.

Ironicamente, Wittgenstein, o pai da moderna filosofia da linguagem — o ponto de vista de que existe uma correspondência formal entre objetos, pensamentos e linguagem —, acabou o seu *Tractatus* com a frase: "Acerca daquilo de que não se pode falar tem de se ficar em silêncio." Isto foi profundamente incompreendido por muitos filósofos que tomaram este aforismo por um incitamento à eliminação da metafísica e da teologia. No entanto, o próprio Wittgenstein veio a acreditar nos seus últimos anos que a chave do conhecimento e da compreensão reside no mundo do silêncio para além da linguagem. No fim de contas, inventámos a linguagem, incluindo as linguagens formais como as matemáticas, para exprimir a nossa experiência. Isto pode ser visto como um jogo lúdico. Mas qualquer pessoa que tenha tentado exprimir qualquer coisa de uma maneira clara e se tenha confrontado com a linguagem para garantir que a expressão é adequada ao pensamento sabe que a linguagem é o instrumento do pensamento. Às vezes trata-se mesmo de um obstáculo à expressão e não é um jogo fácil. O pensamento pura e simplesmente não se identifica com a linguagem.

Uma das razões por que o Hal e eu íamos a Big Sur era que o Hal me queria apresentar a um filósofo de linguagem que, sempre que conseguia largar o emprego na universidade, fixava residência sozinho num atrelado na costa. Era um local perfeito para a meditação.

Eu desconfiava dos filósofos. Pareciam jogar um eterno jogo de "tiro ao alvo" — um filósofo fixava a posição do alvo e os outros disparavam. Depois trocavam. Para além disso, o seu empreendimento parecia-me por de mais dependente dos seus estilos intelectuais próprios para ter alguma coisa a ver com aquilo que eu considerava a verdade profunda, que eu sentia dever ser

universal e não particular (aqui a minha parcialidade como físico volta a dar sinais). Os filósofos não dispunham de nenhuma ferramenta — como a experiência, o apelo dos físicos à natureza ou o apelo dos matemáticos aos axiomas — para se manterem honestos. Como poderiam eles reconhecer que faziam erros? Eu tinha lido alguns dos artigos daquele filósofo e estava pronto para a luta.

O Hal já o conhecia, sabia onde ele morava. Na altura em que chegámos, estava-se no pico do calor da tarde. Saímos da estrada principal e descemos por uma outra estrada de terra batida, coberta de poeira, que conduzia à orla rochosa. De facto, lá estava o atrelado, à beira de uma falésia treze metros acima do mar, à sombra de um medronheiro, mas não havia sinal de vida. Criando remoinhos de poeira na terra, a nossa banheira parou em frente do atrelado. O calor era imenso. Saímos do carro e batemos à porta, que lentamente se abriu. E ali, diante de nós, estava o filósofo. Dormia, deitado de costas sobre o tampo de uma mesa no centro do atrelado, completamente nu, o pénis ereto, perpendicular tal como numa demonstração geométrica. Nada interrompia este quadro exceto uma cadeira, alguns livros espalhados, incluindo o *Tractatus*, e uma mosca solitária debatendo-se para encontrar o caminho para o exterior. "Não me parece," disse o meu amigo, "que devamos perturbar o seu sonho." Saímos. Nunca o cheguei a conhecer.

De regresso à estrada, o Hal e eu especulámos sobre que fantasias gramaticais poderiam produzir semelhante quadro. Talvez a descoberta de uma nova forma verbal, mais íntima, de juntar o sujeito e o complemento direto? A resposta surgiu vários anos mais tarde a partir de experiências feitas com pessoas a dormir em Stanford que provaram definitivamente que as ereções masculinas são acompanhadas de ciclos de REM (*rapid eye movement*[2]), também associadas a sonhos, que ocorrem periodicamente muitas vezes durante o sono normal. Quando amigos do Hospital de Stanford me contaram isto, a minha reação foi de espanto — como pôde um facto destes ter escapado a tantas esposas e amantes, que durante milénios tiveram a oportunidade de o observar? Mas essa é uma das características da ciência — começa com uma observação *indiferente* e cuidada.

Mais tarde, nesse mesmo dia, acampámos debaixo de um carvalho no cimo das montanhas a sul de Lúcia, onde as linhas telefónicas acabam. Aqui teríamos sol o dia todo — nem mesmo a neblina matinal chegava à altura onde estávamos. À medida que o Sol se afundava no Pacífico, as colinas tomavam um tom amarelo brilhante, depois laranja, projetando longas sombras. Nada havia ali perto, exceto a presença da igreja, uma ermida camaldolesa, e o exército, a reserva militar de Hunter-Liggett, do outro lado das montanhas (por vezes podíamos ouvir algumas detonações). O Hal abriu um saco cheio de armas e deu-me uma 0,45, guardando uma 0,38 para si próprio. Pensei que a sua maluquice militar tinha levado a melhor, mas ele insistiu em que aquela era uma terra fora da lei e que as armas eram uma questão de segurança pessoal. Não se podia prever quem se iria encontrar nestas montanhas — criminosos foragidos ou possivelmente um par de tipos como nós. Na manhã seguinte pusemo-nos a disparar contra alvos, com as montanhas a fazer ressoar os ecos dos nossos tiros. Como cães, marcávamos o nosso território.

Mais para o fim da tarde, fomos até às Furnas de Slate, um complexo na costa com banhos quentes naturais. A água, com cheiro a enxofre, era aquecida por rochas vulcânicas no interior da terra. A propriedade era originalmente, em 1882, a estância de Tom Slate, que a vendeu em 1910 a Henry Murphy, um médico de Salinas. Este e a mulher partilhavam o sonho de a transformar numas termas de estilo europeu. Os Murphys tinham três filhas e um filho, chamado John. Os filhos de John Murphy, Dennis e Michael, "o pescador e o santo", que segundo a lenda foram usados como modelos para as personagens Cal e Aaron (simbolizando Caim e Abel) no romance *A Leste do Paraíso*, de John Steinbeck, viriam a desempenhar um papel importante no futuro das Furnas.

À medida que íamos rolando na nossa banheira pelo caminho que levava ao edifício principal, o Hal disse-me que as Furnas não eram um sítio para se andar armado, pelo que deixámos as nossas pistolas no carro. O guarda do complexo era um maníaco por armas e o melhor era não o chatear muito (o guarda, como mais tarde vim a saber, era o escritor Hunter Thompson). Lembro-me de que o local era gerido por uma velhinha pertencente a uma comunidade religiosa e que o queria usar como local de encontro

para os seus companheiros de religião de Fresno. Havia um quadro, *Doçura e Luz*, de Jesus na parede. O complexo era distante em demasia para poder ser usado com alguma regularidade pela comunidade religiosa, mas a comunidade homossexual de San Francisco, atraída pelos banhos quentes, vinha em vez dela e em grandes quantidades. Para além dos homossexuais, a clientela incluía alguns boémios e artistas locais e pessoal docente do Departamento de Humanidades da Universidade de Stanford, que trazia estudantes licenciandos para seminários especiais de fim-de-semana. Entre as estudantes desse fim-de-semana estava uma namorada do Hal (então percebi que a sua viagem tinha uma finalidade secreta), que, no entanto, permanecia indiferente aos avanços dele. Mais tarde ela fugiu com um dos homossexuais, deixando o meu amigo bastante desgostoso.

Passado cerca de um ano, voltei a Big Sur à procura do Hal, que, já fora da universidade nessa altura, estava acampado algures a sul de Lúcia. O seu acampamento tinha crescido, compreendendo agora várias tendas do exército, um gerador, camiões e jipes, lança-foguetes (sem foguetes à vista — parecia o quartel-general da invasão a uma república das bananas. Numa das tendas estava abrigado um conjunto de armários-arquivos. Procurando em "C", descobri que a gaveta continha três carburadores usados. O Hal tinha dois amigos, um mulato com um anel na orelha e um marinheiro maneta com tatuagens pornográficas. Estavam todos armados. Não percebia o que é que eles estavam a magicar e também não perguntei. O Hal disse-me que havia alguém que eu devia conhecer, "um filósofo, ou algo assim", e fomos às Furnas jantar. O quadro de Jesus tinha desaparecido.

O ambiente no Slate tinha mudado, Michael Murphy tinha regressado de uma visita ao *ashram* de Aurobino na Índia e, depois de passar algum tempo em San Francisco, decidiu, juntamente com Richard Price, gerir a propriedade que lhe tinha sido dada pela sua avó e instalar um centro educacional, o Instituto Esalen (assim chamado em homenagem aos povos indígenas que viviam na zona antes da conquista espanhola). Dennis Murphy juntou-se-lhes mais tarde.

O centro baseava-se nas doutrinas de Aldous Huxley, Carl Rodgers, Abraham Maslow e outros que realçavam a importância da aprendizagem não verbal e os aspetos positivos em vez dos aspetos patológicos da vida mental. Esalen acabou por se tornar uma instituição pioneira de psicologia humanística e muitas das pessoas que lá andaram prosseguiram no estabelecimento de institutos semelhantes. Nunca lá surgiram muitos livros, se bem que recentemente alguns tivessem aparecido numa pequena livraria local. A lógica pura e simples não é o ponto forte de Esalen.

Sentei-me do lado oposto da mesa do ""filósofo", que tomei por um psicanalista judaico-alemão, vítima do recente êxodo europeu, que de alguma forma conseguira chegar à orla continental do ocidente. Perguntei àquela chaminé fumadora com ar de Pai Natal como é que aqui tinha vindo parar, e ele falou-me do movimento analítico da década de 30 e da sua dissidência desse movimento. Continuámos a discutir a teoria psicanalítica, que para mim era um movimento cultural ou literário, nunca científico. Uma ciência para mim devia conter uma receita para a sua própria destruição. A psicanálise não continha essa receita. O Pai Natal chamava a este tipo de conversa "merda de elefante". Gostei dele.

Quando me parecia que as coisas estavam a começar a aquecer, uma linda mulher dirigiu-se a ele e, depois de umas palavras meigas, começou a chorar no seu ombro; ele também chorou, com muito espalhafato. Um problema familiar, pensei; que pena! Em breve retomámos a nossa conversa anterior. E eis que uma outra linda mulher se lhe dirigiu a chorar, e a história repetiu-se. Virei-me para o Hal e disse-lhe: "Vamo-nos mas é pirar daqui. Esta gente é toda doida!" O Pai Natal, que era Fritz Perls, o analista de *Gestalt*, deve-me ter ouvido; de qualquer das maneiras explicou-me que ia dirigir um grupo de trabalho sobre *Gestalt* nesse fim de semana e convidou-me a participar.

Foi o que fiz e voltei a fazer noutros fins-de-semana. Os grupos de trabalho ""viraram a minha cabeça do avesso". Gostei da abordagem experimental, da ausência da teoria, da realização prática e da descoberta, normalmente, mas nem sempre: traumática, de partes de mim próprio de cuja existência nunca

tinha suspeitado antes. Aprendi imenso observando outras pessoas com quem trabalhei — um tipo de experiência de aprendizagem coletiva.

Mas aprendi a maior parte das coisas com o meu corpo. Aprendi a ouvir cuidadosamente os seus sinais, em vez de me limitar, regra geral inconscientemente, a reagir a eles. Descobri dentro de mim os meus "parceiros silenciosos" — as minhas personificações de processo inconscientes —, cuja sensatez, medo ou atração por pessoas se expressam no meu corpo e em sensações intuitivas e que, na sua própria linguagem muda, reagem ao mundo e às pessoas à minha volta. É melhor andar de bem com os meus parceiros, pensei, no fim de contas vou ter de passar o resto da minha vida com eles. Observei estas partes de mim mesmo, aprendi a falar com eles e, por vezes, tive de me debater para manter todos os atores em palco a trabalharem juntos na encenação do meu próprio ser. Essas experiências levavam-me ao limiar da confusão e da loucura, ou pelo menos assim parecia. Mas esses limiares, descobri, são as portas da aprendizagem, e uma pessoa sente-se confusa e desequilibrada a atravessá-los, tal como acontece na aprendizagem real. A razão, por si só, não nos permite atravessá-los. Temos de confiar no corpo. Se não confiarmos no corpo, arriscamo-nos a cair nas armadilhas do fundamentalismo religioso, político ou intelectual — uma forma de certeza que mata o crescimento criativo. O facto de não ter dado em doido inspirou-me uma enorme confiança na integridade do meu ser. Apercebi-me de que a "realidade", tal como o tempo e outros conceitos profundos, é simplesmente compreendida e sentida, mas quase sempre impossível de expressar pela linguagem. Se perguntarem a alguém se sabe o que são a realidade e o tempo, o vosso interlocutor achará que a resposta é óbvia. No entanto, ver-se-á em dificuldades, necessitando de recorrer a metáforas para os expressar nas formas limitativas da linguagem.

Durante os meus anos vinte cheguei a algumas conclusões acerca de quem eu era, não no respeitante à personalidade e a outros elementos decorativos do comportamento, mas quem eu era naquele sítio calmo e parado aonde as pessoas mentalmente sãs vão quando pretendem tirar férias delas próprias e do mundo das sensações. O que lá encontrei (depois de retirar toda a

desarrumação mental) foi de certo modo desapontador. O que "eu" sou é uma forma gramatical — a primeira pessoa do singular —, a estrutura lógica da linguagem que indica que os meus atos físicos e mentais são efetuados por mim. Este "eu" — o ego irredutível — tem a mesma qualidade notável de certa existência, que a existência da verdade tem. Porque não se pode negar a possibilidade da verdade sem contradição: dizer "não existe verdade" significa (se é que significa alguma coisa) que a afirmação entre comas é falsa, o que significa que aí *existe* verdade. Da mesma maneira, não posso negar a existência do meu ego, porque isso seria negar a existência do negador — uma contradição subjetiva. Poder-se-ia explorar um pouco mais esta visão profunda, se bem que elementar, de Descartes (o filósofo que a teve há mais de trezentos anos) acerca da natureza do ego, mas quer-me parecer que um ser que de todo pensa não a pode ignorar. Não há, receio, muito conforto neste "eu" despido, porque como forma lógica ele é tão impessoal e universal como o número "um". Felizmente, descobri que há mais sobre o meu ser. Existem todos os parceiros silenciosos, a personalidade, os elementos secundários, o animal cá dentro, o oceano do eu e Deus. Nada mostra tão bem a existência de todos estes parceiros mudos como uma das experiências com hemisférios cerebrais separados efetuada por Rodger Sperry, Michael Gazzaniga e seus colaboradores. Examinaram pacientes cujos dois hemisférios cerebrais tinham sido separados por razões médicas, de modo que a capacidade da linguagem localizada no hemisfério esquerdo estava efetivamente desligada do direito — que é onde residem alguns dos parceiros silenciosos. As pessoas nesta situação radical comportavam-se aparentemente de maneira normal até serem estudadas mais em pormenor. Os investigadores demonstraram que o hemisfério direito pode ser treinado para desempenhar uma tarefa sem o esquerdo (o lado com a capacidade da linguagem) estar ao corrente do treino, estando, pois, a pessoa de olhos vendados. Quando a venda era retirada dos olhos, deixando a pessoa ver a tarefa executada, a pessoa — o lado do cérebro onde está a linguagem — respondia: "Não fui eu que fiz isso." O ego despido respondia a um ato de um parceiro silencioso e isolado.

A maior parte destas reflexões da minha terceira década foi efetuada na perspetiva da primeira pessoa, isto é, era a visão do meu eu a partir de dentro. As pessoas têm um desejo intenso de

se conhecerem a si mesmas e ao mundo à sua volta, um desejo que amadurece (se alguma vez o faz) aos vinte anos. O meu sábio jesuíta favorito, Gracian, que era abade no mosteiro no século XVII e registou as suas reflexões no seu *Manual*, comentou que aos vinte anos o homem é dominado pelo desejo, aos trinta, pela conveniência, aos quarenta, pelo discernimento. Estou agora em período de discernimento — pontualmente, de acordo com o calendário de Gracian — e o meu discernimento diz-me que a introspeção é, na realidade, uma maneira muito deficiente de entender a cognição e a emoção, mesmo na própria pessoa. A consciência é capaz de outras perspetivas — "a perspetiva da terceira pessoa", a visão de fora, a visão da ciência. De certa maneira, a consciência é mais difícil de ser atingida, e isto porque todo o ser de uma pessoa clama contra ela. Para a maioria das pessoas, trata-se de um limiar difícil de atravessar — ver-se cada uma a si própria como uma testemunha imparcial. Mas estou convencido de que para compreender a fundo a natureza da cognição e da emoção, mesmo as da própria pessoa, será sempre necessário perceber como é que o cérebro e o corpo funcionam — assunto que será abordado noutro capítulo.

Depois de deixar a escola de pós-graduação fui para o Instituto de Física de Campos da Universidade de Chapel Hill, da Carolina do Norte, a fim de prosseguir a minha investigação em física. No Verão seguinte viajei por todo o mundo, passeando uma longa temporada na Ásia, a dar conferências em universidades e a explorar as culturas estrangeiras. Quando voltei, juntei-me ao grupo de física teórica da Universidade de Rockefeller, na cidade de Nova York. Numa visita a uns amigos em Chapel Hill, no início do Verão seguinte, conheci o Barry, um jovem americano nativo[3]. Quando lhe referi que seguiria para oeste para ir trabalhar na Califórnia durante o Verão, decidiu juntar-se a mim na viagem. Dei algumas conferências em universidades e laboratórios que ficavam no caminho, e o Barry narrou-me histórias ancestrais que uma sua avó índia lhe tinha contado. Chegámos a San Francisco durante o "Verão do amor"[4] em 1967, e larguei o Barry no distrito de Haight-Ashbury, na altura cheio de *hippies* e de maluqueira. Vim a saber que o Barry era um artesão, fazia artesanato índio e conhecia todo o sistema de importação. Sugeri-lhe que abríssemos os dois uma pequena loja de recordações mesmo em Haight Street. Eu entrava com o financiamento e ele geria o

negócio. Depois de lhe alugar uma loja, comecei a minha investigação no Laboratório Lawrence de Radiação do outro lado da baía, em Berkeley.

Duas semanas depois, voltei a Haight para ver como é que corria o negócio. Do Barry nem sinal. Fui à comunidade onde ele estava alojado — uma pensão cheia de ícones religiosos orientais, a tresandar a incenso e a comida vegetariana e com inúmeras amostras de juventude americana em diversas fases de êxtase. Uma rapariga relativamente coerente informou-me que o Barry tinha "pirado com o ácido" e estava agora a gozar a vida natural em Golden Gate Park. Levou-me até lá. Partes de Golden Gate Park são maciços de arbustos e árvores, atravessados por labirintos de veredas estreitas. Já era de noite quando finalmente encontrámos o meu sócio acocorado num clareira junto de uma fogueira, com garrafas, latas e ossos de galinha à volta. Estava de calções, coberto por uma manta, e no resto do seu corpo despido e na cara estavam pintados os símbolos do seu povo. Sem olhar para cima, disse, num tom que apenas levemente era de desculpa: "Heinz, eu sou um índio, não sou um homem de negócios."

Senti alguma simpatia pelo que lhe tinha acontecido. Eu próprio tinha experimentado o LSD uns quatro anos antes. Por volta de 1963 Leo Hollister, um psicofarmacólogo do Hospital Administrativo de Palo Alto, andava a pedir voluntários para serem injetados com esta substância. Leo estava interessado em estudar o efeito do LSD nos ácidos gordos do sangue. Os voluntários ganhavam cinquenta dólares cada um, uma oportunidade a não perder para pobres estudantes de pós-graduação como eu. Tinha lido relatos de experiências com drogas em *Mysticism Sacred and Profane*, de R. C. Zaehner, e *The Doors of Perception*, de Aldous Huxley, e alguns artigos da literatura farmacológica, e estava pronto a avançar. Ganhei os meus cinquenta dólares e uma experiência mística de brinde. Alguns dias mais tarde contei a minha experiência (como se a experiência tivesse sido minha) a uns amigos e disse-lhes que esperassem até a droga chegar à rua. Não demorou muito tempo. Bob Weininger, um psicoterapeuta de Santa Bárbara, fez-me uma vez notar que as experiências místicas são um sinal do corpo de que as pessoas necessitam de mais

socialização. As pessoas começam a interagir de novas maneiras. Isso aconteceu a milhões de americanos no final da década de 60.

Mais tarde, nesse Verão, Barry e eu viajámos para sul, para Big Sur. Os jovens estavam a emigrar de Los Angeles para norte e de San Francisco para sul, atraídos para Big Sur pelo seu poder natural e pelo isolamento da sociedade. A estrada estava entulhada com os que tinham desistido da universidade em favor da cultura da droga e com os que fugiam do recrutamento militar para a guerra do Vietname. Encontrámo-nos com o Hal no seu novo acampamento em Lime Kiln Creek, um ribeiro lindo que desaguava numa praia do Pacífico não muito longe de uma queda de água coberta de musgo. O Hal contou-me histórias estranhas passadas nas montanhas — histórias sobre comunidades e selvajarias. Insistiu em que visitássemos uma comunidade no coração das montanhas, a duas horas de jipe. Chegámos lá de tarde. As pessoas da comunidade, uma comunidade experimental, pensavam ser a onda do futuro, mas de facto tinham regressado ao tribalismo autoritário do passado. O sítio era governado por um manda-chuva ou *shaman* (eu chamava-lhe ""Rasputine") que escorria contas e cabelo. Vários "paus mandados" cumpriam as suas ordens — ele governava usando o medo e a magia. As mulheres eram partilhadas ou distribuídas pelo chefe. Havia lixo por toda a parte, ossos grandes, pedaços de animais e, evidentemente, drogas. Mais tarde visitei comunidades orientadas de uma maneira mais positiva na vizinhança de Taos, no Novo México, grupos mais pequenos com indivíduos espiritualmente empenhados partilhando o trabalho e esforçando-se por levar uma vida nova e melhor; mas este lugar de certeza que não era um desses sítios.

O Hal e eu passámos a noite a alguma distância dali, dormindo em cima dos nossos revólveres (desta vez ele não teve de me convencer de que eram precisos). No campo mais abaixo estava aceso um fogo, rufavam tambores e dançarinos rodopiavam. Ouvimos gritos e gemidos (de dor, ou de prazer?) até que o silêncio caiu. Adormeci com a Lua a subir por cima das montanhas, reclamando o domínio da noite.

Na manhã seguinte, um dos jovens queria uma boleia de volta à estrada e levámo-lo connosco. Com a minha insistência usual

em conhecer as bases económicas da existência pessoal e social, perguntei-lhe de que é que a comunidade se alimentava. Contou-me que montavam armadilhas para animais e que pilhavam carros de turistas na estrada durante os fins-de-semana. Continuou explicando de uma maneira indiferente que tinham começado a comer pessoas. Disse então que tinha encontrado a cabeça de um amigo numa árvore e, pensando que poderia ser a próxima vítima, quis abandonar o campo. Eu não tinha maneira de saber se ele estava a mentir, com alucinações, ou se aquilo tudo era verdade. Certamente que era credível.

Anos mais tarde, quando contei esta história a um colega, físico francês, ele respondeu: ""Que idiotice! Não há canibalismo em África desde há muitos anos." Quando lhe expliquei que me tinha ouvido mal e que a história se passava na Califórnia, e não em África, replicou: "Ah, na Califórnia! Tudo é possível na Califórnia."

Lembro-me de ver miúdos ao longo da estrada costeira nos finais da década de 60. Por vezes emergiam do mato depois de semanas nas montanhas sem qualquer contato com a sociedade humana. Tinham vivido com a realidade alternativa ancestral, com os deuses primitivos que criaram a Terra e se moviam no vento e nas águas, sem um guia, perdidos em corpo e alma. Quando emergiam, em grande parte, mas não inteiramente loucos, abraçavam-se muitas vezes aos postes telefónicos ao longo da estrada ou tocavam no pavimento — os primeiros artefatos humanos que viam ao fim de várias semanas. Estavam de novo a ligar-se à rede, à estrada estendida através de um continente, unindo-se àquele ténue sonho coletivo da história, o mundo da linguagem, edifícios, lei, arte e ciência, o sonho de um mundo que gira sobre si próprio à beira do abismo. Regressavam a casa.

Como veio a acontecer, o futuro da Califórnia não pertencia às comunidades rurais ou à contracultura, mas sim aos engenheiros eletrónicos e aos empresários. Em poucos anos, a revolução da tecnologia de ponta dos computadores estava em marcha na região de Santa Clara. Fortunas estavam a ser feitas (e perdidas); a dialética entre o ego e os impulsos instintivos estava a tomar um novo rumo. A guerra acabara. Os jovens americanos regressavam a um conjunto anterior de valores, com mais enfase

no sucesso individual e económico; era outra vez importante encontrar um bom emprego. Mas o preço que se paga por adotar um conjunto de valores ou uma maneira de viver continuou inalterado. O preço é, como sempre será, a vida de uma pessoa.

Perdi o rasto do Hal. Um conhecido, um revolucionário esquerdista *sui generis* nos seus dias de Stanford, mas agora rico comerciante de pornografia em San Francisco, disse-me que o Hal dava agora aulas no Sonoma State College. O Barry escreveu-me vários anos mais tarde. Tinha conseguido um emprego como paquete no St. Francis Hotel, em San Francisco, e vivia agora casado. Dentro da carta estava o dinheiro que me devia. A última linha da carta resumia as suas reflexões sobre a vida que tinha levado: "Há coisas neste universo que não foram feitas para o homem conhecer." Entretanto eu estava na costa leste a trabalhar nas simetrias das partículas quânticas, empurrando para mais longe a orla da escuridão da única maneira que eu era capaz.

[1] Zona altamente industrializada da Califórnia onde foram produzidos alguns grandes desenvolvimentos da microeletrónica. (*N. do T.*)

[2] Em português, "movimentos rápidos do olho". (*N. do T.*)

[3] Nome por que são conhecidos nos Estados Unidos os cidadãos de ascendência índia. (*N. do T.*)

[4] Ponto alto do movimento *hippie* da década de 60, que teve a sua expressão máxima na zona da Universidade de Berkeley, em San Francisco, na Califórnia. (*N. do T.*)

PRIMEIRA PARTE
– AS CIÊNCIAS DA COMPLEXIDADE –

CAPÍTULO 2
– UMA NOVA SÍNTESE DA CIÊNCIA –

> Uma ciência da computação está a começar a emergir, como Hércules, do seu berço.
>
> *PETER D. LAX, 1985*

Há trinta anos atrás, um estudante universitário típico tinha uma certa lista de opções de cadeiras no campo das ciências naturais — biologia, física e química —, bem como no campo das ciências do comportamento — psicologia, antropologia, sociologia e economia. As várias cadeiras estavam bem arrumadas e não havia grande sobreposição entre elas; cada ciência tinha a sua própria área intelectual. A divisão dos departamentos científicos, na realidade a divisão do próprio conhecimento, refletia, ou pelo menos assim parecia, a verdadeira ordem da natureza, da mente e da sociedade.

Mesmo hoje estas divisões entre as ciências não se alteraram grandemente, o que testemunha a persistência da estrutura institucional quando confrontada com uma mudança quase completa das pessoas. No entanto, alguma coisa está a abalar a maneira como os cientistas estão ordenados e divididos. Murray Gell-Mann refletiu o espírito desta mudança na sua alocução em 1984 aos membros do Instituto de Santa Fé, um novo centro que se propõe dedicar ao estudo da complexidade: "É costume dizer-se que vivemos numa Era da especialização, e isso é verdade. No entanto, tem-se também assistido a um fenómeno evidente de convergência científica e académica, especialmente nos quarenta anos que se seguiram à Segunda Guerra Mundial, e a um ritmo acelerado durante a última década. Novos tópicos, altamente interdisciplinares do ponto de vista tradicional e que representam em muitos casos a vanguarda da investigação, estão a emergir. Estes tópicos interdisciplinares não ligam a totalidade de uma disciplina tradicional a outra; pelo contrário, subdomínios

particulares de várias disciplinas são conjugados de modo a formar uma nova disciplina; o padrão é variado e altera-se a todo o momento."

O movimento descrito por Gell-Mann tem menos a ver com o nascimento de uma nova visão da ciência do que com o facto de muitos investigadores especializados se aperceberem de que os problemas com que se debatem são partilhados por outros investigadores em campos distintos. Existem, por exemplo, diversos problemas das ciências neurológicas, de antropologia, de biologia das populações, da teoria de aprendizagem, da ciência cognitiva, da dinâmica ilinear, da física e da cosmologia (para só referir alguns campos) que incluem componentes comuns. É cedo demais para se prever até onde irá esta nova integração horizontal das diversas ciências, mas as raízes estão criadas e o crescimento está a ser rápido. Pode tratar-se do prólogo de uma nova síntese do conhecimento baseada numa noção geral de complexidade.

A força material que está por trás desta mudança é o computador, o instrumento das ciências da complexidade. Numa defesa impressionante da tese de que novos modos de produção criam novas classes sociais, o computador criou de facto uma nova classe de pessoas que o entendem e o dominam. Esta classe está a fazer um grande esforço pelo seu reconhecimento no interior da sociedade tradicional. Não só uma classe social teve a sua origem no computador, como também a própria estrutura do conhecimento está a ser alterada. O computador enquanto instrumento de investigação aparece como uma nova maneira de observar a realidade. A arquitetura das ciências tem de refletir essa mudança.

Neste capítulo irei explorar este novo movimento e o reordenamento radical do conhecimento que ele faz antever. O conhecimento existe tanto em si, num sentido abstrato e filosófico, como do lado de fora, representado exteriormente em instituições sociais e em atividades humanas. Começarei por examiná-lo nesta última forma. O primeiro sítio, e o mais óbvio, para se procurar a institucionalização do conhecimento são, evidentemente, as universidades. As universidades são instituições intelectualmente conservadoras que só gradualmente

se adaptam à mudança. Este conservadorismo existe para proteger o património principal de uma universidade — o perfeccionismo intelectual. As universidades são estruturas sociais frágeis se corporizarem nas suas faculdades uma rede de técnicas e séculos de conhecimento em construção, uma rede que é mais fácil de destruir do que de preservar. Basta ver as lutas heroicas travadas no seu início pelas universidades dos países em vias de desenvolvimento para se ver o enorme feito que representa uma universidade moderna.

O desafio que se coloca às universidades em sociedades democráticas é o de promover o trabalho intelectual melhor e mais valioso, preservar uma tradição de valores e liberdade, proteger a diferença de opiniões e educar os jovens. Tudo isto deve ser feito dentro do contexto de uma sociedade mais lata do que a governada pela opinião de uma maioria aritmética, uma maioria que não pode partilhar os valores que a universidade procura promover. A tensão dialética entre a universidade e a sociedade é uma força dinâmica de mudança, mas ao mesmo tempo também pode representar a destruição da frágil universidade. Há mesmo quem pense que a universidade já foi destruída.

Perguntei a vários reitores qual tinha sido, na sua opinião, a mudança mais radical nas instituições de ensino superior desde a Segunda Guerra Mundial. Fiquei surpreendido com o grande número de reitores que salientaram o aumento da influência das grandes escolas profissionalizantes — de medicina, de direito e de gestão —, bem como das escolas de pós-graduação. As universidades, em vez de transmitirem uma tradição de valores humanos a uma nova geração, tornaram-se "fábricas de conhecimento" que produzem indivíduos de formação e treino necessários à sobrevivência de uma sociedade no mundo moderno. Os reitores, por seu lado, tornaram-se basicamente simples angariadores de fundos, deixando de exercer a liderança educacional. É caso para nos interrogarmos quem é que está a tomar conta da casa.

Durante este mesmo período do pós-guerra tem-se verificado um contínuo declínio do estatuto do pessoal universitário, especialmente o dos escalões docentes mais baixos. Durante a

última década este declínio tornou-se assustador, comparável ao dos professores do ensino secundário durante os anos sessenta. Este declínio é previsível quando o corpo docente é considerado como pessoal das "fábricas de conhecimento", e não como transmissores e professores de uma cultura de elite e de valores que criam a civilização. Dwight Eisenhower, quando, na qualidade de novo reitor da Universidade de Columbia na década de 50, foi apresentado à hierarquia superior do corpo docente, comentou que estava muito satisfeito por conhecer os funcionários da universidade. O físico I. I. Rabi interrompeu-o: "Sr. Reitor", disse, "nós *não* somos os funcionários da universidade. Nós somos a universidade!" A maneira de ver as coisas era diferente na altura. Apesar de muitas universidades nos Estados Unidos terem aumentado substancialmente os seus orçamentos, as universidades, na sua natureza e no seu carácter, já não são as instituições que em tempos foram. As universidades são agora financiadas por aqueles que as consideram acessórias à sociedade que servem e não instituições com existência própria. Alguns intelectuais veem nestas mudanças da universidade um declínio na cultura de elite. Outros veem evolução e progresso. A mudança vista por cada um depende, ironicamente, da maneira como cada um foi educado.

Apesar de muita atividade científica, especialmente investigação, ter lugar nas universidades, nem toda ela é realizada nas universidades. As empresas têm grandes e pequenos centros de investigação. Os grandes laboratórios industriais, como por exemplo os laboratórios da AT & T Bell em Murray Hill, Nova Jersey, ou o centro de pesquisa da IBM perto de Yorktown Heights, Nova York, deram grandes contributos tanto à ciência pura como à ciência aplicada. Estes laboratórios empresariais existem também no Japão e na Europa. O trabalho realizado nesses laboratórios não se distingue do trabalho realizado nas universidades, exceto por ser mais bem remunerado e não implicar a obrigatoriedade do ensino. Pequenas organizações industriais têm laboratórios mais pequenos e mais especializados que se dedicam a resolver problemas particulares específicos desta ou daquela indústria. Um vasto campo do nosso conhecimento sobre processos físicos e propriedades dos materiais provém dessa investigação industrial.

O governo também desempenha um papel muito importante na investigação científica. O governo dos EUA dispõe de grandes laboratórios em Los Álamos, Livermore, Argonne, além do laboratório nacional de Brookhaven, do Centro de Aceleração Linear de Stanford, do Laboratório Nacional Fermi, dos institutos nacionais de saúde, dos hospitais militares e de diversos centros dedicados à investigação militar. Hoje, o orçamento de investigação dos EUA é sensivelmente dividido em 75% de investigação militar e 25% de investigação civil. Há uns anos atrás, estas duas áreas estavam equilibradas; a mudança foi alvo de algumas críticas, especialmente por parte da comunidade universitária.

Por vezes as pessoas pensam que a investigação fundamental é realizada nas universidades, enquanto que a investigação aplicada, presumivelmente comercial e militarmente mais útil, se efetua em laboratórios de empresas e militares. Mas esta distinção está a desaparecer. A Fundação Nacional de Ciência, sob a direção de Erich Bloch (ex-investigador da IBM), está a instalar um conjunto de centros de investigação junto de universidades. A investigação nestes centros envolve a cooperação entre empresas e universidades. Esta iniciativa deve-se ao facto de muitos responsáveis pela política científica pensarem que os Estados Unidos não têm sido suficientemente bem sucedidos em traduzir a sua superioridade na investigação fundamental para o campo dos produtos aplicados, comercialmente viáveis, que possam melhorar a competitividade internacional do país. Falta ainda saber se esses centros ajudarão a resolver o problema. Mas lembro que a colaboração entre universidades alemãs e a indústria farmacológica germano-helvética, que dava os seus primeiros passos antes da Primeira Guerra Mundial, não só criou uma nova grande indústria, como também forneceu as bases dos primeiros conhecimentos de química orgânica.

As empresas também entraram na atividade da educação privada. De acordo com David Harman, um professor da Universidade de Columbia, desde o início da década de 80 que os gastos das empresas com a educação dos empregados (cerca de 100 biliões de dólares) excedem anualmente o orçamento total de todo o sistema de ensino superior dos Estados Unidos. As empresas não estão, evidentemente, a ensinar o currículo

universitário. Os seus currículos são constituídos por cursos de treino de funções específicas, de gestão de pessoal, de administração, de treino executivo e de outros tópicos semelhantes. A grande dimensão deste empreendimento educacional que agora emerge terá forçosamente de ter um certo impacto, mas poucas pessoas consideraram o que ele pode fazer antever.

A ordem visível do conhecimento está a mudar, impulsionada por forças quer interiores quer exteriores à ciência. Já examinámos aspetos da representação exterior da ciência. Mas que é que se deve fazer para ordenar internamente as ciências, bem como as relações que existem entre elas? Uma coisa é encontrar teorias nas ciências, como, por exemplo, as teorias da física e da biologia, outra coisa, bem diferente, é descobrir como é que essas teorias se relacionam entre si e como é que, quando consideradas como um todo, formam uma imagem da realidade.

O problema do ordenamento do conhecimento é em si mesmo um problema do conhecimento. É profundamente inspirado pela nossa cultura e pela nossa ideia da realidade. Até à ascensão da ciência empírica, já lá vão cerca de trezentos anos, a arquitetura das ciências naturais (filosofia natural) era estabelecida, de acordo com os cânones aristotélicos, pela relação *lógica* de uma ciência com a outra. Uma vez definida uma disciplina, a sua relação com as outras disciplinas era simplesmente um problema de lógica. Na ausência de instrumentos científicos, o que as pessoas cultivadas podiam fazer para ver a realidade era apenas usar as suas mentes e a ordem lógica de pensamento que aí encontravam. Não deverá constituir nenhuma surpresa o facto de a hierarquia medieval do conhecimento estar estabelecida de acordo com princípios lógicos e não empíricos.

Com a ascensão da ciência empírica e da perspetiva materialista promovida por novos instrumentos, tais como o telescópio e o microscópio, as várias ciências ordenaram-se de acordo com critérios de *reducionismo* ou essencialmente de tamanho. As propriedades das coisas mais pequenas determinavam o comportamento das coisas maiores. A física, que lidava com as entidades mais pequenas, era a ciência mais fundamental de acordo com esta disposição, depois vinham a

química, a biologia, e todas as outras culturas pela escala a cima (ou a baixo), até à psicologia e à sociologia. Esta hierarquia reducionista, prevalecente quando eu era estudante, ainda hoje constitui a visão dominante para a maioria dos cientistas naturais.

A intenção da atividade das várias ciências não foi alterada. Nós é que mudámos quando, ao formarmos uma imagem de conjunto das ciências da nossa mente, apelámos a novas categorias para a organização dessa imagem, categorias essas que são inspiradas pela nova instrumentação.

Agora que o computador — o instrumento da complexidade — chegou, podemos começar a ver as relações entre as várias ciências em dimensões inteiramente novas; uma dessas dimensões, por exemplo, pode ser o grau de simplicidade ou de complexidade de um dado sistema ou o facto de esse sistema ser simulável ou insimulável.

Uma explicação parcial do grande sucesso das ciências naturais durante os últimos séculos reside no facto de estas dirigirem a sua atenção para sistemas naturais simples. Sistemas com poucas componentes conceptuais, que podem ser mantidos e tratados na mente. Em vista da complexidade do mundo à nossa volta, é absolutamente notável que o mundo natural admita uma descrição simples com base em leis físicas também simples. Como é isto possível?

O génio de Isaac Newton foi o primeiro a dar-nos uma explicação deste mistério. De acordo com a mecânica newtoniana, o mundo pode ser conceptualmente dividido em "condições iniciais", que especificam o estado físico do mundo em algum momento inicial, e "leis físicas", que especificam como é que esse estado físico se modifica. As condições iniciais são normalmente muito complicadas, uma complicação que reflete a complexidade do mundo em que vivemos. As leis naturais, por outro lado, podem ser, como realmente acontece, bastante simples. Esta divisão — em leis simples e condições iniciais complicadas — manteve-se até aos dias de hoje. Na prática, só se podiam resolver equações que representassem leis físicas simples de sistemas com condições iniciais simples — como, por exemplo, o lançamento de um projétil ou o movimento da Lua e dos planetas.

As equações das leis físicas incluíam somente umas quantas variáveis que descreviam características qualitativamente distintas do sistema — a posição de um planeta, a sua velocidade e a sua aceleração. Alguns sistemas complexos distinguem-se dos sistemas simples pelo facto de serem necessárias muitas variáveis qualitativamente distintas para descrever o seu comportamento. Para alguns sistemas complexos, como o cérebro ou a economia mundial, o número de variáveis qualitativamente distintas que são necessárias para descrever o sistema pode ser da ordem das centenas de milhões (na realidade não sabemos quantas variáveis são necessárias — isso faz parte do problema).

Ao contrário dos sistemas simples da física newtoniana, é difícil para a mente humana compreender intuitivamente o que se passa num desses sistemas complexos com muitas variáveis. De acordo com a famosa estimativa do psicólogo cognitivo George Miller, a mente humana pode dar atenção simultânea a um máximo de 5 a 9 assuntos. Uma mente com uma capacidade de atenção tão pequena nunca poderá compreender o comportamento de um sistema complexo com centenas de variáveis. Com a ajuda de computadores, no entanto, podemos começar a destilar essa complexidade até obter uma quantidade de informação humanamente tratável para que possamos depois aplicar à nossa intuição e ver o que se está a passar. Essa destilação, no entanto, é mais uma arte do que uma ciência.

Os cientistas que estudam os sistemas complexos descobriram uma alternativa interessante a todas essas milhares de variáveis. Acontece que em alguns desses sistemas existe uma simplicidade subjacente — só umas quantas variáveis são realmente importantes. Demonstra-se que a interação de uns tantos componentes de acordo com um conjunto de regras bem definido pode produzir fenómenos complexos. Talvez todas estas milhares de variáveis sejam só aparentes e, no fundo, as coisas sejam muito simples. Mas, até que essa hipotética simplicidade seja descoberta, temos de lidar diretamente com a complexidade. Felizmente, graças ao computador, isso é hoje possível.

Vemos que o primeiro impacto do computador como instrumento de investigação é do tipo "vertical" — permite aprofundar a nossa compreensão de problemas já existentes

dentro de uma dada disciplina científica. Graças aos computadores, físicos, químicos e economistas podem hoje enfrentar problemas que antes não podiam sequer tocar, pela simples razão de que não existia poder computacional suficiente. Os novos métodos de análise de sistemas complexos aplicam-se não só nas ciências naturais — astronomia, física, química, biologia e medicina moderna —, mas também nas ciências sociais — economia, ciências políticas, psicologia dinâmica. Os computadores, devido à sua capacidade para processar enormes quantidades de informação, estão a revelar-nos novos aspetos da realidade social.

O aprofundamento vertical, no entanto, não altera de forma especial a maneira como vemos o conjunto das ciências; limita-se a aprofundar o conteúdo dos territórios científicos já existentes. O novo desenvolvimento que mais expetativas cria é a integração "horizontal" — as ligações entre as várias ciências —, porque daí podem resultar mudanças da nossa imagem da realidade.

Uma integração horizontal deste tipo é muitas vezes designada "interdisciplinar", palavra que para muitos intelectuais da ciência é sinónimo de trabalho pouco sério e um tanto inconsistente. É difícil dizer se um novo campo deve ser levado a sério apenas com base nos seus méritos intelectuais, especialmente se não se estiver familiarizado com as disciplinas envolvidas. No entanto, o facto de as pessoas mais brilhantes de diferentes disciplinas serem atraídas para uma nova área é um bom sinal de que algo de significativo se está a desenrolar. Novos campos bastante interdisciplinares estão a emergir entre as ciências; em muitos casos, estes campos podem ser qualificados como de ponta.

A integração horizontal é um aspeto importante da nova síntese da ciência, sendo já responsável por diversas alterações na arquitetura das ciências. Tem estado a ocorrer há mais de quarenta anos, desde o final da Segunda Guerra Mundial, mas só na última década o seu impacto aumentou mais rapidamente, depois de a tecnologia do *microchip* ter tornado os computadores tão poderosos como baratos. Com o recurso aos computadores, os cientistas podem construir modelos matemáticos de fenómenos complexos — tais como a aprendizagem humana, os processos

inconscientes, a evolução animal e cultural, a célula, o comportamento violento ou o cérebro, para só falar de algumas aplicações. Apesar da diversidade destes fenómenos, existem elementos comuns na matemática usada para os modelar; essa característica está a tornar-se a base de uma nova forma de integrar as ciências. Por exemplo, a modelação computacional de fenómenos evolutivos sugere como é que a evolução funciona como sistema de conhecimento de padrões, promovendo umas espécies, extinguindo outras. Isto tem implicações no comportamento da aprendizagem e no comportamento económico. Embora as linhas gerais desta nova síntese da ciência, que passa por cima das disciplinas tradicionais, não sejam ainda claras, existe já um movimento de grande amplitude. A antiga maneira de organizar as ciências já não é a mais adequada. Ainda ninguém pode dizer o que vai sair do presente período de fermentação intelectual. No entanto, tenho alguns palpites, não acerca da estrutura final, mas acerca de alguns dos tópicos que integrarão a nova arquitetura das ciências da complexidade.

O primeiro tópico é a *importância do computador* — o instrumento de investigação mais importante das ciências da complexidade. O poder do computador na investigação reside na sua capacidade de modelar e de simular sistemas complexos. É de tal maneira impressionante a capacidade do computador nesta utilização que Peter Lax, um matemático do Instituto Courant na universidade de Nova York, a considera como um novo ramo das ciências: "Os ramos tradicionais das ciências, o experimental e o teórico, correspondem às fontes de conhecimento tradicionais. Nas últimas duas décadas um terceiro ramo, o computacional, juntou-se aos outros dois, estando, tanto em importância como em respeitabilidade, a aproximar-se rapidamente dos seus irmãos mais velhos. [...] Esta rápida ascensão da computação tornou-se possível graças a desenvolvimentos pronunciados nos domínios do *hardware* e do *software* dos computadores, bem como a melhoramentos igualmente nítidos na discretização das equações que modelam os fenómenos físicos e na formulação de algoritmos engenhosos para resolver as equações discretizadas." Esta capacidade recém-descoberta para simular processos físicos tem implicações interessantes na relação tradicional entre teoria e experiência.

Comecei a compreender o alcance dessas implicações durante um seminário proferido por um colega meu, físico teórico. Descreveu a sua teoria das partículas quânticas prosseguindo depois com a explicação de uma "experiência" em abono da sua teoria. O problema é que eu não conseguia imaginar alguém a realizar aquela experiência — ela estava muito além da nossa capacidade experimental. Depois apercebi-me de que o meu colega se estava a referir a uma "experiência" computacional (estava intencionalmente a induzir-nos em erro, com algum humor) na qual as equações de uma colisão de partículas quânticas eram modeladas. Mais tarde, quando conheci outro colega, físico experimental que fazia mesmo experiências reais de colisões de partículas, falei-lhe acerca do seminário. Respondeu-me: "Mas a modelação em computador não é uma experiência real." Quando sugeri que talvez as experiências reais dele não passassem de computações analógicas da teoria subjacente, ele irritou-se. Mas, de facto, toda a natureza pode ser vista como um computador analógico.

Um dos processos pelos quais a ciência do futuro irá progredir será uma combinação de observações precisas de sistemas reais e uma modelação em computador desses sistemas. Esta última difere da noção tradicional de experimentação na medida em que se alteram ativamente as condições do sistema verdadeiro para se tentar determinar o que se passa. Em muitos sistemas naturais verdadeiros, como, por exemplo, o interior das estrelas, não se pode sequer fazer experiências, pelo que a modelação em computador é o único caminho possível. Da mesma maneira, nas ciências sociais e psicológicas, não se pode muitas vezes efetuar certas experiências, por motivos práticos ou éticos; mais uma vez, as modelações em computador oferecem um novo e poderoso método para descobrir o que se passa. A modelação em computador é uma nova forma de se realizarem "experiências".

Um outro desenvolvimento importante consiste no aparecimento da *perspetiva computacional nas matemáticas* — noção de que o conhecimento de uma verdade matemática implica a capacidade de computar. Isto é um outro tópico da nova síntese científica, um tópico que surgiu com a invenção da máquina de Turing. Uma máquina de Turing pode ser imaginada como um aparelho mecânico, uma impressora, pela qual passa uma fita

infinitamente longa com uma sequência de casas que ou estão vazias ou contêm um ponto. A máquina pode executar quatro operações diferentes ao ler uma casa — mover-se para a direita, mover-se para a esquerda, apagar um ponto, imprimir um ponto. (O lógico Hao Wang mostrou que a operação de apagamento é supérflua; só três operações são realmente necessárias.) Esta máquina pode executar qualquer programa que possa ser expressável em código binário. O computador digital mais complexo é formalmente equivalente a uma máquina de Turing; a diferença está em que realiza o seu trabalho muito mais depressa.

É ainda possível ir bastante além da ideia inicial de Turing e perguntar quanto custa em tempo uma dada demonstração ou a resolução de algum problema num computador real. Talvez existam resultados prováveis em matemática cuja demonstração tenha um custo temporal demasiadamente elevado. Em certos casos, pode-se estimar quanto tempo demoraria uma dada demonstração. Um fator material de ordem prática entrou, ao quê parece, no mundo das matemáticas. No entanto, os computadores invocados nestas condições não são verdadeiros: são "computadores de *gedanken*", máquinas de Turing imaginárias. Os computadores verdadeiros também podem desempenhar um papel importante na matemática.

Debate-se frequentemente o papel do computador na matemática pura. Como Jacob Schwartz, do Instituto Courant e um líder na utilização de computadores, diz: "O matemático está sempre mais interessado em princípios gerais do que em factos individuais, razão pela qual, de todas as ciências, a matemática tem sido a menos influenciada pelos computadores." O movimento da matemática no século XX tem sido certamente no sentido de abstrações e generalizações cada vez maiores. No entanto, o advento do computador tem estimulado um retorno parcial às atitudes construtivas da matemática no século XIX e conduzido à *ascensão da matemática experimental* — um outro tópico da nova síntese. Quem são então os ""matemáticos experimentais"? São matemáticos que ensaiam as suas ideias em computadores; no essencial, usam o computador como um grande quadro preto. O objetivo deste novo "quadro preto" é muitas vezes o de efetuar uma verificação intuitiva das suas ideias. Nele, os matemáticos analisam a veracidade de certas conjeturas. Graças ao

computador, a abstração e a construção, por vezes vistas como polos opostos em matemática, estão a tornar-se parceiras íntimas na investigação.

A ascensão da *perspetiva computacional dos processos físicos* relaciona-se de perto com estas ideias matemáticas. A noção fundamental dessa perspetiva é o facto de o mundo material e os sistemas dinâmicos nele contidos serem computadores. O cérebro, o tempo atmosférico, o sistema solar, as próprias partículas quânticas, são todos eles computadores. Não se *parecem* com computadores, como é evidente, mas estão permanentemente a computar as consequências das leis da natureza. De acordo com a perspetiva computacional as leis da natureza são algoritmos que regulam o desenvolvimento temporal do sistema, à semelhança dos verdadeiros programas nos computadores. Os planetas, por exemplo, ao girarem em torno do Sol, estão a realizar computações analógicas das leis de Newton.

De acordo com a orientação tradicional das ciências naturais, esta perspetiva computacional não tem quase conteúdo. Ao fim e ao cabo, tudo é uma simulação de si mesmo. Que mais aprendemos sobre a natureza ao adotar esta perspetiva? Qual a razão para se dizer que tudo o que existe é um processo computacional?

Esta crítica, no entanto, não atinge o fulcro da questão. A perspetiva computacional não explica nada que não possa ser explicado segundo a perspetiva tradicional. No entanto, ela cria, de facto, um novo ponto de vista (como o ponto de vista criado pela revolução de Copérnico) que unifica a ciência de uma forma diferente. Cria um terreno diferente para o pensamento acerca da realidade material que parece valer a pena explorar. Ninguém sabe ainda aonde é que vai conduzir.

Um outro tópico importante das ciências da complexidade é a *noção de um sistema seletivo*. As ideias de Darwin-Wallace sobre a seleção natural, quando generalizadas e abstraídas para o conceito de sistema seletivo, podem ser aplicadas a uma grande variedade de outros fenómenos. Sempre que se observa um padrão ou uma estrutura, tal como a vida na Terra, o comportamento animal ou a hierarquia da sociedade, pode-se

perguntar: Como surgiu esse padrão? Como foi selecionado esse padrão específico? Os sistemas seletivos fornecem-nos um caminho novo para responder a essas questões. Trata-se de um caminho que tem de influenciar cada vez mais as ciências psicológicas e sociais. É, de facto, agora possível desenvolver uma ciência da sociedade que só minimamente é destorcida pelos valores políticos e sociais do cientista que investiga, à semelhança do que se passa nas ciências naturais. (Reconheço que mesmo essa pretensão reflete em si mesma um valor.)

A ascensão do paradigma evolucionário-biológico das ciências sociais, tal como é enunciado em "*Prospects for a synthesis in the human behavioral sciences*", um ensaio de Irven DeVore, de Harvard, um autodenominado "biólogo comportamental", tem para mim um significado especial. DeVore é claro sobre a sua própria perspetiva quando diz: "O mais importante avanço intelectual ocorrido durante a minha vida profissional tem sido o desenvolvimento de uma nova e entusiasmante teoria de ecologia comportamental de vertebrados ou 'sociobiologia'. Este conjunto de avanços teóricos revoluciona verdadeiramente a nossa compreensão do modo como a evolução moldou o comportamento animal. No centro desta revolução está a demonstração de que a seleção natural é vista de um modo mais acertado do 'ponto de vista' do indivíduo e do gene do que do ponto de vista de um processo que atua no grupo ou na espécie. Podemos agora, com um certo rigor, analisar alguns comportamentos complexos como a agressão, o altruísmo, os cuidados paternais, a escolha do parceiro e os padrões de nutrição. [...] Muitos de nós sentiram, quase desde o início, que este novo e poderoso corpo da teoria iria revolucionar também o estudo do comportamento humano." DeVore prossegue dizendo que "não existe de momento nenhuma teoria profunda, elegante ou mesmo intelectualmente satisfatória nas ciências sociais". Mas sente que as novas ideias biológicas podem ser um passo na direção certa.

Um dos fundadores das ciências sociais, Emil Durkheim, comparava uma sociedade de humanos individuais a um organismo inteiro, onde as instituições sociais eram aparentadas a órgãos, e os indivíduos, a células dentro dos órgãos. Mas esta imagem, que influenciou muitos cientistas sociais desde então, é inadequada, se não mesmo errada — as células num organismo

são geneticamente idênticas e cooperam entre si, ao contrário dos indivíduos, que são geneticamente distintos e nem sempre cooperam entre si. Segundo os comentários de DeVore, a noção de "gene egoísta" é o elemento novo e importante do pensamento evolucionário moderno — são os genes que tentam sobreviver e, como genes, fazem-no sem se preocuparem com o grau ou com a espécie, a não ser que isso também lhes traga alguma vantagem do ponto de vista da sobrevivência. Muitos cientistas sociais (apesar de sentirem que ultrapassaram largamente as posições de Durkheim) resistem à ideia de a sobrevivência dos genes de um indivíduo, juntamente com outros partilhados com a família, servir de fundamento ao pensamento sobre interações humanas, incluindo a formação de grupos sociais. Muitas vezes aceitam a importância da perspetiva biológica, mas, ainda assim, pensam que é o grupo ou a espécie que são selecionados, e não um conjunto de genes. Por exemplo, os sociólogos atribuem muitas vezes significado ao grupo social ou à instituição, estudando-os como objetos sociais. Porém, não dispondo de base material, esses objetos não podem estar sujeitos a uma teoria científica (ver o capítulo 9: "Esperando o messias"). Do ponto de vista kantiano, o erro mais comum na busca de teorias profundas nas ciências sociais é a aplicação de métodos da razão teórica — que se relacionam com o mundo natural — ao domínio da razão prática — que se refere aos juízos éticos e morais.

O antropólogo Richard W. Wrangham faz o enquadramento do debate quando nota que "uma síntese não aparecerá facilmente... De um lado, os biólogos tendem a trivializar as complexidades introduzidas por características como a linguagem, a cultura, o simbolismo, a ideologia e as redes sociais intricadas. Do outro lado, a maioria dos cientistas sociais tem uma forte aversão ao reducionismo, mesmo dentro das suas próprias áreas, para já não falar de quando são importadas da biologia, uma cultura que lhes é estranha. Um casamento forçado de biólogos e cientistas sociais tem mais probabilidades de gerar hostilidades mútuas e descendência disforme do que vigor híbrido." As diferenças que aqui se referem entre a abordagem biológica, que vê uma base genética e material para o comportamento social, e a abordagem tradicional da ciência social, que vê "tipos" e formas sociais como os verdadeiros determinantes, estão relacionadas com o debate sobre o carácter da ciência cognitiva.

A perspetiva biológica das ciências sociais veio para ficar e vai integrar as novas ciências da complexidade. As interações sociais na espécie humana e a formação da cultura podem ser estudadas como um sistema seletivo.

Um grande passo nesta direção foi recentemente dado por Robert Boyd e Peter J. Richardson no seu importante livro *Culture and the Evolutionary Process*, um estudo matemático da transmissão cultural. Ao contrário dos sociobiólogos, Boyd e Richardson pensam que "os pormenores da transmissão cultural serão provavelmente essenciais para uma compreensão da evolução do comportamento humano".

Embora as ideias sociobiológicas tenham sido aplicadas com bons resultados ao comportamento animal, serão elas também aplicáveis ao comportamento humano? Ao fim e ao cabo, os seres humanos, ao contrário dos animais, têm cultura — um conjunto de valores e técnicas que podem ser transmitidos de geração em geração por meio da aprendizagem, que não é um mecanismo genético. Boyd e de Richardson, que desenvolvem o seu ponto de vista em grande pormenor, consideram as transmissões genética e cultural como fatores importantes para a determinação do comportamento humano — trata-se, pois, de uma teoria dual de hereditariedade. Argumentam eles: "Se a aquisição de informação por esforço individual [transmissão genética] é custosa quando comparada com a aquisição por aprendizagem social [transmissão cultural], uma teoria explícita dos mecanismos de evolução da cultura pode revelar-se necessária." Isto representa um compromisso entre a linha dura sociobiológica e o ponto de vista tradicional que considera os fatores sociais e culturais como determinantes objetivos do comportamento humano. De certa maneira, está-se a examinar quantitativamente a fronteira entre os domínios do mundo material e do mundo cognitivo. É um debate enquadrado no conceito geral de um sistema seletivo, independentemente da posição que se tome neste debate entre genes e memes.

É estranho que o pensamento evolucionário tenha tido tão pouco impacto na psicologia. Como John Tooby, um colega de DeVore em Harvard, diz: "Os homens, tal como outros organismos, foram criados por meio de um processo evolutivo.

Consequentemente, todas as características humanas inatas também são produto de um processo evolutivo. Apesar de as implicações deste facto terem sido rapidamente apreendidas pela investigação fisiológica humana, tem havido, até há pouco tempo, uma forte resistência à aplicação destes conhecimentos ao comportamento humano. Mas a evolução e os algoritmos inatos que regulam o comportamento humano têm entre si uma relação de causa e efeito: estão a ser descobertas relações, sob a forma de leis, entre o processo da evolução e a psicologia inata que este moldou. Estas relações sob a forma de leis constituem a base de uma nova disciplina — a psicologia evolucionária — que explora as características (selecionadas naturalmente) de "*design*' dos mecanismos que controlam o comportamento. Tem sido lento o estabelecimento desta síntese entre evolução e psicologia... o atraso pode ser em parte atribuído a dois obstáculos tremendos colocados à integração destes dois campos: a inexatidão inicial da teoria evolucionária e a inexatidão, que ainda persiste, das ciências sociais, incluindo a psicologia." Tooby descreve depois o declínio atual deste obstáculo. O computador desempenha um papel importante no estabelecimento da exatidão necessária, pois permite realizar modelos computacionais dos algoritmos psicológicos que regulam o comportamento e mostrar como eles se conformam com trilhos adaptativos. A aplicação destas ideias à psicologia, comenta Tooby, "está claramente na sua infância. Passará muito tempo antes que compreendamos as fronteiras entre a psique 'biológica' e a psique 'cultural', mas a tarefa está em marcha".

A noção geral de um sistema seletivo, aplicada com bons resultados em muitas áreas, inspira-se na evolução biológica. Este padrão de inspiração será um tópico frequente nas ciências da complexidade — *a descoberta de novos princípios gerais inspirada por sistemas biológicos*. A evolução é um exemplo desse tipo de princípios, embora haja outros. A resposta imunológica, tal como é entendida por Niels Jerne, pode ser usada como modelo de comportamento adaptativo e de aprendizagem de computadores. Os diversos componentes do cérebro e os sistemas visual e olfativo ensinaram-nos novos princípios de organização de redes. Alguns destes princípios biológicos de organização serão descritos num capítulo 6: "Conexismo/Redes neurais"

Prevejo que no futuro iremos também ver surgir um estudo interdisciplinar de sistemas biológicos fundamentais — como a célula, o cérebro, a síntese da proteína, a evolução —, representando uma união da física, especialmente da física de sistemas ilineares, da matemática e da biologia. Veremos também a *ascensão da biologia computacional* — o estudo de sistemas biológicos e da vida artificial realizado num computador. A importância na biologia das ciências naturais mais exatas está a aumentar; no futuro, será bastante profunda. A modelação computacional facilitará esta influência. Os sistemas biológicos serão vistos como entidades quânticas extremamente complexas (no fundo, é isso que eles são) funcionando de acordo com regras bem definidas. Este desenvolvimento terá também o seu lado prático. No seu livro *The Youngest Science*, Lewis Thomas descreve a transformação da medicina, desde a arte do curandeiro, que pouco podia fazer, até à ciência laboratorial da medicina moderna, com todo o sofrimento e toda a esperança que tal transformação implica.

Ainda um outro tópico na nova síntese é o *estudo da dinâmica ilinear*. Um capítulo posterior (n.º 4) ("A vida pode ser bastante ilinear") focará exclusivamente este desenvolvimento matemático das ciências naturais. Aqui, basta dizer que a maioria das equações que se encontram nas ciências naturais são equações ilineares. Embora a resolução analítica destas equações seja difícil, para já não dizer impossível, elas não podem ser ignoradas quando se pretende compreender fenómenos complexos. Com a chegada do computador essas equações já podem ser resolvidas numericamente com grande eficiência. Como consequência, os cientistas descobriram soluções caóticas escondidas em equações determinísticas, ilineares, caos que descreve fenómenos como o tempo meteorológico ou o comportamento de redes neurais. Muitas destas soluções caóticas são descritas no excelente livro *Chaos*[1], de James Gleick. Outros exemplos de sistemas ilineares são o sistema coração-pulmões, a evolução, a resposta imunológica, a economia global — praticamente tudo o que pode ser descrito quantitativamente. O estudo de sistemas ilineares, por meio da utilização de computadores, abre uma nova perspetiva da realidade, um mundo nunca antes vislumbrado.

Um outro tópico sob a égide da complexidade é *a ênfase nos sistemas paralelos (redes) em detrimento dos sistemas seriais (hierárquicos)*. Lembro-me de efetuar ligações de lâmpadas num circuito em série nas minhas aulas de Eletrotecnia, quando andava no ensino preparatório. Num circuito em série, um fio vai desde a fonte de corrente até à primeira lâmpada, daí vai para a segunda e terceira lâmpadas, donde finalmente regressará à fonte. No circuito em paralelo, dois fios vão até à primeira lâmpada, cada um deles ligando efetivamente ao filamento da lâmpada, depois os dois fios continuam até à lâmpada seguinte, e por aí adiante. O circuito em série tem a vantagem de ter menos ligações (um fio). Mas é vulnerável — se uma lâmpada é retirada ou se se funde, o circuito é interrompido e todas as lâmpadas se apagam. Pelo contrário o circuito em paralelo tem mais fios, mais ligações, mas graças a esta redundância é muito menos vulnerável. Se uma lâmpada é retirada, as outras podem continuar a funcionar.

Esta distinção entre sistemas em série e em paralelo é bastante geral. O sistema em série pode ser generalizado a um sistema hierárquico como o organigrama em pirâmide de uma companhia, da igreja ou das forças armadas. Os sistemas hierárquicos são concebidos de modo a existir uma "parte de cima" e uma "parte de baixo" em todos os níveis. Se se retirar a "parte de cima", tudo o que está por baixo fica desligado do resto do sistema — tal como nas lâmpadas em série.

Os sistemas paralelos podem ser generalizados para o que eu chamarei de "rede". Uma rede não tem nem parte de cima nem parte de baixo. Em vez disso, tem uma diversidade de ligações que aumentam as interações possíveis entre os componentes da rede. Não existe uma autoridade executiva central que supervisione o sistema. Uma rede tem muita redundância, de tal modo que, se uma parte da rede é destruída, a rede como um todo continua a funcionar.

A maioria dos sistemas reais são misturas de hierarquias e de redes. Um exemplo é o sistema bancário internacional. Cada banco ou instituição financeira é internamente uma hierarquia, no entanto o sistema financeiro global, que é constituído por todas estas instituições financeiras, forma uma rede — não está ninguém a tomar conta do todo. O cérebro é também uma rede,

mas tem ao mesmo tempo uma organização hierárquica. (Não foi ainda encontrado nenhum sistema de controlo geral do cérebro.) O estudo desse tipo de redes mistas faz parte das ciências da complexidade.

É interessante aplicar estas ideias opostas de hierarquias e de redes à própria arquitetura das ciências. A arquitetura reducionista das ciências corresponde a um sistema hierárquico. A teoria quântica de campos, uma vez que lida com as leis fundamentais que governam as coisas mais pequenas, é a "mais reduzida". Depois vêm outras ciências fundamentais — a física nuclear, a física atómica e a química —, seguidas pelas ciências da vida. A imagem que surge da relação das ciências entre elas assemelha-se ao organigrama de uma companhia.

Podemos também, no entanto, ver a arquitetura das ciências como uma rede — sem "parte de cima" nem "parte de baixo", sem ciência mestre. As várias ciências relacionam-se simplesmente entre si de acordo com o aspeto da realidade que está a ser examinado. Poderíamos dividir as ciências em ciências de simplicidade e ciências de complexidade ou em ciências extensivas e ciências intensivas, e por aí adiante. Uma rede podia representar todas estas divisões. Algumas pessoas não gostam desta imagem da rede por não ser clara, rigorosa e definida. Porém, a mesma falta de clareza caracteriza as relações lógicas entre as várias ciências, uma vez abandonado o ponto de vista reducionista.

Finalmente, e mais importante que tudo, a nova síntese focará também *o estudo dos sistemas complexos*. Não dei ainda nenhuma definição de complexidade (o próximo capítulo abordará esse tema), exceto para dizer que os sistemas complexos, pelo menos ao nível fenomenológico, têm muitos componentes qualitativamente distintos. O mecanismo que encobre, no entanto, pode ser bastante simples. Nas últimas décadas tem crescido o interesse pelo cérebro, pelas redes neurais, tanto biológicas como artificiais, pelos sistemas adaptativos, pelo comportamento dos insetos sociais, pelos jogos e por muitos outros exemplos de sistemas complexos. À medida que o nosso conhecimento da complexidade se desenvolve, podem ser descobertas leis de sistemas complexos que se aplicam a uma variedade de sistemas, independentemente da disciplina em que possam surgir. As leis da

seleção natural e artificial, por exemplo, podem vir a ter aplicação geral numa variedade de sistemas complexos, quer sejam sociais, quer sejam económicos, quer sejam biológicos. Podemos assim ver de uma nova forma a unidade da ciência.

A imagem que transmiti ao leitor da hipótese de uma nova síntese da ciência, feita com base em alguns destes tópicos, está necessariamente incompleta, uma vez que essa síntese está ainda no seu estado inicial. Como todos os grandes desenvolvimentos científicos, ela será construída por cima daquilo que já conhecemos. Em particular, irá pressupor que a visão reducionista das ciências naturais está correta e esforçar-se-á por demonstrar que o comportamento complexo pode surgir a partir de vários elementos simples. O grande número de componentes de um sistema complexo que observamos pode ser o resultado de um pequeno número de elementos simples que nós não vemos.

A emergência das ciências da complexidade é um dos desenvolvimentos mais excitantes na atual vanguarda da fronteira científica. É difícil, mesmo num livro, cobrir essa fronteira em expansão. Mas ao longo dos próximos capítulos irei fornecer ao leitor alguns "instantâneos" pormenorizados do que se está a passar em diversos pontos ao longo dessa fronteira — desde as ideias matemáticas, abstratas, sobre a complexidade até às deias mais aplicadas. A maioria dos meus "instantâneos" será retirada das ciências naturais e não das ciências sociais, uma vez que estou mais familiarizado com essa área. Mas acredito, como referi neste capítulo, que algumas das consequências mais interessantes das ciências da complexidade serão observadas nas ciências sociais.

Nas últimas décadas temos assistido à emergência da cultura do computador — com uma nova classe de pessoas e um novo meio de criação de conhecimento. A cultura anterior, quer seja na comunidade académica, quer no domínio económico, não se apercebeu ainda de todas as implicações desta mudança. É uma mudança que ninguém sabe ainda para onde se encaminha; há muitos profetas, mas não há nenhum messias. A ciência parece avançar aos solavancos nos dias de hoje. São indícios de uma Era de fermento e mudança. Irão surgir líderes intelectuais que tentarão pôr ordem nesta síntese emergente, criando novas

instituições à medida que essa ordem se estabelece. Isto está, de facto, já a acontecer à medida que são criados novos centros para o estudo da complexidade nas universidades ou estabelecidos como institutos independentes. Mesmo a estrutura departamental das universidades acabará por refletir a nova síntese da ciência.

Uma nova visão geral debate-se para nascer à medida que os cientistas avançam para o exame do grande conjunto de sistemas complexos. Não consigo antever a forma final desta nova arquitetura do conhecimento, mas tão-só algumas das suas características, das quais fiz um esboço acima. Passar-se-ão décadas e séculos antes que o pó assente e um novo enquadramento consensual do conhecimento emirja — um enquadramento que será inspirado pela nossa compreensão de ordem invariante da natureza — o código cósmico.

O novo conhecimento que vamos adquirir irá causar uma transformação da forma como a nossa sociedade está organizada e usa a informação e a tecnologia. Se os sistemas complexos puderem ser compreendidos "de baixo para cima", muita da incerteza do planeamento pode ser eliminada. Este conhecimento, no entanto, não surge espontaneamente. Tanto os recursos humanos como os recursos materiais têm de ser destinados a este fim. São necessários investimentos de vulto em desenvolvimentos educacionais e comerciais.

As sociedades avançadas têm de começar a aceitar o desafio desta nova fronteira da ciência. Penso que os Estados Unidos deveriam dar início a uma política e a uma estrutura institucional para as ciências da informação e para as ciências da complexidade, semelhantes às que deram origem à Fundação Nacional de Ciência e aos institutos nacionais de saúde há uma década atrás. No seu início, estas ciências devem ser financiadas por iniciativa governamental. O desenvolvimento comercial só surgirá depois. Os dirigentes políticos têm de compreender que os projetos aos retalhos não são produtivos; torna-se necessária a promoção de uma cultura científica inteiramente nova.

Estou convencido de que as sociedades que dominarem as novas ciências da complexidade e que conseguirem converter esse conhecimento em novos produtos e em novas formas de

organização social se tornarão as superpotências culturais, económicas e militares do próximo século. Embora se deposite uma grande esperança em tal desenvolvimento, existe também o perigo terrível de este novo ramo do conhecimento ir agravar as diferenças entre aqueles que o têm e aqueles que o não têm.

E agora, para começar, vamo-nos debruçar sobre o nível mais básico e ver o que os matemáticos têm a dizer sobre a complexidade.

[1] Em português: Caos. A Construção de Uma Nova Ciência, Gradiva, 1989.

CAPÍTULO 3

– ORDEM, COMPLEXIDADE E CAOS –

A maioria dos números do contínuo não pode ser definida por um conjunto finito de palavras.

MARK KAC

Que é a complexidade? Até agora temos usado o termo "complexidade" de uma forma bastante geral, adotando o seu significado em linguagem corrente — uma situação é complexa se existirem diversas componentes diferentes a interagir. Chegou agora a altura de ultrapassar esta definição geral. A complexidade, como iremos tentar concluir neste capítulo, é uma medida quantitativa que pode ser atribuída a um sistema físico ou a uma computação que se situem algures entre a ordem simples e o caos completo. Um cristal de diamante, por exemplo, com os seus átomos bem arranjados, é algo "ordenado"; uma rosa, que possui uma combinação de ordem com aleatoriedade no conjunto das suas componentes, é "complexa"; o movimento das moléculas dos gases é verdadeiramente "caótico". A complexidade cobre, portanto, o vasto território compreendido entre a ordem e o caos. Curiosamente, sabemos muito sobre sistemas totalmente ordenados, como os cristais, nos quais os átomos estão bem ordenados numa rede, ou mesmo sobre a dinâmica de átomos simples isolados, como o átomo de hidrogénio. Sabemos também muito sobre sistemas completamente caóticos, como os gases, porque lhes podemos aplicar de modo bastante eficiente as leis da estatística. O caos garante um comportamento médio bastante estável, pelo que podemos encontrar as leis apropriadas. O domínio da complexidade, que se estende desde a ordem até ao caos, representa o grande desafio da ciência. Embora saibamos definir ordem e caos, como poderemos definir complexidade com maior exatidão?

Os matemáticos e os cientistas debruçaram-se sobre a complexidade, tentando encontrar uma definição de compromisso entre estas noções intuitivas e as exigências da exatidão. Certas pessoas evitam esse tipo de definições matemáticas exatas por acharem que elas reduzem a flexibilidade do pensamento. No

entanto, penso que o método matemático, por ser exato, melhora consideravelmente a nossa compreensão do que antes era elusivo. A clareza é o primeiro passo no sentido de uma compreensão mais profunda.

Vamo-nos esquecer por agora de qualquer ideia vaga que possamos ter sobre complexidade e vamos ver o que os matemáticos e outros cientistas descobriram. Neste capítulo iremos examinar vários conceitos de complexidade — nomeadamente a complexidade algorítmica, a complexidade computacional, a complexidade baseada na informação, bem como a complexidade física e a profundidade lógica. A abordagem fundamental que iremos efetuar começa pela definição de complexidade de um objeto abstrato — um número, neste caso. A partir daí, vamos poder compreender como é que essa definição se aplica a outros objetos do mundo físico.

Assim, para começar, vamos examinar o contínuo infinito dos números entre zero e um quando estes são escritos na forma de uma expansão decimal. O primeiro número deste conjunto é 0,00000... e o último é 0,99999..., em que "..." representa uma repetição indefinida. Alguns números deste contínuo, como

0,101010101010

parecem ser bastante ordenados e simples. Mas podemos também resolver gerar os algarismos de um dado número por meio de sucessivos lançamentos de um dado de dez faces, com os algarismos de 0 a 9 inscritos em cada face. Poderíamos então obter um número bastante desordenado, como

0,185320942116

Como poderemos caracterizar de forma mais exata a distinção entre os dois números? Vamos responder a esta questão com uma outra pergunta: como poderemos computar estes e outros números?

No seu trabalho pioneiro, Alen Turing distingue números "computáveis" de números "incomputáveis". Para tornar esta distinção exata, Turing imaginou que se escrevia um programa de computador, um assim chamado algoritmo, que computasse vários números. Como exemplo, consideremos o número

0,42857142

À primeira vista este número parece ser bastante aleatório e complicado. Poderíamos pensar que foi gerado lançando os dados. Mas suponhamos que descobríamos que este número é simplesmente 3 dividido por 7 expresso na forma decimal. Então, o algoritmo que computa este número seria simplesmente: "Divide 3 por 7 e imprime o resultado" — um programa simples. Um outro exemplo é o número de Champernowne

C = 0,12345678910111213141516171819202l...

que também parece ser complicado. Depois de uma observação mais cuidadosa, porém, vê-se que ele se constrói escrevendo ordenadamente os números inteiros. O seu programa, também bastante simples, podia ser escrito como: "Imprime ordenadamente os números inteiros." Da mesma maneira, o algoritmo de 0,101010101010 seria: "Imprime 10 seis vezes."

Tudo isto são exemplos de números "computáveis", porque existe um algoritmo simples que dá o número mesmo que este tenha um tamanho infinito, como é o caso da expressão decimal de $^{3}/_{7}$ ou do número de Champernowne. No entanto, existem números "incomputáveis" cujo único algoritmo conhecido consiste em escrever explicitamente o próprio número dentro do programa. Por exemplo, o único algoritmo que conheço para o número que foi gerado em cima por meio do lançamento de dados é: "Imprime 0,185320942116." É evidente que este ainda não é um programa muito longo. Porém, se aumentássemos o número 0,101010101010 para um milhão de 01, o comprimento do programa não cresceria muito mais: "Imprime 01 um milhão de vezes." Pelo contrário, se acrescentássemos mais um milhão de algarismos ao número gerado pelo lançamento dos dados, o único programa que computaria este número seria: "Imprime 0,185320942116...", em que "..." representa um outro milhão de algarismos específicos. Teríamos então um aumento considerável do comprimento do programa.

Aprendemos com as ideias de Turing que é possível classificar diferentes números quanto ao comprimento do programa que é necessário escrever para os computar. Para os números "computáveis" é possível escrever um programa relativamente

curto, mesmo que eles tenham um tamanho infinito. Para os números aleatórios, "incomputáveis", o único algoritmo possível já contém explicitamente toda a informação do número — o algoritmo é pelo menos tão comprido como o número. Esta distinção serve para *definir* um número aleatório, tendo sido proposta independentemente em 1965 pelo matemático soviético A. N. Kolmogorov e por Gregory J. Chaitin, na altura um estudante de licenciatura do City College da City University de Nova York — os números aleatórios exigem programas computacionais que são pelo menos tão compridos como o próprio número. Nenhum destes dois matemáticos estava ao corrente de uma outra proposta, relacionada, que foi avançada em 1960 por Ray J. Solomonoff quando procurava uma definição para a simplicidade das teorias científicas (ao contrário das outras, que tinham a ver com a complexidade dos números).

Apesar de os programas que imaginámos para computar os números estarem escritos em linguagem corrente, nada impede que a cada letra do alfabeto seja atribuído um valor numérico. O programa poderia então ser codificado por uma cadeia de números inteiros. Todo o conteúdo de informação do programa pode, portanto, ser representado por um número do contínuo compreendido entre zero e um — tal como o número que deverá ser calculado pelo programa. Assim, o comprimento da cadeia de inteiros que representa o programa pode ser comparado com o comprimento do número que esse programa deverá computar.

Estamos quase a terminar. Porém, antes de darmos a "definição algorítmica de complexidade", temos de dizer o que é um "programa mínimo". Qualquer número particular pode ser computado por um número infinito de algoritmos diferentes. Por exemplo, o número 2397 pode ser obtido a partir dos programas: "Subtrai 3 a 2400.", "Soma 17 a 2380.", "Multiplica 51 por 47.", ou a partir de uma infinidade de outros programas. Uma das possibilidades, que tem para nós um interesse especial, é o *programa mínimo* — o programa que, uma vez codificado sob a forma de inteiros, apresenta o menor tamanho possível. Pode existir um, ou podem existir vários programas mínimos diferentes. Uma coisa, no entanto, é certa: a cadeia de inteiros, o número que representa o programa, tem forçosamente de ser aleatória. Caso não o fosse, de acordo com a definição de aleatoriedade que

demos atrás, poderíamos escrever um programa mais curto que computasse o número que representa o programa. Esse facto estaria em contradição com a nossa hipótese anterior de esse programa já ser mínimo.

Podemos agora enunciar a definição algorítmica de complexidade de um número como sendo simplesmente o comprimento do programa mínimo necessário para computar esse número. Podemos desta maneira atribuir uma medida quantitativa a cada número do contínuo, e esta é a definição algorítmica de complexidade.

De acordo com esta definição, a complexidade dos números aleatórios gerados por lançamento dos dados é, como já vimos, aproximadamente igual ao comprimento do número. Isto porque o algoritmo mínimo tem forçosamente que conter o próprio número. Pelo contrário, o comprimento do programa mínimo de números altamente ordenados, como 0,010101... ou $^{3}/_{7}$ = 0,42857142..., é bastante pequeno, o que faz com que a sua complexidade seja baixa. Entre os números cujo programa mínimo é curto e aqueles cujo programa mínimo é aproximadamente do tamanho do próprio número existem também outros números em que há uma mistura de ordem com aleatoriedade — é este o verdadeiro domínio dos "números complicados". São números que se situam entre a ordem e o caos.

Algumas pessoas reagem a todas estas definições matemáticas dizendo que elas só têm a ver com a complexidade de cadeias de números. Perguntam também o que tem tudo isto a ver com o mundo dos objetos físicos reais que pretendemos compreender. Um único exemplo mostrar-nos-á como todas estas ideias podem ter aplicação no mundo real. Pense-se na molécula de ADN de um animal específico (poderia ser o leitor). Esta molécula é uma sequência de pares de nucleótidos que nos diz como se produz uma réplica genética do animal. A esta sequência de pares de nucleótidos pode-se fazer corresponder um único número. Por exemplo, as quatro letras do código genético podem ser designadas, respetivamente, por 0, 1, 2 e 3. Assim, a molécula fica perfeitamente representada por uma sequência como 023011032221... Podemos portanto construir um número finito que represente o conteúdo de informação de uma molécula

de ADN e perguntar então: qual o comprimento do algoritmo mínimo que produz esse número?

Conhecemos o código das sequências de tripleto dos pares de nucleótidos dos vinte aminoácidos — os blocos que servem de base à construção das proteínas. Sabemos assim que o número não é totalmente aleatório, pois já contém bastante ordem em si — podemos olhar para o número de uma sequência de tripletos. Empiricamente, sabemos também que a molécula de ADN tem muita redundância — repetição (uma descoberta que nos confunde), e isso também representa ordem. Finalmente, sabemos ainda que esta molécula, em princípio, contém as instruções para se produzir o animal, todos os seus órgãos, a cor do cabelo, etc., o que também representa um conteúdo informativo altamente ordenado. Tudo isto apoia a tese de que o número que representa a molécula de ADN não é aleatório, não sendo, porém, perfeitamente ordenado — é um "número complicado". Caso pudéssemos conhecer o comprimento do algoritmo mínimo do número do ADN (provavelmente constataríamos que esse comprimento era menor do que o número em si), teríamos uma boa medida quantitativa da complexidade do animal.

É fácil ver como é que um número é atribuído a uma molécula de ADN porque esta não passa de uma cadeia codificada de pares de nucleótidos. Mas esta construção pode também ser aplicada a qualquer outro objeto constituído por matéria. Por uma questão de simplicidade, vamos restringir a nossa atenção a objetos constituídos com base nas seis dúzias de elementos. Estes átomos podem ser vistos como letras de um alfabeto e essas letras podem ser codificadas sob a forma de números, tal como acontece na criptografia. Nem só os átomos podem ser codificados, mas também os seus arranjos explícitos, as suas coordenadas dentro do objeto, o seu momento angular e mesmo a sua dinâmica. Assim, o estado material de um objeto, tal como uma cadeira ou o próprio universo, pode, pelo menos em princípio, ser representado por um único número. Um número bastante grande, diga-se de passagem.

Na década de 30, Kurt Gödel mostrou como se podem representar cadeias de símbolos, como os que aparecem numa

demonstração lógica, por meio de um só número (o número de Gödel ou número G). Existe assim um número único que pode ser associado a cada demonstração lógica. Dado um desses números, ele pode ser descodificado, a fim de se reconstituir a demonstração. A nossa construção de números de entidades físicas baseia-se numa ideia semelhante. Deveria ser possível (dependendo das leis físicas e da maneira exata pela qual decidimos codificar e estruturar) representar o estado das entidades físicas por um único número. Vou chamar a este número o número E, em que "E" quer dizer entidade. (Deixarei de lado a questão importante da dificuldade em encontrar este número na realidade.) A redução de todas as coisas a números é a mais alta fantasia pitagórica, uma fantasia que conduz à realização de um sonho da ficção científica. Com efeito, uma vez conhecido o número E de um objeto, podemos imaginar a sua transmissão por meio de um sinal eletromagnético para o outro lado da galáxia; aí, esse número poderia ser descodificado e usado para replicar o objeto — teríamos, por outras palavras, conseguido obter um transmissor de matéria. Desta maneira, pessoas e bens poderiam viajar através da galáxia a uma velocidade pelo menos igual à da luz.

Postas de lado estas ideias de ficção científica, uma vez conhecido o número E de um objeto, podemos perguntar qual é a complexidade algorítmica que lhe está associada. Estamos, então em condições de atribuir à complexidade do objeto uma medida quantitativa. Deste modo, podemos atribuir uma medida quantitativa de complexidade às pessoas, às galinhas, às pedras e às bactérias. E depois?

Depois conseguimos obter uma definição de complexidade bastante exata. Podemos, por isso, pôr agora em movimento a grande ferramenta da teoria matemática de complexidade e aplicá-la ao nosso problema da definição de complexidade das entidades materiais. Estas virtudes não deverão ser menosprezadas. No entanto, do ponto de vista prático ainda nos resta um problema. Para podermos conhecer a complexidade de um número, temos primeiro de saber o comprimento do algoritmo mínimo necessário para o computar, e para descobrir esse comprimento, temos de *provar* que esse algoritmo específico é, na

realidade, mínimo. Como poderemos fazê-lo? Isto leva-nos a um raciocínio de Gödel que contém algumas subtilezas.

Conforme argumentou Gregory Chaitin, para se provar qualquer coisa em matemática é necessário um conjunto de axiomas (as proposições do sistema, que não se provam e que se aceitam tal como são dadas) e um conjunto de regras de inferência — em resumo, aquilo a que se chama um sistema formal no sentido de David Hilbert (ver o capítulo posterior, n.º 12 — "Guerreiros do infinito"). A um tal sistema formal de axiomas pode ser atribuído um número G, uma vez que é constituído por cadeias de símbolos que exprimem os axiomas. Podemos, portanto, colocar questões sobre a complexidade de um tal número. Convém que o número G, que representa o conjunto dos axiomas de um sistema formal, seja aleatório. Se não o for, isso quer dizer que poderemos encontrar um algoritmo que é mais simples que o número que representa os axiomas. Poderíamos então reduzir esses axiomas a axiomas mais simples — não seriam então verdadeiros axiomas, mas teoremas baseados em outros axiomas mais simples.

Chaitin também defendia que, para além destes axiomas, era necessário um programa que os usasse para demonstrar que um algoritmo específico era, na realidade, mínimo. O programa que procurava as demonstrações podia também ser codificado sob a forma de um número. Uma vez de posse dos algoritmos e do programa, poderíamos começar a tentar demonstrar que certos números são aleatórios, mostrando que o seu algoritmo mínimo é pelo menos tão longo como o próprio número. Mas será que isto pode, na verdade, ser feito? Na realidade, não pode. E não pode porque o número cuja aleatoriedade pretendemos provar contém uma certa quantidade de informação. Além disso, o sistema formal de axiomas que usamos e o programa com que fazemos a demonstração da aleatoriedade do número podem ser codificados sob a forma de um número, o qual também contém, portanto, uma certa quantidade de informação. Assim, uma vez que não se pode usar um sistema que contém uma dada quantidade de informação para provar algo sobre um sistema que contém uma quantidade de informação relativamente maior, a nossa demonstração é impossível. Em matemática nunca se obtém mais informação de um sistema do que aquela que se lá pôs de início

com os axiomas e as primeiras regras. É como esperar que um rato engula um elefante. Uma vez que podemos sempre encontrar números muito grandes que contêm uma quantidade de informação arbitrariamente grande, existirão sempre números cujo conteúdo de informação será superior ao de qualquer sistema de axiomas. Não pode, por isso mesmo, ser encontrada uma demonstração da aleatoriedade desses números. Isto também quer dizer que existem números aos quais não podemos atribuir um algoritmo mínimo que lhes defina a sua complexidade. Nas palavras de Chaitin: "Neste tipo de sistemas formais não é possível demonstrar que uma série particular de algarismos tem uma complexidade [algorítmica] maior que o número de bits do programa utilizado para especificar a série. [...] Assim, existirão sempre números cuja aleatoriedade não pode ser provada." Uma conclusão razoável.

Ficamos numa situação muito estranha. Embora possamos provar que quase todos os números do contínuo são aleatórios, não podemos provar que nenhum número específico é verdadeiramente aleatório. A matemática está cheia deste tipo de ironias.

Debrucei-me sobre estas ideias matemáticas, de algum modo abstratas, sobre a complexidade algorítmica para mostrar não só a beleza da sua conceção, mas também as limitações fundamentais desta e de outras tentativas com ela relacionadas de definir complexidade. A definição algorítmica de complexidade serve de enquadramento à nossa reflexão sobre a complexidade e a aleatoriedade. No entanto, não serve como definição prática que possa ser usada em sistemas físicos.

Falámos de *complexidade algorítmica* — o comprimento do programa mais pequeno que realiza uma dada computação. Uma outra definição, que lhe está relacionada, é a de *complexidade computacional* — quanto tempo demora um computador a resolver um dado problema, que é uma medida direta da dificuldade do problema. De alguma maneira, a complexidade algorítmica é uma medida da complexidade espacial (o comprimento do algoritmo mínimo); a complexidade computacional é simultaneamente uma medida das complexidades temporal (o tempo que se demora a resolver um problema) e

espacial. Os problemas da complexidade computacional pertencem a um campo da investigação rico e em expansão, tanto no domínio da matemática como no das ciências da computação.

Este novo campo da complexidade computacional já tinha sido brevemente mencionado na nossa abordagem da perspetiva computacional das matemáticas. De acordo com esta perspetiva, os teoremas de matemática não se limitam a existir num domínio transcendental da mente, mas têm de ser verdadeiramente demonstrados — temos de decidir se o teorema é verdadeiro ou falso dentro de um sistema formal específico de axiomas e regras de inferência. Suponhamos que sabemos que um dado teorema pode ser decidido dentro de um sistema formal de axiomas. Podemos então perguntar: qual é o grau de dificuldade que há em decidir se o teorema é verdadeiro ou não? Este problema pertence ao domínio da complexidade computacional. Eis um exemplo:

A aritmética comum com que normalmente lidamos é um sistema formal, mas, como Gödel expôs na demonstração do famoso teorema que tem o seu nome, ela é indecidível — existem proposições dentro do domínio da aritmética que não podemos provar como verdadeiras. Mas existe uma forma restrita de aritmética com uma única operação — a adição de números positivos e zero —, chamada a aritmética de Presburger, que é decidível; todas as afirmações podem ser provadas. Assim, este sistema formal está sujeito ao teorema de Gödel. M. J. Fischer e Michael Rabin demonstraram que, na aritmética de Presburger, o tempo que demora a resolver o problema da decisão — decidir se um dado teorema é ou não verdadeiro — depende de um modo sobreexponencial do comprimento do enunciado do teorema. Isto quer dizer que apesar de *em princípio* todos os teoremas da aritmética de Presburger poderem ser provados, *na prática* a demonstração de muitos desses teoremas demoraria muitíssimo mais tempo do que o tempo de vida do universo. Este conhecimento poderá dar-nos o custo temporal da demonstração de teoremas em sistemas que até podem ser decidíveis. Como exclamou Joseph Traub, o director do Departamento de Ciências de Computação da Universidade de Columbia: "Que enriquecimento da questão de Hibert!" — referindo-se, evidentemente, à questão colocada por Hilbert da demonstração de todos os teoremas verdadeiros da matemática. Hilbert antevia

um projeto matemático com o objetivo de demonstrar sistematicamente todos os teoremas verdadeiros da matemática; simplesmente, ele nunca se interrogou *sobre o tempo* que demoraria a descoberta de todos os teoremas verdadeiros. Embora a perspetiva computacional aprofunde o nosso conhecimento do domínio do solúvel, ainda é muitas vezes difícil estabelecer a verdadeira complexidade computacional de certos problemas específicos (da mesma maneira que é difícil encontrar um algoritmo mínimo). No entanto, tem havido um progresso matemático significativo nesta área.

Se examinarmos a complexidade computacional de problemas matemáticos específicos, somos levados a classificá-los em duas grandes categorias — aqueles problemas que exigem tempos de computação geométricos (lei exponencial) e aqueles que requerem somente tempos de computação aritméticos (lei de potências). A resolução dos problemas que requerem tempos de computação exponenciais demora, em geral, várias vezes a idade do universo, mesmo quando se recorre a supercomputadores. Nem se pode pensar em alcançar uma solução exata. Os problemas cujos tempos de computação caracterizadores da complexidade computacional são simplesmente aritméticos podem, em geral, ser resolvidos dentro de um tempo razoável (entendendo-se por razoável o tempo antes do qual o matemático perde o interesse pelo problema).

É importante saber distinguir estas duas categorias de problemas, o que nem sempre é fácil. Muitas vezes não sabemos se o tempo necessário para a resolução do problema segue uma lei exponencial ou uma lei de potências. Julga-se que o problema do caixeiro-viajante — encontrar a trajetória mais curta para visitar seis ou mais cidades, passando uma vez por cada cidade e regressando depois à cidade original — é um problema do tipo exponencial, mas isso nunca foi provado. Não se pode garantir que uma pessoa inteligente não irá um dia encontrar um algoritmo para a resolução deste problema, com tempos de computação que seguem uma lei de potências. Os matemáticos, no entanto, conhecem a classificação de muitos problemas — parte de um corpo crescente de conhecimento puro no domínio da complexidade computacional. Podem, assim, determinar o tempo que demora a resolução de certo tipo de problemas.

O domínio da complexidade computacional atraiu já alguns dos melhores matemáticos em todo o mundo e deu origem ao novo domínio da *complexidade baseada na informação*, desenvolvido por Joseph Traub e seus colegas. Gostaria de descrever esta ideia, pois ela tem algumas implicações práticas.

O tipo de problemas examinado pelas pessoas que trabalham no campo da complexidade computacional inclui normalmente problemas completamente específicos, como é o caso do problema do caixeiro-viajante. Todas as cartas estão na mesa com a face voltada para cima. A solução pode, em princípio, ser encontrada desde que se trabalhe o suficiente (pode não se saber é quanto tempo é preciso). A solução pode ser encontrada, porque toda a informação necessária à resolução do problema está logo no enunciado do problema.

Mas no mundo real a situação raramente é assim tão clara e exata. Só algumas das cartas estão na mesa. Como qualquer pessoa que tome decisões sabe, os problemas que encontramos no dia-a-dia não são muitas vezes especificados de forma exata — a informação está incompleta ou só podemos conhecer dados aproximados. "Assim", como observa Traub, "a complexidade computacional vem em dois sabores, dependendo do conjunto de suposições que se fazem sobre a informação. A informação está completa, é exata e é gratuita, como no caso do problema do caixeiro-viajante? Ou a informação é parcial, está contaminada e tem um custo, como acontece em inúmeros problemas do dia-a-dia?" O objetivo dos cientistas que trabalham no campo da complexidade baseada na informação "consiste em criar uma teoria geral sobre problemas com informação parcial ou contaminada e em aplicar os resultados dessa teoria à resolução de problemas específicos em diversas áreas". Este é o tipo de estratégia que será necessário adotar para enfrentar problemas no campo das ciências biológicas, comportamentais ou sociais. Só temos, por exemplo, informações parciais ou contaminadas sobre o cérebro, o comportamento animal ou a economia mundial. Que poderemos esperar vir a saber (computar) sobre esses sistemas, e qual é a confiança que podemos atribuir a esse conhecimento? Estes são problemas da teoria da complexidade com base na informação que estão na vanguarda das novas ciências da complexidade.

Termino assim a apresentação sumária de alguns dos conceitos mais importantes da descrição matemática da complexidade. De um ponto de vista intuitivo, estes conceitos matemáticos de complexidade, apesar de exatos, deixam uma sensação de insatisfação. A complexidade, como medida de objetos físicos, deveria situar-se algures entre a ordem e o caos. No entanto, com a definição algorítmica de complexidade, um número é tanto mais complicado (caótico) quanto mais aleatório for. Esta definição não corresponde à ideia de que a complexidade se situa algures entre a ordem e o caos. Na verdade, a própria denominação de definição algorítmica de *complexidade* parece ser um pouco infeliz. Trata-se, na realidade, de uma definição de *aleatoriedade*, e não de complexidade.

Para tornar clara esta conclusão, vamos voltar ao nosso exemplo da molécula de ADN — uma molécula que é, sem dúvida, muito complicada. Apesar disso, a molécula de ADN é ordenada. Mostra uma ordem essencial, pois contém as instruções para a construção do animal. Se compararmos uma molécula de ADN com uma outra molécula de igual comprimento na qual os quatro pares de nucleótidos estão combinados de forma aleatória (por meio do lançamento de um dado de quatro faces), então, de acordo com a definição algorítmica de complexidade, esta molécula aleatória é mais complexa do que a verdadeira molécula de ADN. Mas, de facto, nada pode ser construído a partir da informação contida naquela molécula aleatória — essa informação não passa de um conjunto de disparates ao acaso.

Um outro exemplo é o da linguagem. Tanto a linguagem escrita como a oral são, claramente, muito complexas quando comparadas com o produto do trabalho de um macaco que fosse colocado perante uma máquina de escrever — um conjunto aleatório de letras sem sentido. No entanto, a "definição algorítmica de complexidade" atribui uma maior complexidade ao resultado do trabalho do macaco. Assim, a definição algorítmica de complexidade, apesar de trazer alguma luz ao problema da definição de complexidade, não é ainda aquilo que procuramos.

Alguns cientistas, insatisfeitos com as definições algorítmica e computacional de complexidade, quer por esta razão, quer pelo facto de elas não poderem ser usadas de nenhuma forma prática

para indicar o grau de complexidade de um objeto, propuseram outras definições. Em 1985, T. Hogg e Bernard Huberman, do Centro de Pesquisa Xerox em Palo Alto, propuseram *uma definição física da complexidade* de um sistema, que se baseia na sua *diversidade*. A medida por eles adotada tem a virtude de se anular tanto para sistemas completamente ordenados como para sistemas completamente aleatórios e de ter o seu máximo no domínio compreendido entre aquelas duas situações extremas, em conformidade com a nossa noção intuitiva de complexidade.

Para definir complexidade, Hogg e Huberman utilizam a noção de uma hierarquia que "pode corresponder à disposição estrutural do sistema ou, de uma forma mais geral, ao agrupamento das partes devido à sua interação. Em particular, se os componentes mais fortemente interativos forem agrupados e este procedimento for repetido para todos os agrupamentos resultantes, obtém-se como resultado uma árvore ramificada [como um organigrama] que representa a hierarquia do sistema. Este tipo de organização pode ser encontrado na física, onde os *quarks* formam hadrões, que por seu turno formam núcleos, depois átomos, moléculas, etc. Da mesma maneira, na computação os programas são criados por meio da interligação de sub-rotinas. Esses programas formam então eles próprios estruturas de um nível mais elevado, como sejam os sistemas operativos e as redes de trabalho." Uma vez estabelecida e definida uma tal hierarquia, é possível atribuir uma medida à sua complexidade, tendo em atenção a diversidade das interações dos vários componentes. De acordo com Hogg e Huberman, esta "é a característica fundamental subjacente ao comportamento complexo de sistemas constituídos por partes elementares".

Fazendo uso das propriedades matemáticas das hierarquias, Hogg e Huberman dão uma definição exata de complexidade que obedece à condição de atingir um máximo no intervalo compreendido entre a ordem e o caos. Tanto uma hierarquia completamente ordenada e repetitiva como uma hierarquia desordenada e caótica têm complexidade zero. Uma rosa é mais complicada do que um cristal ou do que um gás. Isto já nos dá uma sensação de que avançámos. No entanto, antes de se poder utilizar esta definição de complexidade, é necessário estabelecer a hierarquia adequada. A maneira de o fazer nem sempre é

evidente. Talvez a complexidade resida na própria definição da hierarquia e não seja intrínseca ao sistema. Esta definição tem sido criticada por alguns cientistas que a acusam de ser demasiadamente artificial.

Uma outra tentativa de definição da complexidade foi feita por Charles Bennett — um investigador da IBM. Também ele procurou uma definição de complexidade pela qual fosse atribuída a uma rosa um maior grau de complexidade do que a um gás de moléculas. Em vez de se referir à complexidade de um sistema, ele refere-se à sua "organização". A noção com que trabalha é, porém, a mesma.

Bennett interessa-se muito especialmente pelo comportamento de sistemas auto-organizados. Trata-se de sistemas que obedecem estritamente à segunda lei da termodinâmica (a lei que afirma que qualquer sistema fechado se deteriora), mas que violam o seu espírito. Um sistema auto-organizado baixa a sua entropia (uma medida do seu grau de desorganização) libertando entropia para o exterior e evitando assim a sua deterioração. Um exemplo do desenvolvimento de um sistema auto-organizado é o crescimento de uma planta ou de um cristal. O primeiro ponto a salientar sobre sistemas auto-organizados é que eles são realmente complexos — altamente organizados. O segundo é que atingem essa complexidade a partir de um sistema bem mais simples. A ideia de Bennett para a organização ou a complexidade de um sistema está relacionada de perto com a dificuldade do trajeto desde o sistema simples de partida até ao sistema complexo inteiramente desenvolvido.

Bennett expressa as suas ideias usando a teoria da informação e fornece a seguinte ilustração: "O problema da definição de organização está relacionado com o da definição do valor de uma mensagem em oposição ao seu conteúdo informativo. Uma sequência típica de lançamentos de moeda ao ar tem um alto conteúdo de informação, mas muito pouco valor como mensagem; um calendário que forneça as posições diárias da Lua e dos planetas durante vários anos não contém mais informação do que as equações do movimento em conjunto com as condições iniciais a partir das quais foram calculadas essas posições. No entanto, esse calendário poupa ao seu possuidor o

esforço de recalcular essas posições. O valor de uma mensagem não parece, assim, residir na sua informação (as suas componentes absolutamente imprevisíveis), nem na sua redundância óbvia (repetições textuais, frequências de algarismos desiguais), mas sim naquilo a que se pode chamar redundância escondida — componentes só dificilmente previsíveis, coisas que o recetor poderia ter, em princípio, adivinhado sem nada lhe ter sido dito, mas só com um custo considerável em dinheiro, tempo ou computação. Por outras palavras, o valor de uma mensagem é a quantidade de trabalho, matemático ou de um outro tipo que é, plausivelmente, efetuado pelo seu emissor e a cuja repetição o seu recetor será poupado...

"Estas ideias podem ser formalizadas usando a teoria de informação algorítmica: a causa mais plausível de uma mensagem identifica-se com a sua descrição algorítmica mínima, e a sua 'profundidade lógica', ou conteúdo plausível de trabalho matemático, identifica-se (em termos gerais) com o tempo necessário para computar a mensagem a partir da sua descrição mínima."

Bennett identifica a "profundidade lógica" com a complexidade de uma entidade física. Apela implicitamente à *perspetiva computacional dos processos físicos*, segundo a qual os processos físicos são vistos como equações computacionais especificadas pelas leis da natureza. O sistema solar pode, segundo esta perspetiva, ser visto como um computador analógico empenhado na resolução das equações de Newton. Pela mesma ordem de ideias, podemos simular o comportamento ou o crescimento de um sistema físico num computador digital. Podemos começar com um conjunto muito elementar de regras ou algoritmos para realizar uma tal computação (a "descrição algorítmica mínima"), como as leis de Newton do sistema solar ou as regras da combinação molecular no caso dos sistemas vivos. A "profundidade lógica" de um objeto — a sua complexidade — é medida pela quantidade de tempo necessário a um computador para levar a cabo a simulação do desenvolvimento total desse objeto, partindo do algoritmo elementar e não atalhando caminho. A complexidade, neste sentido, é uma medida do grau de dificuldade envolvido na construção de algo a partir das suas partes elementares. Os diferentes tipos de *puzzles*, por exemplo,

podem ser classificados, do ponto de vista da complexidade, pelo grau de dificuldade da sua resolução.

Estas tentativas de definição de complexidade usando a "profundidade lógica" ou a diversidade numa hierarquia são extremamente estranhas. No entanto, suponhamos que era encontrada uma verdadeira definição de complexidade. Para que serviria essa definição? Não teria muita utilidade — pelo menos para os físicos —, a não ser que o grau de complexidade de um objeto entrasse como mais uma variável nas leis físicas, variável essa que se iria juntar a outras variáveis características do objeto físico, já existentes, tais como a temperatura ou a entropia. Nenhuma das atuais propostas de definição de complexidade das entidades físicas implica que a complexidade seja uma variável a ser incluída nas leis físicas.

Se olharmos para as tentativas de descoberta de uma definição física de complexidade de um objeto, vemos que aí existe algo de muito estranho. Imagine-se que alguém conseguia descobrir uma definição de complexidade dos objetos físicos, uma definição com que toda a gente concordasse. Poderíamos então medir a "complexidade" de um objeto da mesma maneira que medimos a sua temperatura. Rochas, frangos e estrelas teriam todos associada uma certa quantidade de "complexidade". Mas seria uma noção bem esquisita. Rochas, frangos e estrelas são todos complexos, mas complexos de diferentes maneiras. São todos qualitativamente diferentes. As rochas são feitas de diferentes compostos e de cristais, os frangos são feitos de células e as estrelas são feitas de gases condutores. Reduzir todas essas diferenças essenciais — essenciais a qualquer descrição da sua complexidade — a um único número parece ser uma simplificação exagerada da situação. A parte mais interessante da complexidade dos sistemas físicos reside nos seus pormenores — na forma como eles se relacionam. Seria desejável fazer evoluir estas noções vagas sobre a complexidade dos objetos físicos para algo mais exato. No entanto, uma definição mais exata teria de respeitar a natureza complexa de alguns objetos materiais. Até agora uma tal definição útil ainda não foi proposta. A minha opinião pessoal é que uma definição útil da complexidade dos objetos, como propriedade física intrínseca desses objetos, é algo que irá continuar a escapar-nos.

É possível que, ao fazer a complexidade desempenhar um papel direto nas leis físicas, se esteja a exigir demais. Se, em alternativa, se adotar a ideia de que a natureza é um computador gigantesco, cujas operações imitamos nas nossas próprias simulações, uma definição quantitativa da complexidade já poderia ser útil. A noção de complexidade tem o seu habitat no mundo da computação. A partir do momento em que adotamos a perspetiva computacional, a complexidade pode, realmente, corresponder a algo de físico — o tempo de processamento de uma simulação computacional do processo natural.

Um exemplo, se bem que radical, da perspetiva computacional da natureza é a nova visão que esta perspetiva nos oferece sobre o crescimento animal. O processo de crescimento de um organismo físico pode ser visto como um processo computacional que calcula o conteúdo do ADN daquele organismo. O conteúdo informativo do ADN, como já vimos, pode ser codificado sob a forma de um número. A complexidade algorítmica daquele número é especificada pelo comprimento do seu algoritmo mínimo. Conjeturo então que o processo computacional do algoritmo mínimo do ADN é representado aproximadamente pelo verdadeiro processo de crescimento do organismo correspondente àquela sequência de ADN. Esta conjetura supõe que a complexidade algorítmica do ADN (genótipo) e a do organismo (fenótipo) são aproximadamente iguais. O desenvolvimento biológico é, portanto, um algoritmo — um processo computacional que efetua a tradução do genótipo para o fenótipo.

A perspetiva computacional do mundo físico pode parecer muito estranha. Mas é este tipo de estranheza que nos abre novos conhecimentos. Talvez até possamos descobrir uma definição útil de complexidade com base nessa perspetiva.

A busca de uma definição exata de complexidade está relacionada de perto com o desejo, mantido por alguns cientistas, de quantificar a noção intuitiva do aumento da complexidade dos objetos à medida que estes evoluem. Este aumento acontece apesar de a entropia — uma medida de desordem — ter sempre de aumentar dentro de um sistema isolado (segunda a lei da termodinâmica). De alguma maneira, a natureza é capaz de criar pequenas ilhas de ordem e complexidade dentro do grande oceano

da entropia. A evolução da vida parece violar o espírito da segunda lei, mesmo quando a segue à letra.

Uma propriedade dos sistemas dinâmicos é o facto de parecerem dar origem a sistemas cada vez mais complexos. Por que é que isto acontece? Um ser humano é mais complicado do que um protozoário — não é melhor, não é mais importante, mas é certamente mais complexo. Parece que com a "experimentação", criando organismos mais complexos, a natureza encontrou uma técnica que possibilita o desenvolvimento da evolução em novos ambientes. Se todos os nichos ecológicos simples já estiverem ocupados por organismos simples, um organismo mais complexo — um organismo que não necessite de competir por esses nichos simples — pode evoluir e sobreviver. Esta é provavelmente em parte a razão por que a evolução produziu organismos complexos. A adoção de estratégias complexas pode promover a evolução. Esta ideia, bem como a da evolução cultural e a da emergência dos sistemas económicos e sociais complexos, poderiam ser exploradas quantitativamente se dispuséssemos pelo menos de uma definição matemática de complexidade.

Antes de deixar a complexidade e a aleatoriedade, pretendo mencionar uma outra tentativa de captura do caos. A definição algorítmica de aleatoriedade, apesar de fornecer novos conhecimentos, não pode, como já vimos, dizer-nos se um dado número é aleatório. Se não podemos dizer o que é *em princípio* aleatório, talvez possamos determinar o que é *na prática* aleatório. Se os matemáticos não conseguem dizer-nos o que é aleatório, talvez nos possamos virar para o mundo físico. Na década de 30, Richard von Mises pensou que poderíamos definir aleatoriedade pelo seu aparecimento em processos físicos, como sejam uma bola a saltar numa roda da lotaria ou um lançamento de uma moeda ao ar, onde nunca é possível, em média, vencer ou perder uma aposta, porque são verdadeiramente aleatórios. Esta estratégia fornece uma base prática à noção de aleatoriedade.

Nos últimos anos, um grupo de especialistas de estatística da Universidade de Stanford, do qual fazem parte Persi Diaconis (um antigo ilusionista profissional), Bradley Efron e Eduardo Engle, tem estado a examinar alguns processos físicos, havendo chegado a

uma definição quantitativa de caos. Chegou também à conclusão de que muitos processos físicos, que se poderia pensar serem caóticos, na realidade não o são. Por exemplo, baralhar um maço de cartas menos de seis vezes não torna a sequência de cartas verdadeiramente aleatória. O maço só se torna subitamente aleatório depois de ter sido baralhado umas sete ou oito vezes. Diaconis e o seu colega Joseph Keller examinaram também o lançamento de dados e a roleta, para os quais a mesma história se repete. "Se se prestar atenção", diz Diaconis, "as coisas não são tão aleatórias como se pensa." Mas é por não serem demasiadamente aleatórios que é possível examinar estes processos físicos em pormenor e ver onde falha a aleatoriedade. Aprende-se então alguma coisa.

O lançamento de uma moeda ao ar constitui um bom exemplo. Quando lançamos uma moeda, esta tem uma dada velocidade inicial e uma certa rotação. Podemos imaginar um gráfico bidimensional no qual marcamos a velocidade inicial no eixo horizontal e a rotação no eixo vertical. Com a moeda, de início, sempre na mesma posição — caras, por exemplo —, podemos assinalar as zonas do gráfico bidimensional que resultam em caras e as que resultam em coroas quando se lança a moeda. Na zona próxima da origem, que corresponde a valores pequenos da velocidade e da rotação iniciais (para os quais a moeda não chega a virar-se), sai caras. À medida que nos afastamos da origem, aparecem regiões tanto de caras como de coroas. Longe da origem, para valores altos da rotação e da velocidade iniciais, as regiões de caras e de coroas tornam-se muito estreias — uma ligeira variação das condições iniciais produz um resultado diferente. Assim, para estas regiões de velocidade e rotação iniciais grandes, o lançamento da moeda é muito aleatório. Seriam necessários milhões de lançamentos para ver que o não era.

Diaconis desenvolveu uma teoria que lhe permite quantificar de forma exata a verdadeira aleatoriedade de alguns destes processos. A sua teoria permite-lhe também dizer qual é o nível de caos — a que distância se está da verdadeira aleatoriedade. Graças ao trabalho dele e de outros autores, começa a ser possível espreitar por baixo do véu do caos físico.

O caos tem-nos acompanhado desde há muito. Contudo, só recentemente o temos começado a dominar. Enquanto os especialistas da estatística desenvolviam os seus métodos de estudo do caos, um grande desenvolvimento acabava de ocorrer em física — os cientistas descobriam caos nas equações deterministas. Esta nova descoberta prende-se de perto com as ideias de complexidade e computabilidade discutidas neste capítulo. O caos e a aproximação do caos mostram uma estrutura interessante que só agora começa a ser compreendida.

Joseph Ford, do Georgia Tech, saúda esta nova ciência do caos como o "começo da terceira revolução da física neste século", considerando que as outras duas revoluções foram a teoria da relatividade e a teoria quântica. Sinto-me inspirado pelas exposições de Ford sobre o caos, mas discordo da sua avaliação. As anteriores "revoluções" da física postularam novas leis físicas. Pelo contrário, todo o trabalho teórico sobre o caos, apesar de iluminar profundamente processos físicos já conhecidos e de alargar o nosso conhecimento, não postula quaisquer novas leis físicas. Em vez disso, analisa leis físicas já existentes de uma forma nova e entusiasmante. O caos esteve o tempo todo "sentado" nas equações físicas existentes, à espera de ser compreendido. No próximo capítulo vamos debruçar-nos sobre ele.

CAPÍTULO 4

– A VIDA PODE SER BASTANTE ILINEAR –

O homem primitivo via [...] o seu mundo como algo altamente caótico, tal como nós o vemos agora! Existe, no entanto, uma diferença. Os homens das cavernas viam a natureza como um jogo de dados imparcial, que se desenrola livremente; o homem moderno reconhece que o jogo de dados está apenas ligeiro, mas de qualquer forma propositadamente, viciado.

JOSEPH FORD

Já todos ouvimos o reparo: "Toda a gente fala da meteorologia, mas ninguém faz nada." Bem, isto não é exatamente verdade.

John von Neumann, o matemático, pensou muito no problema da regulação do tempo meteorológico. Ele sabia que o desenvolvimento futuro do sistema meteorológico podia ser radicalmente influenciado por pequenas flutuações na temperatura, na pressão e na humidade, e pensou que se conseguíssemos alterar essas flutuações, eliminando-as enquanto fossem pequenas, poderíamos controlar o tempo que iria fazer. Alguns aviões poderiam pulverizar as nuvens na sexta-feira, alterando as flutuações de modo a que não chovesse no piquenique de domingo. Este era um dos sonhos de von Neumann.

Von Neumann, no entanto, estava muito enganado sobre a natureza destas flutuações, porque não é possível regulá-las. As equações determinísticas que regem a evolução do tempo meteorológico têm escondidas dentro delas soluções que exibem um caos completo. Essas soluções são aquelas que, de facto, descrevem corretamente o tempo. Flutuações infinitesimais podem amplificar-se rapidamente, mais rapidamente do que aquilo que podemos prever ou regular, gerando assim o caos. Uma gaivota batendo as asas no cabo Cod pode gerar uma flutuação que se poderá, em princípio, transformar num tufão do Pacífico. A possibilidade de um tal caos absoluto emergir de

equações determinísticas é uma das descobertas mais marcantes da moderna física matemática.

Esta descoberta do *caos determinístico* foi efetuada em 1963 pelo meteorologista Edward N. Lorenz, do MIT. Convencido de que a bem conhecida imprevisibilidade do tempo meteorológico deveria ter uma explicação com base em equações determinísticas, começou a procurar essas equações. As equações que descrevem a meteorologia são conhecidas; mas são um conjunto infinito de equações, e, portanto, intratáveis. O primeiro passo de Lorenz consistiu em simplificar essas equações por meio de aproximações até lhe restarem somente três equações diferenciais que exprimiam a variação de três quantidades com o tempo. Não precisamos agora de nos preocupar com o significado dessas três quantidades — descrevem aspetos da meteorologia. Não havia nada de extraordinário nas equações que Lorenz descobriu, exceto o facto de serem equações ilineares, o que quer dizer simplesmente que a soma de quaisquer duas das suas soluções *não* é uma solução. Veio-se a saber que esta característica da ilinearidade é essencial para a ocorrência de caos determinístico.

Algumas palavras sobre as noções de "linearidade" e "ilinearidade" parecem-me vir agora a propósito. Estes termos referem-se simplesmente às propriedades das soluções das equações — indicam se se pode ou não adicioná-las, obtendo novas soluções. Se as equações descrevem um fenómeno natural ou social, podemos dizer que esses fenómenos são lineares ou ilineares conforme for o caso. Por exemplo, a equação de onda que descreve o movimento de uma onda na água, é uma equação linear. É uma equação que permite muitas soluções diferentes, cada uma com uma certa amplitude e um certo comprimento de onda. Mas, uma vez que é uma equação linear, podemos adicionar essas soluções, obtendo uma nova solução da equação de onda. Estas novas soluções refletem simplesmente o facto físico de as ondas reais, tal como as ondas da água, se poderem sobrepor umas às outras e de estas sobreposições serem também soluções da equação de onda linear.

A maioria das equações que descrevem fenómenos do mundo natural, do comportamento humano, do funcionamento

neurológico, da dinâmica da população e de muitas outras áreas são ilineares. A despeito do facto de estes serem uns fenómenos extremamente interessantes que desejaríamos compreender, o facto de as equações ilineares continuarem a ser, em geral, matematicamente intratáveis torna a sua resolução praticamente impossível. Antes de se usar o computador, só algumas características gerais destas equações ilineares e das suas soluções podiam ser analisadas; em alguns casos pontuais e raros, as soluções exatas eram conhecidas. Mas curiosamente, o tipo de análise numérica das equações efetuado num computador é, normalmente, indiferente ao facto de elas serem lineares ou ilineares — a máquina limita-se a dar as soluções quando fazemos girar a manivela. O advento do computador fez com que os cientistas não tivessem mais de ficar intimidados com as equações ilineares. O aparecimento de uma equação ilinear num trabalho deixou de significar: "Insolúvel, pare aqui."

A ciência ilinear dedica-se ao estudo dos fenómenos cuja linguagem matemática faz uso de equações ilineares. A vida é ilinear, tal como praticamente tudo o que tem algum interesse.

O domínio pelo homem do regime ilinear abrirá as portas de um novo e vasto campo. Neste capítulo iremos examinar alguns exemplos que fazem parte deste domínio. O primeiro desses exemplos é a descoberta de Lorenz do caos determinístico.

Lorenz introduziu as suas equações meteorológicas ilineares num computador. O computador estava a imprimir listas dos valores das três quantidades em função do tempo. Lorenz podia, em qualquer altura, fazer parar o computador, examinar as listas, pegar num conjunto intermédio de três valores e voltar a fazer o computador arrancar com esse conjunto intermédio de três valores em vez dos dados iniciais. Em princípio seria de esperar que o computador voltasse a imprimir as mesmas listas subsequentes que tinha imprimido antes. Isto porque, sendo os dados iniciais os mesmos, o desenvolvimento futuro no tempo deveria ser também o mesmo, uma vez que as equações eram determinísticas. Mas, em vez disso, os valores das três quantidades nas listas diferiam imediatamente dos obtidos na execução original do programa, aumentando essa diferença à

medida que ia decorrendo a execução do programa. Lorenz acabara de descobrir o caos determinístico.

Acontecera que os valores das três quantidades não tinham sido impressos com a precisão total conseguida pela máquina. Assim, quando Lorenz iniciou uma segunda execução, com os valores intermédios a substituir os dados iniciais, esses valores eram um tudo-nada diferentes daqueles que o computador usara antes. Essa ligeira diferença depressa se amplificou à medida que o computador prosseguiu a execução (é assim que uma gaivota batendo as asas pode vir a provocar um tufão). Este comportamento — sensibilidade extrema aos dados iniciais — indica a existência do caos determinístico.

As equações diferenciais que Lorenz estudou eram, tal como as equações de Newton, equações da física clássica, totalmente determinísticas. Dado um conjunto de valores iniciais de uma certa quantidade física, as equações especificam totalmente os valores futuros dessa quantidade. Normalmente, se se introduzirem pequenas alterações nos valores iniciais, os resultados finais são apenas ligeiramente alterados. Por exemplo, uma pequena alteração da posição do cano de uma arma no momento do disparo resulta numa alteração proporcionalmente pequena da bala que atinge o alvo. Este é o comportamento típico da maioria das equações clássicas. As equações de Lorenz da meteorologia e outras equações ilineares que exibem caos determinístico distinguem-se das outras pelo facto de uma pequena variação nos valores iniciais produzir uma variação exponencialmente grande nos valores subsequentes. A não ser que se conheçam com precisão *infinita* os valores iniciais das quantidades (o que na prática é impossível), depressa se perderá a capacidade de prever os valores futuros — tal como acontece com a previsão meteorológica.

Estas ideias sobre o determinismo, previsibilidade e caos estão profundamente relacionadas com as ideias sobre a complexidade algorítmica e computacional introduzidas no capítulo interior. Para que possamos ver essa ligação, precisamos, em primeiro lugar, de compreender alguns aspetos do determinismo em física clássica.

A noção de determinismo, que se encontra no centro conceptual da física clássica newtoniana, afirma que, se soubermos o estado inicial de uma partícula — a sua posição e a sua velocidade —, podemos prever, usando as equações do movimento, a sua órbita subsequente. Este aspeto do determinismo é bem ilustrado pela imagem do matemático francês Pierre Simon de Laplace, que imaginou um demónio conhecedor das posições e velocidades de todas as partículas do universo. Usando as leis de Newton, o demónio podia então conhecer todo o futuro do universo, um universo mecânico que funcionava como um grande relógio.

Na previsão do comportamento futuro é dada uma grande ênfase ao conhecimento das leis da física, como sejam as equações do movimento. No fundo, foi a descoberta das leis do movimento que tornou Newton famoso e colocou a física moderna no longo caminho que a levou aos dias de hoje. Dispensamos uma atenção secundária às escondidas iniciais, que também são necessárias para juntar às equações do movimento e assim poder efetuar previsões. Não nos parecem muito importantes; de qualquer maneira, representam algo que não podemos controlar com grande exatidão. Para muitos problemas da física clássica essa exatidão não é especialmente relevante. Por exemplo, no movimento de um pêndulo que se move para trás e para diante ou no movimento de um planeta em torno do Sol a precisão com que especificamos as condições iniciais determina, numa razão de proporcionalidade direta, a precisão com que conhecemos o movimento subsequente.

Se adotarmos o ponto de vista computacional dos processos físicos, podemos então considerar as condições iniciais da nossa partícula em movimento, agora representadas por uma cadeia de números, como os dados de entrada de uma computação da órbita. O resultado final é a especificação matemática da órbita que é solução das equações do movimento. Para alguns sistemas, como o pêndulo ou o planeta que gira em torno do Sol, uma pequena quantidade de informação à entrada resulta numa grande quantidade de informação à saída — a totalidade da órbita futura do sistema. Seria como se estivéssemos a introduzir as condições iniciais como dados de entrada no nosso "computador" e fôssemos depois recompensados com todas as posições futuras como

resultados de saída. Tais sistemas "analiticamente solúveis" — aqueles para os quais é possível escrever explicitamente a solução da equação — são determinísticos, previsíveis e não caóticos. São a imagem do determinismo newtoniano. Se conhecermos o presente especificando as condições iniciais, conheceremos também o futuro e o passado, tal como o demónio de Laplace.

Um sistema dinâmico analiticamente solúvel pode ser examinado do ponto de vista da complexidade algorítmica. As condições iniciais e a solução explícita das equações podem ser consideradas como um algoritmo para a computação da órbita. A órbita em si mesma pode ser vista como um conjunto de números a ser computado. Uma vez que toda a órbita pode ser calculada a partir de um algoritmo bastante simples, a órbita é não caótica e os números que a representam são não aleatórios consideradas as condições iniciais.

A situação é radicalmente diferente no caso das equações ilineares, como, por exemplo, as equações de Lorenz, que contêm soluções caóticas. Um pequeno erro na especificação das condições iniciais faz com que se produzam órbitas inteiramente diferentes. Estas órbitas caóticas, vistas como um processo computacional, são descritas por Joseph Ford do seguinte modo: "Descobriu-se que a nossa computação orbital requer tanta informação à entrada como à saída. Isto significa que as nossas computações deixaram agora de computar ou de prever alguma coisa, pois os dados orbitais de saída são tão caóticos, tão incertos e aleatórios, que a nossa informação de entrada deve, necessariamente, ser equivalente a uma cópia da saída. [...] Para sumarizar, uma órbita caótica é a descrição mais curta de si mesma e o computador mais rápido de si própria; é, ao mesmo tempo, determinista e aleatória." Aprendemos com esta descrição que as órbitas não caóticas são, como dissemos, "simuláveis" (isto é, o resultado de uma computação), enquanto que as orbitas caóticas são "insimuláveis" (a única coisa que pode simular o tempo meteorológico é o próprio tempo meteorológico).

A subtileza da natureza é bem justificada. Vemos que, escondido dentro das equações determinísticas da física clássica, reside um caos de tal forma completo que nem o demónio de Laplace conseguiria prever o futuro. Tal só seria possível se o

demónio conhecesse as condições iniciais com uma precisão *infinita* e se pudesse lembrar de um número *infinito* de números aleatórios (isto presumivelmente exigiria um demónio *infinito*). Neste sentido o próprio demónio teria de ser idêntico a um universo, o que não é nada do que Laplace tinha em mente.

Quando Lorenz descobriu o caos determinístico, descobriu o que os físicos chamam um "atractor estranho". Que vem a ser um atractor? Um atractor é algo para onde a solução de uma equação é levada, e esse conceito ajuda-nos a classificar sistemas dinâmicos, quer eles sejam o sistema solar, uma torneira a pingar, uma rede neural ou o tempo meteorológico. A fim de explicar de maneira mais exata o que é um atractor, vamos primeiro descrever a noção abstrata de "espaço de estado". Os atractores, como se irá concluir, habitam o espaço de estado.

Diz-se que qualquer sistema dinâmico está num dado "estado" físico, estado esse que fica totalmente especificado uma vez indicados os valores de todas as variáveis físicas independentes do sistema. Por exemplo, um simples pêndulo, que balança para a frente e para trás num plano, é descrito por duas variáveis — a posição da cabeça do pêndulo e a sua velocidade. Sistemas dinâmicos mais complexos podem exigir um número maior, talvez mesmo uma infinidade de variáveis para especificar completamente o respetivo estado físico. Uma vez conhecido o estado físico de um sistema, já se sabe tudo o que se pode saber sobre esse sistema.

Os físico-matemáticos consideram, por vezes, extremamente útil refletir sobre o mundo usando conceitos geométricos. Esse tipo de raciocínio pode também ser aplicado ao estudo dos estados físicos. Podemos imaginar um espaço abstrato a que damos o nome de espaço de estado (também chamado espaço de fase), que nada tem a ver com o verdadeiro espaço tridimensional, no qual cada dimensão corresponde a uma das variáveis que descrevem o sistema físico. Por exemplo, para o pêndulo simples o espaço de estado é bidimensional; uma dimensão representa a posição da cabeça do pêndulo, e a outra, a sua velocidade. Para um sistema dinâmico com três variáveis, podemos ainda visualizar o estado do sistema como um ponto num espaço tridimensional. Mas para sistemas dinâmicos mais

complicados, com muitas variáveis, precisamos de muitas, talvez mesmo de um número infinito de dimensões no espaço de estado, pelo que deixamos de poder visualizar o espaço. Ainda assim, a vantagem do raciocínio com base num tal espaço abstrato é que o estado físico de um sistema, independentemente do número de variáveis que envolva, é representado por um único ponto no espaço de estado multidimensional. Lendo as coordenadas de um ponto no espaço de estado, especificam-se os valores de todas as variáveis físicas, o que é equivalente a especificar o estado do sistema. À medida que o sistema muda com o tempo, esse ponto pode mover-se no espaço de estado multidimensional, mostrando exatamente como é que o sistema evolui com o tempo. Se as variáveis físicas nunca se tornam infinitas (o que acontece com todos os sistemas reais), o ponto move-se numa região limitada do espaço de estado.

A razão por que me dei ao trabalho de descrever o espaço de estado abstrato é que os atratores "vivem" no espaço de estado. Um atrator faz exatamente aquilo que o seu nome sugere — atrai o ponto que se move no espaço de estado. Em torno de um atrator existe uma região a que se dá o nome de "bacia de atração". O ponto pode partir de qualquer sítio do espaço de estado, conforme as condições iniciais do sistema físico. Mas, se se encontrar numa bacia de atração, é arrastado inexoravelmente para o atrator correspondente. Um sistema dinâmico pode ter um ou mais atratores. Aquele em que o sistema acaba por se estabelecer depende da bacia de atração em que se encontra de início.

São conhecidos vários tipos de atratores. O tipo mais simples de atrator é o *ponto fixo* — depois de se mover ao longo da bacia de atração, o ponto acaba por vir ter ao ponto fixo. A que é que isto corresponde no mundo real? Se voltarmos ao nosso exemplo do pêndulo simples e supusermos que há atrito, descobrimos que o pêndulo acaba por parar — a posição da cabeça do pêndulo permanece fixa e a sua velocidade mantém-se nula. No espaço de estado isto corresponde a um atrator do tipo "ponto fixo". Se olhássemos para o movimento do ponto no espaço de estado que representa o estado físico do pêndulo, veríamos, à medida que o pêndulo abrandava, uma órbita cada vez mais pequena até acabar por se imobilizar sobre o ponto fixo.

Um segundo tipo de atrator é o *ciclo limite*. Tal como o próprio nome indica, o ponto do espaço de estado, em vez de acabar por se imobilizar, continua a circular ao longo de um certo ciclo fechado. Isto quer dizer que algumas das variáveis físicas ficam sujeitas a um movimento periódico. Mais uma vez, vamos considerar o nosso pêndulo: suponhamos que existe atrito e que vamos fornecendo ao pêndulo pancadas periódicas (como acontece num metrónomo); descobriríamos que ele não acaba por parar, mas permanece numa oscilação, correspondente ao ciclo limite.

A descoberta de ciclos limites em sistemas dinâmicos ilineares remonta ao modelo matemático do funcionamento do coração humano proposto por Balthasar van der Pol na década de 20. As equações que descrevem o coração humano são ilineares e o batimento periódico normal do coração corresponde a um ciclo limite destas equações ilineares. Sob a ação de um choque ou de stress este ciclo pode ser perturbado, sendo o sistema atirado para um outro atrator — um ponto fixo; o coração pára e a morte chega.

Também surgem ciclos limites em reações químicas complexas (de novo, descritas por equações ilineares), nas quais as concentrações de dois ou mais reagentes oscilam para um lado e para o outro. As reações químicas metabólicas que ocorrem nos organismos vivos também podem apresentar um comportamento oscilatório. Suspeita-se que seja esta a origem dos relógios biológicos. Cada um de nós tem pelo menos um desses relógios internos, como o poderá testemunhar qualquer viajante que já tenha sofrido com a diferença de fusos horários. Estes relógios internos podem ser o ciclo limite de reações químicas ilineares que ocorrem no corpo e no cérebro.

Enquanto o ciclo limite é um caso simples no espaço de estado, o atrator mais complicado que se segue, o *atrator quase periódico*, pode ser visto como uma linha interminável assente sobre a superfície de um toro (um objeto em forma de anel) no espaço de estado. O ponto circula em volta do toro, seguindo uma espécie de trajetória helicoidal. O sistema exibe um movimento quase periódico, retornando quase, mas não exatamente, ao estado inicial. Um tal atrator descreve o comportamento conjunto

de dois pêndulos acoplados com períodos incomensuráveis. Este sistema nunca volta exatamente ao mesmo estado; daí a designação de "quase periódico".

Por fim, terminamos a nossa classificação de atratores com o *atrator estranho*. Neste último caso, o ponto do espaço de estado move-se continuamente dentro de uma região limitada, sem nunca voltar ao mesmo ponto. (O percurso *não* faz saltos de uma forma caótica; é contínuo.) A característica essencial destas trajetórias estranhas (e que as distingue do caso quase periódico em que as trajetórias também não recorrem) é que, se examinarmos duas trajetórias vizinhas num espaço de estado e se as seguirmos, verificamos que divergem rapidamente, afastando-se uma da outra. Este comportamento reflete a sensibilidade da solução caótica à escolha das condições iniciais. Uma ligeira diferença nas condições iniciais, correspondendo a trajetórias vizinhas no espaço de estado, é rapidamente amplificada, afastando-se as trajetórias. Os outros atractores não têm esta propriedade. Assim, se conhecermos o estado inicial de um sistema (de forma aproximada, pois a forma exata é, de facto, impossível de obter), este conhecimento não tem nenhum valor preditivo quando se tem um atractor estranho, uma vez que a órbita futura do sistema depende de uma forma muito sensível da escolha do estado inicial.

Os atratores estranhos, uma trajetória infindável no espaço de estado abstrato, são objetos geométricos com uma certa beleza. Podem ser construídos com a ajuda de computadores e visualizados num monitor vídeo. A trajetória de um atrator estranho no espaço de estado preenche, na sua infindável deriva, um subespaço do espaço total. Este subespaço pode ter uma dimensão fratural bizarra não inteira. É impossível construir matematicamente o percurso geométrico de tais atratores estranhos; não existem equações que os descrevam exatamente, como as que se podem muitas vezes encontrar para outros tipos de atratores. A única maneira realista de construir atratores e de ver qual é o seu aspeto no espaço de estado consiste em gerá-los em computadores — precisamente o processo da sua descoberta. Os atratores estranhos são uma criação do computador.

Um atrator estranho é descrito por James P. Crutchfield, J. Doyne Farmer, Normand H. Packard e Robert Shaw, num artigo da revista *Scientific American*, do seguinte modo:

> O caos mistura as órbitas [trajetórias] do espaço de estado precisamente da mesma maneira que um padeiro mistura a massa do pão quando a bate. Pode-se imaginar o que acontece a trajetórias vizinhas num atrator caótico colocando uma gota do corante alimentar azul na massa. O batimento da massa pode ser considerado como uma combinação de duas ações distintas: o enrolamento da massa, durante o qual o corante é espalhado, e a dobragem da massa. De início, a mancha de corante limita-se a ficar mais comprida, mas depois é dobrada. Ao fim de um certo tempo, a mancha já foi esticada e dobrada muitas vezes. Observando em pormenor, nota-se que a massa é composta por muitas camadas alternadas de azul e branco. Ao fim de uns meros 20 passos a mancha inicial foi esticada até mais de um milhão de vezes o seu tamanho original, tendo a sua espessura encolhido até ao nível molecular. A coloração azul fica totalmente misturada com a massa. O caos funciona da mesma forma, exceto que, em vez de misturar a massa, mistura o espaço de estado.

Apesar de os atratores estranhos aparecerem hoje em dia em inúmeras equações, a ideia desses atratores demorou um certo tempo a surgir. Em 1944, Lev Landau, físico soviético galardoado com o Prémio Nobel, propôs que a transição para a turbulência nos fluídos (gases ou líquidos) era caracterizada por uma sequência infinita de instabilidades, cada uma das quais adicionava uma nova frequência ao movimento até este se tornar "complicado e confuso". Podemos observar esta transição para a turbulência quando o fluído laminar do fumo que sai de um cigarro começa a redemoinhar e rodopiar. Pode-se ainda observar o mesmo fenómeno quando um caudal transita de um fio suave para um jato de água a correr. No entanto, o importante trabalho de Landau não identificou este estado turbulento com um caos verdeiro e absoluto (como hoje se pensa ser), mas antes com uma forma complicada de comportamento quase periódico que imitava o caos. Além disso, do seu ponto de vista, não existia nenhuma transição bem definida para a turbulência.

Em 1963, Lorenz escreveu o seu histórico artigo "Fluído determinístico não periódico", onde sugere que a turbulência é verdadeiramente não periódica (caótica) e não quase periódica.

Infelizmente, o seu importante trabalho, a descoberta do caos determinístico, escapou à atenção dos cientistas durante mais de uma década. A distinção entre movimento quase periódico e caos não periódico é subtil e importante: dois percursos vizinhos num movimento quase periódico permanecem sempre juntos, ao passo que em movimento caótico divergem rapidamente.

Em 1971, David Ruelle e Floris Takens escreveram um artigo intitulado "*Sobre a natureza da turbulência*", no qual mostraram que a maioria dos movimentos de fluídos produziam soluções críticas ao fim de algumas instabilidades. Também introduziram o termo "atrator estranho". Depois, em 1975, Tien Tien Li e James Yorke usaram pela primeira vez a palavra "caos" para descrever as novas soluções erráticas. Estava agora a começar a ser entendida a verdadeira natureza do método de estudo da turbulência e das soluções caóticas. De acordo com estas investigações, à medida que um sistema dinâmico se aproximava da turbulência, o seu período começava por se duplicar, duplicando-se uma e outra vez, até que a certa altura acabava por estabelecer o verdadeiro caos.

Durante o Verão de 1975 um amigo meu, Mitchell Feigenbaum, do Laboratório de Los Álamos, estava de visita ao Centro de Física de Aspen, um centro de investigação estival. Efetuava na altura o cálculo de duplicação do período de uma dada equação à medida que se dava a aproximação do caos. Estava a fazer todos os cálculos à mão. Era estranho que se dispusesse a fazer todos os cálculos à mão quando em Los Álamos, no seu laboratório de base, existiam computadores gigantescos onde poderia efetuar os seus cálculos em milissegundos em vez de horas. Mitch dizia que preferia a maneira mais lenta porque gostava de brincar com números.

Passado cerca de um mês, Mitch estava de volta a Los Álamos, efetuando um cálculo semelhante, mas com uma equação diferente. Ficou surpreendido por, mesmo com esta outra equação, a *aproximação* ao caos ser caracterizada pelo mesmo número que tinha surgido nos cálculos realizados em Aspen. Percebeu então que tinha efetuado uma descoberta. Compreendeu de imediato que a aproximação do caos é caracterizada por dois números universais. Esses números, tais como π, a razão entre o

perímetro da circunferência e o diâmetro de um círculo, são puramente geométricos e nada têm a ver com pormenores dinâmicos (por isso, a equação dinâmica utilizada era irrelevante). Se Mitch tivesse usado um dos grandes computadores de Los Álamos que obtinham rapidamente uma solução, teria falhado esta importante descoberta. A sua vontade de brincar diretamente com os números revelou-se bastante oportuna.

Muitas das ideias sobre caos não foram bem acolhidas no quadro da teoria dos sistemas dinâmicos aceite na altura, que se baseava na matemática e na física. Algumas das primeiras pessoas que trabalharam em caos sentiram dificuldades em ver as suas ideias aceites pelos colegas. Isto foi especialmente verdade para o "Coletivo de Sistemas Dinâmicos" da Universidade da Califórnia, em Santa Cruz, dirigido por Crutchfield, Farmer, Packard e Shaw. Lembro-me de visitar o laboratório em 1981 e de pensar que a maior parte do equipamento devia ter sido adquirida na loja de ferragens da esquina. Sentiram algumas dificuldades em convencer os colegas da importância do seu trabalho.

É certo que o caos existe nas equações da física clássica. Mas será que existe no mundo real? É de lembrar que Lorenz *aproximou* o conjunto total das equações da meteorologia por apenas três equações, que então revelaram caos. Mas quanto ao conjunto total de equações? Será que também mostra caos? Todas as equações, quer sejam de meteorologia, do movimento de um fluído ou do coração humano, envolvem aproximações, pelo que não podemos garantir que o caos não foi introduzido devido à aproximação. Além disso, a busca do caos no mundo real é dificultada pelo facto de os cientistas experimentais não terem a certeza se o caos é inerente ao sistema dinâmico que estão a examinar ou se é devido a algum ruído aleatório externo que produz o efeito caótico. Como, além disso, já referi antes, é difícil distinguir experimentalmente o verdadeiro caos do movimento complicado quase periódico.

Embora estas dúvidas tenham sido expressas outrora, a maioria dos cientistas de hoje acredita que o caos determinístico existe no mundo real. As primeiras experiências, realizadas por Jerry Gollub, do Haverford College, e Harry Swinney, da Universidade do Texas, em Austin, incidiram no movimento

"Couette" circular — o movimento de um fluído colocado entre dois cilindros concêntricos em que o interior está a rodar. À medida que a rotação aumenta, o campo de velocidades do fluído contido no aparelho torna-se periódico, duplicando-se o período até o caos acabar por se estabelecer. As experiências tinham por objetivo estudar a delicada transição entre o comportamento periódico e o caos. Embora os resultados sugerissem fortemente a existência de verdadeiro caos, era difícil distinguir o aspeto do caos do aspeto do movimento quase periódico.

A primeira evidência experimental inequívoca de caos não proveio do estudo dos movimentos de fluídos, mas do estudo das reações químicas oscilatórias, numa experiência realizada em 1980 por J. C. Roux, A. Rossi, S. Rachelart e Christian Vidal. Seguindo e alterando cuidadosamente as concentrações de reagentes químicas, as oscilações químicas tornaram-se verdadeiramente não periódicas — estabeleceu-se o caos. Trabalhos experimentais posteriores realizados por J. L. Hudson, J. Mankin, Roux e Swinney sobre essas reações mostraram conclusivamente que as oscilações irregulares eram devidas a um atrator estranho.

Existirão outros tipos de atratores para além dos que já estudámos? Pensamos que sim. Os atratores são propriedades das equações ilineares, e essas equações, cremos, descrevem o mundo real com toda a sua complexidade. Podemos imaginar equações desse tipo para descrever o comportamento do mercado acionista, da economia internacional, de órgãos do corpo humano, como o coração ou o cérebro, e do comportamento humano. Esses sistemas, sendo descritos por equações ilineares, estão também sujeitos aos diversos tipos de atratores — o ponto fixo, o ciclo limite, os ciclos quase periódicos e o atrator estranho, para além de outros atratores que podem ser misturas destes tipos ou de outros até agora ainda não descobertos.

Algumas pessoas foram mesmo ao ponto de especular que os atratores existentes nas equações ilineares que descrevem as redes neurais podem representar os estados mentais correspondentes ao pensamento humano. As memórias podem corresponder a ciclos limites. Outros cientistas aplicaram, com sucesso, estas ideias a muitos outros campos, como sejam a

teoria evolucionária, a evolução molecular, a teoria populacional, a teoria de jogos e o comportamento animal, incluindo a nutrição, a luta e o comportamento sexual. As formigas (e em particular o seu comportamento nutricional) fornecem um exemplo elucidativo da aplicação dos modelos matemáticos ilineares aos insetos sociais. Já foi demonstrado como é que a geração aleatória de estratégias nutricionais ajuda a colónia a sobreviver por meio da garantia da diversidade e da adaptação às condições de existência de alimentos. Um grupo de cientistas do Centro de Estudos Ilineares de Los Álamos e de outras instituições, o "bando do caos", como já foi designado, tem vindo a organizar encontros e conferências que testemunham as diversas aplicações da dinâmica ilinear. Muitos desses encontros foram realizados sob os auspícios do Instituto de Santa Fé, um novo centro dedicado ao estudo da complexidade.

Ninguém, hoje em dia, duvida da existência de caos determinístico nas equações da física clássica. Esta descoberta acabou com o ideal da previsibilidade da física clássica — um ideal mantido pelos newtonianos e, até neste século, por Einstein. Mas existem vários elementos irónicos neste novo e atraente desenvolvimento. O primeiro é que o caos tem uma estrutura — a geometria dos atratores estranhos. O caos não é uma simples embrulhada sem sentido. De facto, é possível detetar as irregularidades estatísticas do caos desde que esse caos seja usado como uma sonda.

A segunda ironia é que enquanto a física clássica, normalmente a imagem do determinismo, contém agora caos, as equações da teoria quântica (que têm uma interpretação inerentemente estatística) não revelaram até agora qualquer caos. A equação central da teoria quântica, a equação de Schrödinger, refere-se a uma amplitude de probabilidade. No entanto, a equação de Schrödinger, em si mesma, é totalmente determinística; rege a evolução temporal de uma probabilidade. O facto de as equações da teoria quântica, como a equação de Schrödinger, não mostrarem caos é deveras surpreendente para muitos físico-matemáticos, uma vez que as equações da teoria quântica, com algumas aproximações convenientes, se deveriam reduzir às equações da física clássica, as quais, de facto, exibem caos. Onde está, então, o caos nas equações da teoria quântica?

Uma explicação, até agora inexistente, deste importante mistério poderá vir a permitir o aprofundamento do que sabemos sobre a relação entre os mundos quântico e clássico.

O caos, outrora visto como algo irregulável e terrível, está-se a tornar cada vez mais amigável. Do caos nasce a ordem e da simplicidade emerge a complexidade.

Enquanto alguns investigadores descobriam a estrutura do caos nas equações ilineares, outros, há cerca de duas décadas, descobriam novas estruturas igualmente notáveis, soluções ordenadas e inesperadas a que se deu o nome de solitões. Tal como a descoberta do caos, a descoberta dos solitões reflete propriedades espantosas das equações ilineares, propriedades que correspondem a características do mundo real descrito por essas equações. Os solitões podem ser imaginados como ondas solitárias ilineares — perturbações que conseguem manter a sua forma à medida que se movem no espaço. A ilinearidade das autointerações do solitão mantém a perturbação coerente, evitando a sua dissipação.

Apesar de as ondas ilineares já serem conhecidas no século XIX, pensava-se que se tratava de ondas bastante especiais e peculiares. Por essa razão, esta área de investigação tornou-se uma espécie de tanque de águas estagnadas na matemática. O primeiro indício recente da existência de solitões em sistemas ilineares surgiu pouco depois da construção em Los Álamos do computador Maniac I, na década de 50. Enrico Fermi, J. R. Pasta e Stan Ulam decidiram utilizar o novo computador para modelar o comportamento de uma rede de sessenta e quatro partículas ligadas entre si por molas ilineares. Pensavam que este sistema, uma vez posto a vibrar num certo sítio, exibiria de imediato vibrações aleatórias de todas as partículas. Em vez disso, descobriram que o sistema retornava de uma maneira quase periódica à sua configuração original. Este comportamento inesperado constitui uma das primeiras pistas para a descoberta dos solitões, que são semelhantes a pulsações que se movem como ondas na matriz de partículas ligadas por molas.

Nos anos sessenta, dois físico-matemáticos, Norman Zabusky e Martin Kruskal, examinaram pela primeira vez, com a ajuda de

um computador, o que aconteceria se se fizessem colidir dois solitões. A maioria das pessoas teria pensado que eles se iriam fragmentar ou dissipar, desaparecendo. Zabusky e Kruskal descobriram, porém, que os dois solitões passavam um pelo outro, como se nada se tivesse passado. Os solitões eram bastante robustos.

Sabemos hoje que os solitões aparecem numa grande variedade de equações ilineares que descrevem processos físicos. Encontram-se em equações que descrevem o ADN e as proteínas alfa-hélix, as ondas oceânicas gigantes e as complexas interações de um laser com um plasma. Alguns investigadores descobriram comportamentos do tipo solitónico em equações que descrevem o comportamento de redes neurais. Para explicar a sua duração secular, os cientistas acreditam que a grande Mancha Vermelha de Júpiter é um exemplo de um solitão. Os monopólos magnéticos, partículas quânticas que têm uma carga magnética unitária, que são preditos por uma variedade de teorias quânticas de campos, são também solitões (estes monopólos são discutidos no meu livro *Simetria Perfeita*). Em muitos sistemas dinâmicos foram observados solitões como perturbações estáveis de energia de um campo. A sua existência ilustra a riqueza da dinâmica ilinear.

A dinâmica ilinear está na sua infância. A descoberta do caos determinístico e dos solitões não passa provavelmente da ponta visível do icebergue. Descobertas novas e maravilhosas estão ainda a ser feitas. O sonho de Descartes de matematização do mundo está hoje a ser realizado, embora a matemática necessária seja bastante ilinear. Os cientistas só agora começaram a encarar o enorme desafio da ilinearidade que os acompanhará até ao próximo século e possivelmente depois. A dinâmica ilinear constitui a vanguarda das ciências da complexidade em emergência.

Nada disto teria sido possível sem o computador. Embora a análise matemática tradicional seja, e sempre o será, da maior importância para que se obtenha uma visão profunda das equações ilineares, o computador garantiu a motivação para avançar devido à sua capacidade de resolver numericamente equações onde a análise convencional falha. Este facto foi

antevisto por John von Neumann no seu discurso de 1946 na Universidade de McGill:

> Os nossos métodos analíticos atuais não parecem apropriados para resolver os problemas importantes que surgem relacionados com as equações ilineares às derivadas parciais, nomeadamente de quase todos os tipos de problemas ilineares das matemáticas puras... Dispositivos computacionais verdadeiramente rápidos e eficientes podem, quer no campo das equações ilineares às derivadas parciais, quer em muitos outros campos onde o acesso é por agora difícil, se não mesmo impossível, fornecer-nos os indícios heurísticos que são indispensáveis a um progresso genuíno em todos os domínios da matemática.

Von Neumann, o principal arquiteto do computador digital programável, aplaudiu a chegada do computador às matemáticas. Sentia-se igualmente à vontade tanto nas matemáticas puras como nas aplicadas. No entanto, muitos matemáticos da altura, embora reconhecessem a importância prática das matemáticas aplicadas, achavam que a matemática pura se devia manter afastada do computador. Alguns achavam mesmo que o computador exercia uma influência nefasta sobre os jovens matemáticos. No entanto, parece estranho que os matemáticos puros, que aceitavam a ideia das demonstrações geradas por máquinas de Turing — um computador imaginário —, resistissem à ideia de uma demonstração realizada por um computador verdadeiro.

A melhor maneira de ver os computadores em matemática é pensar neles como quadros de giz sofisticados onde se experimentam ideias e efetuam cálculos. Talvez tenham existido outrora matemáticos que resistiram à ideia da introdução dos quadros de giz por pensarem que a matemática deveria ser toda feita na cabeça.

Embora o movimento no sentido da abstração nas matemáticas ainda tenha muita força, o uso do computador reflete um retorno à visão construtivista das matemáticas do século XIX, uma estratégia com os pés assentes na terra e afastada, portanto, da teoria abstrata de conjuntos, das provas de existência e de outros assuntos semelhantes. O computador é o instrumento primordial da nova disciplina da "matemática experimental".

Matemática experimental parece quase ser uma contradição. Não deveria a matemática, inclusive a matemática aplicada, permanecer livre de limitações empíricas? Na verdade, devia. Existe, no entanto, um lugar, com uma importância crescente, para as experiências computacionais em matemática. Algumas equações e alguns problemas de matemática são tão difíceis e complicados que, para se atingir alguma compreensão, a análise numérica, efetuada num computador, se revela essencial. Uma vez adquirida essa perceção, os matemáticos podem prosseguir formulando e provando teoremas gerais, que é o seu verdadeiro objetivo.

A matemática experimental vai ser essencial para resolver os problemas da ciência ilinear. Os matemáticos puros e aplicados vão trabalhar em conjunto com cientistas da computação e com especialistas dos vários ramos das ciências naturais e comportamentais. Este tipo de trabalho interdisciplinar, de equipa, é necessário se se pretende empurrar para mais longe a fronteira da complexidade.

Estão a ser criadas novas estruturas para enfrentar este desafio. Os investigadores precisam de ter acesso a supercomputadores — computadores centrais que podem processar quantidades maciças de informação, que são altamente interativos e que têm boas capacidades gráficas. Esses centros também poderão pôr à disposição do investigador especialistas capazes de construir computadores especiais dedicados — aparelhos construídos com *hardware* já existente mas destinados a resolver, com uma velocidade espantosa, um problema específico.

Nos anos trinta Joseph Stalin perguntou a um dos seus conselheiros qual a área da ciência em que a União Soviética mais de distinguia. A resposta dada (e que estava correta) foi que essa área era a matemática e a dinâmica ilineares. Um cientista soviético que, na altura, era uma autoridade internacional nessa area estava a dar aulas em Paris. Stalin chamou-o para dirigir um grande instituto destinado ao estudo dos problemas ilineares. A União Soviética tem sido, desde então, forte nesta importante área, apesar de os sábios soviéticos não terem, até há pouco tempo, tirado partido total do advento do computador, uma vez

que o uso de equipamento de transmissão e processamento de informação está sujeito a uma regulação apertada por parte do Estado.

Em 1985, sob a liderança de Steven Orszag, da Universidade de Princeton, e de Kenneth Wilson, da Universidade de Cornell, a Fundação Nacional de Ciência aceitou fundar cinco grandes centros de supercomputação nos Estados Unidos. Antes disso não existiam supercomputadores à disposição de muitos investigadores universitários. De facto, muitos investigadores universitários dos EUA tinham de se deslocar à Europa a fim de usarem os supercomputadores que tinham sido oferecidos, como um favor político, aos laboratórios europeus pelo governo dos EUA. Os cientistas dos grandes laboratórios nacionais dos EUA, esses sim, tinham acesso a supercomputadores. "Todos os outros", argumentava Wilson, "tinham de mendigar tempo de computação onde o podiam encontrar." Esta situação vai agora mudar. Os novos centros de supercomputação distribuídos pelos Estados Unidos podem ser usados por um consórcio de universidades por meio de uma ligação direta entre a universidade e o centro. Wilson, que é agora o director do Centro de Teoria e Simulação em Ciência e Engenharia da Universidade de Cornell, comenta o poder desses computadores: "[...] um astrónomo com um telescópio pode observar o universo ao longo de, talvez, cinquenta anos — a duração da sua carreira científica. Mas um astrofísico, com um supercomputador, pode "ver" ao longo de um bilião de anos. A simulação computacional é, portanto, a experimentação de um teórico." Estas estruturas supercomputacionais tornar-se-ão grandes centros de "matemática experimental" que irão trabalhar numa grande variedade de problemas, muitos dos quais no domínio da ciência ilinear.

No próximo capítulo vamo-nos debruçar sobre alguns dos problemas que irão ser tratados nestas e noutras estruturas semelhantes.

CAPÍTULO 5

– SIMULANDO A REALIDADE –

Não percas a fé. A nossa matemática é uma poderosa fortaleza.

STAN ULAM

Por que simulamos nós a realidade e a apresentamos como mito, metáfora ou teoria científica? Por que não a aceitamos tal como ela é, deixando a experiência ser a melhor simulação de si própria? Por que revive a nossa mente a sua própria experiência em termos de símbolos, dos quais, por vezes, nem nós próprios sabemos o significado?

Existe, sem dúvida, um valor de sobrevivência evolucionária na nossa representação do mundo em termos de mito, metáfora e teoria científica. Somos sem dúvida a única espécie com capacidades simbólicas e somos certamente a única espécie com a modesta capacidade de regular as condições da sua existência através do uso desses símbolos. A nossa capacidade de representar e simular a realidade implica a possibilidade de nos apropriarmos da ordem da existência e de fazermos uso dela com o fim de servir os interesses humanos. Uma boa simulação, quer se trate de um mito religioso quer de uma teoria científica, confere-nos uma sensação de domínio da nossa experiência. A representação simbólica que realizamos quando falamos ou escrevemos algo é, de certo modo, uma captura pela qual nos apropriamos daquilo que representamos simbolicamente. Mas, com esta apropriação, apercebemo-nos também de que negámos a imediatidade da realidade e de que, ao criar um substituto, nos limitámos a tecer mais um fio na teia da nossa grande ilusão.

Neste capítulo vou examinar um conjunto de simulações da realidade produzidas pelas ciências da complexidade. Todas estas simulações têm algo em comum — são efetuadas num computador.

A modelação computacional cresceu com o computador e é uma das suas principais aplicações como instrumento de

investigação. Tal como o microscópio e o telescópio na Era anterior, o computador abre uma nova janela sobre a realidade. Ou será que, de facto, ele cria essa realidade?

Sempre me impressionou o facto de Galileu ter efetuado muitas experiências, quando utilizou o telescópio pela primeira vez, a fim de se assegurar de que o instrumento se limitava a aumentar o tamanho dos objetos, de que não criava nenhuns objetos nem destorcia os objetos já existentes. Queria ter a certeza de poder responder a quaisquer críticos que afirmassem que o seu telescópio criava uma nova realidade em lugar de clarificar a já existente. Como poderemos então afirmar que a realidade revelada pelas simulações em computador é algo mais do que um artefato do computador?

Lembre-se do adágio, pelo menos tão velho como o próprio computador: "Entra lixo e sai lixo." Será que o computador não vai além da entrada de dados e do programa que nós lhe introduzimos? A entrada de dados e o programa são sem dúvida artefatos humanos — são reunidos e criados pelo cientista. Tal como os telescópios e os microscópios, os computadores (pelo menos os já existentes) não passam, no fim de contas, de máquinas "estúpidas". Não podemos, por isso, rejeitar o juízo humano sobre os dados e os programas, ao decidirmos se uma dada simulação é válida ou não. Temos de ver o computador como um instrumento científico em mãos humanas, e não como uma "caixa negra" com poderes mágicos que cria uma realidade que ultrapassa os nossos conhecimentos. De outro modo estaremos condenados a confundir a simulação do computador com a própria realidade.

Com a simulação em computador, os cientistas tentam normalmente modelar sistemas complexos (de outra forma não valeria a pena usar um computador). A hipótese fundamental que está por trás da simulação de sistemas complexos é que a complexidade aparente do sistema a modelar é devida a alguns componentes simples que interagem mutuamente. Essas interações têm lugar segundo regras também simples, que são incorporadas no programa. De certa maneira, a complexidade de certos sistemas, apesar de bastante real, tem uma explicação simples. Para ser eficaz, a modelação em computador deve usar

um programa que seja mais simples do que o sistema que está a ser modelado. De outra forma, está-se a tentar imitar cegamente o sistema num computador, sem se aplicar qualquer conhecimento.

Esta é a hipótese reducionista de explicação científica, expressa em linguagem de modelação computacional. É importante salientar que a hipótese se refere ao programa, não aos dados, e que não depende do facto de o sistema ser simulável por um sistema mais simples que ele próprio.

Como exemplo, considere-se o caso da remodelação de Lorenz do tempo meteorológico. O programa do computador representou três equações que eram bastante simples. A saída de dados do computador, começando com um certo conjunto de dados iniciais, era "determinística, mas imprevisível" — a saída pormenorizada das equações que representam o tempo não podia ser simulada. No entanto, havia ordem neste caos; o padrão de órbitas no espaço de estado não era arbitrário, mas tinha uma geometria explícita — a forma do atrator estranho, que era consequência de um programa simples. Não se deverá, portanto, confundir a propriedade de imprevisibilidade (impossibilidade de simulação) com complexidade intrínseca subjacente. O sistema pode ser imprevisível, embora o programa que o descreve seja simples.

Nas ciências naturais, a hipótese de os programas que modelam os sistemas reais serem simples já foi largamente demonstrada. Isto reflete simplesmente o facto de existir uma ordem simples e invariante para os sistemas físicos e biológicos — os processos materiais que estão presentes no mundo. Independentemente de o cientista estar a modelar o comportamento dos *quarks* dentro de um protão, a transmissão de proteínas através da membrana de uma célula ou o sistema coração-pulmões, existe ali um *ali*.

Os cientistas comportamentais enfrentam um desafio maior quando fazem modelações num computador, pois não dispõem de uma teoria profunda dos fenómenos psicológicos ou sociais. Existe o perigo de o modelo do computador se confundir com o fenómeno que se propõe modelar. O modelo do computador, em vez de instrumento para o estudo da realidade, torna-se, ele

mesmo, a própria realidade (os cientistas naturais também não estão livres de que lhes suceda o mesmo).

O impacto do computador nas ciências comportamentais é enorme, uma vez que permite a esses cientistas aprofundar o seu conhecimento descritivo do comportamento social e psicológico. Este impacto tem menos a ver com a existência de uma teoria profunda do comportamento do que com a capacidade do computador de gerir e analisar um grande número de dados. Estamos a ficar com uma imagem mais nítida do comportamento social, económico e psicológico; estamos a estabelecer correlações entre diferentes fenómenos e a construir aquilo a que se chama "modelos fenomenológicos", em oposição aos "modelos profundos". Um modelo fenomenológico explica e correlaciona os dados de uma forma quantitativa e descritiva sem descer a argumentações mais profundas sobre a razão dessas correlações. Esses modelos são o primeiro passo no sentido de um maior conhecimento.

Vamos examinar neste capítulo diversos modelos de computador — simulações da realidade —, que irão dar ao leitor uma ideia dos limites desta técnica. Esta será, no entanto, uma visão reduzida, uma vez que não posso sequer pretender mostrar uma fração do que está a ser realizado no campo da modelação em computador.

Simulando a Inteligência

Desde o aparecimento dos computadores que as suas capacidades, especialmente as capacidades intelectuais, têm sido comparadas às dos seres humanos. Estas comparações são um pouco irrefletidas, pois os seres humanos são muito diferentes dos computadores; é o mesmo que pretender comparar uma mão com uma chave de parafusos. Apesar disso, essas comparações mexem connosco, uma vez que o computador, ao simular um comportamento inteligente, desafia a própria conceção que temos de nós próprios. Acresce o facto de que o assunto tem um grande eco popular, uma vez que é facilmente apreendido.

A maioria das pessoas que refletiram sobre o problema da simulação da inteligência não viu à priori nenhum obstáculo à construção de uma verdadeira inteligência artificial, uma máquina que passasse o "teste de Turing", conseguindo enganar as pessoas e levá-las a pensar que se trata de um ser humano pensante e com sentimentos. A discussão entre cientistas e filósofos não é sobre a viabilidade teórica do projeto, mas sim sobre o modo como ele poderia, ou não, ser posto na prática. Poderá um computador digital, programado de forma apropriada, simular uma verdadeira inteligência humana? Em cada instante da sua operação, o computador responderia a uma entrada inteligente com uma saída inteligente, seguindo para tal um conjunto bem definido de regras. Seria possível ter uma conversa espontânea e estimulante com ele?

Nunca ninguém construiu uma máquina ou realizou um programa que chegasse perto desta capacidade. A questão de saber se este é um problema de princípio, como alguns filósofos insistem, ou um problema de índole prática, como defendem os proponentes da inteligência artificial, será ainda debatida durante muito tempo. O debate, no entanto, é estéril — não produz novas pistas sobre o modo de proceder para construir máquinas mais inteligentes, algo que até os filósofos mais críticos acreditam ser possível.

Acredito que o futuro das máquinas inteligentes esteja menos nas mãos dos especialistas de inteligência artificial (IA) ou dos filósofos do que nas mãos dos engenheiros de computadores e dos cientistas — produtores de *hardware* e de *software* —, que, abstraídos do debate, irão até onde o conhecimento científico e tecnológico os levar. A capacidade dos computadores de atuar inteligentemente irá certamente aumentar, até que um dia, num futuro distante, existam máquinas excecionalmente inteligentes. A maneira como irão exibir e usar a sua inteligência será certamente diferente da dos seres humanos, tendo as suas próprias capacidades e limitações.

Por vezes ponho-me a fantasiar sobre as formas que irão tomar essas primeiras máquinas inteligentes. Seria provavelmente possível manter uma boa discussão com elas, desde que ela não incidisse sobre assuntos muito profundos. As máquinas

inteligentes seriam ótimas para fornecer todo o tipo de informações, desde os números de telefone dos nossos amigos até ao nome de todos os rios do Tibete — um verdadeiro armazém de conhecimentos —, seriam incríveis em matemática computacional, mas fracas em "intuição" matemática. Poderiam mesmo ter "personalidades" comparáveis às dos animais de estimação e desenvolver um conhecimento dos hábitos pessoais dos seus proprietários. Uma tal inteligência seria boa para considerar as diferentes possibilidades de decisão, mas má para escolher uma de entre elas. Teriam a sensibilidade moral de um gato.

O comércio, a indústria e as nações competiriam fortemente pela construção de melhores máquinas inteligentes. Com uma tal pressão competitiva, a sua qualidade melhoraria rapidamente. As vantagens destas máquinas serão tantas que muitos aspetos da sua construção serão mantidos secretos, para não caírem nas mãos dos competidores.

A existência destas máquinas iria também pôr fim a muitas discussões sobre o problema do corpo-mente, pois será muito difícil não lhes atribuir uma mente consciente sem deixar de fazer o mesmo para seres mais humanos. Gradualmente, a opinião popular será que a consciência é simplesmente "aquilo que acontece" quando se junta matéria de maneira a formar uma rede neural, tal como uma televisão é "aquilo que acontece" quando alguns componentes eletrónicos são reunidos de forma correta. Algumas pessoas argumentarão que a vida artificial inteligente deveria também ser protegida por lei, por direito próprio — uma Carta de Direitos[1] da IA. Isso será um sinal da chegada da verdadeira IA.

Até há cinco anos, as tentativas de construção de máquinas inteligentes eram dominadas por aquilo a que poderíamos chamar "a comunidade da inteligência artificial". Esta comunidade tem uma definição muito alargada, sendo constituída por grupos que diferem uns dos outros, embora possuam um conjunto de características comuns. Em primeiro lugar, os membros desta comunidade cresceram com o computador digital programável, que faz com que muitas das suas ideias sobre máquinas pensantes estejam associadas com essa arquitetura particular do computador. Em segundo lugar, segundo a sua opinião, que é

partilhada pelos cientistas cognitivos, o programa é a essência da mente. Dão preferência à manipulação simbólica de alto nível e acham que a essência do comportamento inteligente reside numa busca terminal e sequencial.

Esta estratégia da IA tem tido alguns sucessos significativos nas áreas da demonstração de teoremas, dos programas de gamão, damas e xadrez, dos sistemas periciais e de outras aplicações da robótica. Se examinarmos estes programas de IA em pormenor, concluiremos que eles têm pouco ou nada a ver com a maneira como os seres humanos reconhecidamente fazem essas coisas. Isso, no entanto, não é uma crítica. O tempo de conceção desses programas é, contudo, muito longo; cada tarefa exige um novo programa, e, se se pedir ao programa para fazer algo ligeiramente diferente daquilo para que foi preparado, ele falha miseravelmente.

Esta insatisfação relativamente à estratégia da IA de utilização dos sistemas digitais sequenciais para simular a inteligência levou os cientistas de computadores a procurar noutro lado os princípios da conceção das suas máquinas inteligentes. Hoje em dia, a grande ênfase está no conexionismo — um novo desenvolvimento inspirado nas redes neurais do cérebro, no sistema evolucionário ou na resposta imunológica. A ideia base aqui é que a chave para o progresso da simulação da inteligência reside no paralelismo maciço, no armazenamento distribuído da informação e nas interconexões associativas, tudo ideias inspiradas nos sistemas biológicos. Irei dedicar a totalidade do próximo capítulo ao "conexionismo".

Gian-Carlo Rota, um matemático do MIT, conta uma história sobre o falecido Stan Ulam, um matemático de Los Álamos que teceu fortes críticas à estratégia da IA. Rota e Ulam caminhavam um dia pelas ruas de Santa Fé discutindo o grande problema da construção de máquinas verdadeiramente inteligentes — como "resolver o problema da cognição", como levar os computadores a apreender significados, um assunto já nessa altura (início dos anos setenta) polémico. Ulam argumentava: "Os filósofos e os especialistas da lógica, desde Duns Scotus no século XII até Ludwig Wittgenstein nos nossos tempos, refletiram lucidamente sobre tudo isso. Se os teus amigos da IA — persistem em ignorar

o seu passado, estarão condenados a repeti-lo por um preço muito alto, que será suportado pelos contribuintes."

Rota desafiou Ulam a dizer algo de positivo sobre a "barreira do significado". Em resposta ao desafio, Ulam sugeriu que fizessem um jogo de palavras sobre a maneira como a palavra "chave" é usada. O que iriam descobrir, ao fazerem esse jogo. disse Ulam, "é que aquilo que descreves não é um objeto, mas uma função, e que está inextricavelmente ligada a algum contexto. Tira-lhe o contexto, e o significado desaparece. [...] Quando apreendes algo de forma inteligente, como às vezes fazes, apreendes sempre uma função, nunca um objeto no... sentido físico. [...] A tua ideia cartesiana de um aparelho no cérebro que efetua os registos baseia-se na analogia enganadora entre visão e fotografia. As câmaras registam sempre objetos, mas a perceção humana é sempre a perceção de papéis funcionais. Os dois processos são bastante distintos. [...] Os teus amigos da IA estão agora a fazer um grande alarido em torno do papel dos contextos, mas não têm estudado muito bem a lição. Persistem em querer construir máquinas que veem imitando câmaras, possivelmente com alguns antecedentes atirados lá para dentro. Uma tal estratégia está condenada ao fracasso, uma vez que parte de um mal-entendido de ordem lógica."

"Mas, se o que tu dizes está certo", respondeu Rota, continuando a desafiar Ulam, "que irá então acontecer à objetividade, uma ideia que é tão definitivamente formalizada pela lógica da matemática e pela teoria dos conjuntos, às quais tu próprio dedicaste muitos anos na juventude?"

"A sério?", ripostou Ulam. "Que é que te leva a crer que a lógica matemática corresponde à forma como pensamos? Estás a sofrer daquilo a que os Franceses chamam uma '*déformation professionelle'*. Olha-me para aquela ponte lá ao fundo. Foi construída de acordo com princípios lógicos. Agora, supõe que era encontrada uma contradição na teoria de conjuntos. Acreditas que a ponte iria então cair como resultado dessa contradição? [...] A lógica só formaliza um escasso número dos processos pelos quais nós realmente raciocinamos. Chegou a altura de enriquecer a lógica formal adicionando-lhe algumas noções fundamentais. Que é que vês quando vês? Vês um objeto como uma chave, vês um

homem num automóvel como um passageiro, vês umas folhas de papel como um livro. É a palavra "como" que tem que ser formalizada matematicamente, a par com os conetivos "e", "ou", "implica" e "não", que já foram aceites na lógica formal. Antes de fazerem isto, não irão muito longe com o vosso problema da IA."

Rota disse que tal lhe parecia uma tarefa impossível, mas Ulam sossegou-o: "Não percas a fé. A nossa matemática é uma poderosa fortaleza. A matemática estará à altura do desafio, como sempre esteve."

Ulam começou a afastar-se. Exatamente o mesmo que — lembrou-se Rota — Descartes, Kant, Charles Saunders Pierce, Husserl e Wittgenstein tinham feito numa encruzilhada semelhante. Estava a mudar de assunto.

Recristalização Simulada

Ao mudarmos de assunto da simulação de inteligência para a simulação da recristalização — um processo físico no qual uma substância cristalina é fundida e depois deixada arrefecer —, estamos também a passar do domínio do transcendente para o domínio do mundano. No entanto, o nosso conhecimento do processo mundano de recristalização pode acabar por nos ensinar algo de mais geral, talvez mesmo o modo como a mente transcendente é suportada materialmente.

Imagine-se uma substância cristalina que é aquecida até fundir, transformando-se então num fluído de átomos. Uma questão fundamental da mecânica estatística desse estado consiste no que acontece à medida que se baixa a temperatura. A substância mantém-se líquida, forma um cristal com muitos defeitos, forma um vidro sem qualquer ordem cristalina? Numa recristalização cuidada, a temperatura é descida até um valor próximo do ponto de fusão, na qual é mantida durante um longo período. Desta forma, os átomos têm tempo suficiente para descobrir o "melhor encaixe" entre eles, formando assim um verdadeiro cristal quando a temperatura é finalmente descida até à temperatura de fusão. A verdadeira configuração cristalina dos

átomos está próxima da energia da configuração mínima, aquilo a que se chama o "estado elementar" de todos os átomos.

Este processo de recristalização pode ser simulado num computador usando um algoritmo especial imaginado por Nicholas Metropolis, do Laboratório Nacional de Los Álamos. O algoritmo de Metropolis possibilita uma simulação eficiente de um conjunto de átomos em equilíbrio a uma dada temperatura — uma salganhada aleatória de átomos que se movem em todas as direções. A aplicação deste algoritmo ao processo de recristalização é, de facto, uma boa ideia. Mas que justificação tem a nossa preocupação com algo tão trivial como o processo de recristalização?

Scott Kirkpatrick e os seus colaboradores C. D. Gelatt, Jr., e M. P. Vecchi, dos laboratórios da IBM, foram os primeiros a compreender as implicações mais profundas da simulação do processo de recristalização: ela possibilita uma solução aproximada de alguns dos problemas mais intricados de otimização em matemática. Recorda-se o problema do caixeiro-viajante que discutimos a propósito da complexidade computacional — pretendemos encontrar a trajetória mais curta entre *n* cidades a ser percorrida uma só vez por um caixeiro-viajante. Todos os processos conhecidos para resolver este problema exigem um tempo de computação que cresce exponencialmente com *n*, o número de cidades. Para mil ou mais cidades, o tempo de computação necessário para a resolução exata deste problema seria pura e simplesmente gigantesco. A resolução deste problema não parece ter nada a ver com a recristalização. Mas tem.

Na simulação do processo de recristalização, começa-se com um conjunto aleatório de átomos. Mas os átomos, sendo simplesmente entidades matemáticas, podem ser substituídos por outras coisas — como, por exemplo, um conjunto aleatório de trajetórias do caixeiro-viajante. O nível de aleatoriedade é controlado pela "temperatura", que aqui não passa de uma variável ajustável pelo programa do computador. À medida que se arrefece lentamente o fluído de átomos, estes formam um cristal — a configuração ótima com uma energia mínima. Pode não ser a configuração de energia mínima absoluta — uma solução perfeita

—, mas está suficientemente perto dela. O mesmo se passa com o problema do caixeiro-viajante. À medida que se desce a "temperatura" que regula o nível da aleatoriedade das trajetórias, estas "cristalizam-se" em torno de uma configuração próxima da configuração ótima. Em vez de encontrarmos exatamente o caminho mais curto, contentamo-nos com um caminho que, provavelmente, não será muito mais longo. A vantagem da solução aproximada sobre a solução exata está em que a podemos encontrar num tempo de computação bastante curto.

A recristalização simulada conduz então a uma nova estratégia de confronto com problemas anteriormente intratáveis. Representa um melhoramento em relação aos métodos anteriores de resolução de problemas — o método de "dividir para conquistar" (dividir um grande problema em subproblemas e depois tentar resolver sucessivamente esses problemas mais simples) ou o método do melhoramento iterativo (adivinhar uma solução e depois, gradualmente, tentar melhorá-la). Ao contrário destes métodos convencionais, a recristalização simulada possui um elemento de aleatoriedade associado, e quando essa aleatoriedade pára chega-se a uma solução aproximada.

Curiosamente, este algoritmo para a resolução de problemas complexos foi inspirado num processo natural verdadeiro. Primeiro vemos como é que a natureza faz, depois tentamos imitá-la de acordo com aquilo que vimos. O processo de seleção natural é um outro exemplo de como a natureza faz — neste caso, a seleção e o reconhecimento de padrões. Vamos, de seguida, examinar a modelação desses sistemas seletivos.

A procura de algoritmos, como a recristalização simulada, não é um simples passatempo intelectual; tem sido usada para economizar milhões de dólares. A recristalização simulada tem sido utilizada para determinar uma solução para o problema complexo da conceção de computadores — em particular, como organizar e ligar os circuitos chip de maneira mais eficiente. Pode ser usada para encaminhar o tráfego aéreo global e para resolver outros problemas do mesmo tipo. Além disso, como observam Kirkpatrick e seus colaboradores, "fornece um exemplo intrigante de 'inteligência artificial', no qual o computador chega, quase sem

instruções, a uma solução que poderia pensar-se exigir a intervenção de inteligência humana".

Da primeira vez que ouvi falar de recristalização simulada pus-me a pensar sobre a minha própria maneira de resolver problemas, que raramente se realiza por um processo racional e dedutivo. Dou mais valor a uma livre associação de ideias, uma confusão de três ou quatro ideias que saltam na minha cabeça. À medida que aumenta o desejo de uma resposta, os ressaltos vão parando, até que me decido por uma só ideia ou estratégia que considero a melhor. Da mesma maneira, quando sinto que as minhas ações estão a entrar numa rotina, introduzo um elemento caótico na minha vida — lanço-me numa ação aleatória, procuro uma pessoa, um grupo ou um encontro novos, sem procurar uma justificação com base nos meus valores anteriores. É normalmente uma experiência didática, quando mais não seja pelo facto de me mostrar que não estou a cair na rotina. A adoção de metáforas científicas na nossa vida pode alterar a maneira como pensamos e agimos.

Autómatos Celulares, Vida Artificial e Biologia Computacional

A teoria matemática dos autómatos celulares foi criada por John von Neumann nos anos cinquenta. Um autómato celular é um conjunto de células (poder-se-ia imaginar uma grelha semelhante a um tabuleiro de xadrez, onde cada casa é uma célula). Cada célula pode estar num certo número de estados (tal como cada casa do tabuleiro pode estar num estado branco ou num estado preto). O autómato inteiro pode evoluir no tempo de acordo com as regras predefinidas. Por exemplo: em volta de cada célula quadrada bidimensional existem oito outras células; uma regra podia então dizer que sempre que haja quatro ou mais células brancas em torno de uma outra esta célula muda de cor no passo temporal seguinte. Há inúmeras possibilidades de regras diferentes e cada conjunto de regras conduz a uma evolução diferente do autómato. A ideia de um autómato celular é simples . .. decepcionantemente simples.

Os autómatos celulares quase não passavam de curiosidades matemáticas até que Edward Fredkin se interessou por eles. Fredkin é um dos maravilhosos malucos da moderna ciência dos computadores e um maluco de uma espécie rara — um cientista inventor e autodidata. Conta com uma inteligência indisciplinada, mas altamente criativa, que não admite que nada se lhe imponha no caminho. Depois de mandar o Cal Tech às urtigas, Fredkin alistou-se na Força Aérea, onde conheceu o seu primeiro computador substancial. Foi uma relação que perdurou. Fredkin criou mais tarde a sua própria companhia de computadores, que produzia equipamento de processamento de imagens, tendo-se tornado milionário ao fim de pouco tempo. Com a fortuna já assegurada, tornou-se professor no MIT e lançou a confusão entre os professores com o seu estilo pouco académico. Raramente publica as suas ideias, pois, uma vez resolvido um problema de forma satisfatória, desinteressa-se dele, não sentindo necessidade de escrever a solução. Enquanto alguns cientistas estão interessados em simular processos naturais do universo, Fredkin já vai um passo à frente deles. Sente-se possuído pela ideia de que todo o universo é um computador.

Como pode o universo ser um computador e em particular um autómato celular? Fredkin, bem como outras pessoas que já brincaram com autómatos celulares em ecrãs de computadores, ficou impressionado com o facto de, com certos tipos de regras, os autómatos poderem gerar ondas e outros tipos de movimentos observados na natureza. Poderá a natureza, então, ser um autómato celular? Talvez o espaço e o tempo não sejam contínuos ao nível microscópico, mas discretos (apesar do facto de os mais poderosos aceleradores de alta energia que hoje existem não mostrarem essa granularidade). Se o espaço e o tempo são discretos e se dividem em pequenas células, o universo pode ser visto como um autómato celular — por outras palavras, como um computador. Fredkin tem estado a procurar a grande regra que fará este autómato celular espácio-temporal funcionar da mesma maneira que o nosso universo. Até agora, ainda não o conseguiu. Duvido que consiga.

Fredkin passou longos períodos a conversar com o físico Richard Feynman (Feynman foi padrinho de casamento de Fredkin). Não sei o que resultou dessas conversas, mas posso

adivinhar. Feynman provavelmente explicou a Fredkin que um computador não pode reproduzir o comportamento das películas quânticas designado por "correlações quânticas de longo alcance". As partículas quânticas não obedecem às leis da física clássica; são esquisitas. São, de facto, tão esquisitas que se pode provar (naquilo que é conhecido pelo teorema de Bell) que nenhum sistema mecânico local pode reproduzir as correlações quânticas de longo alcance que são observadas, de facto, em experiências laboratoriais com partículas microscópicas. Por outras palavras, não é possível explicar os acontecimentos quânticos com a ajuda de uma imagem mecânica. Os autómatos celulares, pelo menos os convencionais, são sistemas mecânicos locais. Assim, um universo construído com base nesses autómatos celulares não pode ser o nosso universo quântico. O problema que aqui enfrentamos é o facto de um computador (e um autómato celular é um computador) ser essencialmente um aparelho da física clássica e não poder, portanto, simular fenómenos quânticos. Talvez uma noção mais geral de computador — um "computador quântico" — pudesse desempenhar essa tarefa (ver a discussão no fim do capítulo "Guerreiros do infinito"). Tenho a certeza de que não é um argumento desses que vai fazer parar Fredkin e que ele acabará por encontrar uma resposta a essa crítica.

Aqui há alguns anos, Fredkin juntou um grupo de cientistas de computadores e de físicos que partilhavam o seu entusiasmo por problemas fundamentais da computação, numa ilha que comprou nas ilhas Virgens. O objetivo do encontro era o de proporcionar uma discussão livre entre um grupo de especialistas. Uma das pessoas presentes nesse encontro insular foi Steven Wolfram. E uma das consequências dessa reunião foi que Wolfram se começou a interessar por autómatos celulares.

Steven Wolfram é um exemplo típico da nova geração de empresários intelectuais. Começou a sua carreira como físico teórico, trabalhando em problemas da teoria quântica de campos. No decurso dos seus trabalhos envolveu-se no mundo da computação e chegou mesmo a desenvolver a sua própria linguagem de programação, a SMP, que pode manipular equações matemáticas. Depressa se converteu à nova visão computacional dos processos físicos — as leis da natureza são algoritmos e os processos físicos são vistos como sistemas computacionais que

processam a informação de uma forma muito semelhante à dos computadores.

Agora director do recém-criado Centro de Investigação dos Sistemas Complexos da Universidade de Illinois, Wolfram tem estado na vanguarda das novas ciências da complexidade. Ele vê a complexidade como algo que emerge da simplicidade. "A natureza", diz Wolfram, "fornece muitos exemplos de sistemas cujos componentes básicos são simples, mas cujo comportamento geral é extremamente complexo. [...] A complexidade nos sistemas naturais surge normalmente do efeito coletivo de um grande número de componentes. É muitas vezes praticamente impossível prever o comportamento exato do sistema como um todo. Mas o sistema como um todo pode, apesar de tudo, exibir um comportamento geral definido, e este comportamento tem geralmente várias características importantes."

Wolfram, seguindo o exemplo de Fredkin, desenvolveu estudos de autómatos celulares como um exemplo desta perspetiva dos processos físicos. Uma boa maneira de visualizar um autómato celular (como Wolfram faz, de facto) consiste em imaginar o ecrã de um monitor — uma matriz regular de *pixels*[2]. Neste sistema simples um *pixel* pode estar aceso, "1", ou apagado, "0". Estes *pixels* são as células componentes do autómato. De início, vamos supor que a primeira fila de células (aqui com 14 unidades de comprimento) tem uma forma específica, como por exemplo:

0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0

De seguida temos de escolher uma certa regra de evolução desta configuração inicial. A regra que escolhemos é muito simples. Se houver um 0 com um 0 à sua direita, não se altera o 0; se houver um 0 com um 1 à sua direita, então o 0 passa a 1; se houver um 1 com um 0 à sua direita, não se altera o 1; se houver um 1 com um 1 à sua direita, então o 1 passa a 0; se não houver nada à direita (como acontece no canto direito), supõe-se que é um 0. Esta regra pode ser apresentada na forma de uma tabela:

0 0 0	0 1 1	1 0 1	1 1 0

Podemos assim construir a fila seguinte dada a fila anterior. Em poucas palavras, o nosso autómato celular pode evoluir no tempo construindo uma fila a seguir à outra. Partindo da fila inicial, dada em cima, e usando a regra dada pela tabela, podemos ver como o autómato se desenvolve:

```
0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0
1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0
0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0
1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0
0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0
0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0
0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0
1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 0
0 1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0
1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0
```

E por aí fora. Dependendo da fila inicial e da regra que usarmos, pode-se desenvolver um padrão muito complicado, repleto de figuras geométricas complicadas. Wolfram possui montes de exemplos; chegou mesmo a fazer postais ilustrados com alguns dos padrões mais intrigantes. Os autómatos celulares são um bom exemplo de como a complexidade pode surgir a partir de uma simplicidade subjacente.

Muitas questões interessantes sobre estes autómatos celulares vêm-nos imediatamente à cabeça. Por exemplo, será que um certo autómato eventualmente acaba (surgindo uma fila de 0's), ou se torna periódico (a fila inicial volta a aparecer como uma fila subsequente), ou será que se prolonga indefinidamente? Se se prolongar indefinidamente, limita-se a ir repetindo o mesmo padrão estável, ou exibe um padrão imprevisível? Como poderemos dar resposta a estas questões?

Alguns autómatos celulares param, outros são periódicos e ouros prolongam-se indefinidamente. Em alguns casos (muito simples) podemos prever matematicamente que eles vão terminar rapidamente, ou que vão desenvolver um padrão estável. Nestes casos, temos um exemplo de "complexidade simulável" — existe um algoritmo que é mais simples do que os cálculos representados pelo autómato e que nos diz com antecedência

aquilo que se irá passar. Nos casos de "complexidade não simulável" não existe um tal algoritmo, e a maneira mais eficiente de descobrir o que se passa é correr efetivamente o programa: o autómato é a melhor simulação de si próprio. Existem assim autómatos para os quais o problema da paragem de Turing — o problema de prever se uma dada computação acabará por parar ou não — é indecidível, e outros, para os quais é decidível. Os autómatos celulares, apesar da sua aparente simplicidade, fazem uma pessoa envolver-se em temas computacionais profundos sobre a possibilidade de simulação e de decisão.

A classificação dos comportamentos dos autómatos celulares, com base nos diferentes atratores, é semelhante à já referida para o caso dos sistemas dinâmicos (um autómato celular é um sistema dinâmico). Em primeiro lugar, existe o comportamento do "ponto fixo" — o autómato pára. Em segundo lugar, existe o "ciclo limite", no qual o autómato fica simplesmente sujeito a um comportamento periódico. A terceira categoria é a do comportamento caótico. Em quarto e último lugar, aparece-nos a classe mais interessante, na qual o autómato exibe um comportamento quase periódico, bem como a propagação de várias estruturas. Este quarto domínio, que é o verdadeiro domínio do comportamento complexo, surge exatamente antes dos primeiros sintomas de caos.

Os autómatos celulares podem exibir um comportamento muito variado. O autómato celular que descrevemos atrás só tinha catorze unidades de comprimento. Em escalas maiores, com um grande número de *pixels*, nas quais os *pixels* são muito pequenos quando comparados com a escala em que os estamos a observar, os autómatos celulares podem exibir características contínuas, como sejam o movimento ondulatório, as interações de longo alcance e a aleatoriedade. Sabe-se que alguns autómatos são equivalentes a máquinas de Turing universais, podendo por isso simular tudo o que é suscetível de ser simulado numa máquina de Turing. Resumindo, os autómatos celulares são computadores universais.

O matemático John Conway já tinha concebido um tipo de autómato celular particularmente intrigante, chamado "Jogo da Vida", ainda antes de Wolfram se interessar por autómatos

celulares. Na realidade, não se trata de um jogo, mas de um exemplo de vida artificial. Existem duas formas conhecidas de vida artificial — os robôs, que se movem no espaço e no tempo reais, e as simulações dos computadores, formas de vida que existem somente no software de um computador. A "Vida" de Conway é um exemplo desta última forma.

Em vez de consistir numa simples fila de pixels, a "Vida" usa a totalidade do ecrã bidimensional. A cada unidade de tempo corresponde um ecrã completamente novo, de modo a ser possível visualizar a mudança de toda a configuração ao longo do tempo. Mais uma vez, existem regras que determinam quais os *pixels* que se acendem e quais os que se apagam, dependendo dos outros *pixels* que se encontravam em redor no instante anterior. Conway inventou regras que perpetuam padrões interessantes. Usando as suas regras, depressa se descobre que aparecem no ecrã toda uma série de objetos que chegam a parecer ter vida própria. Existe um objeto com o nome de "planador" que se move no ecrã ao longo de linhas diagonais; um outro objeto, a "colmeia", apresenta um comportamento periódico. Os diferentes objetos colidem no ecrã, aniquilando-se, formando novos objetos ou saindo do ecrã. Existe um grande inventário de formas de vida, e alguns curiosos descobrem, por vezes, outros novos tipos.

Ninguém sabe quais são os limites do "Jogo da Vida". Embora muitas configurações se limitem a dissipar-se em configurações pouco interessantes e previsíveis, outras há que vão continuando a gerar mais "vida". Possivelmente, se a área de interação fosse suficientemente grande, em vez de estar limitada a um ecrã de computador, esta vida artificial poderia continuar para sempre, talvez mesmo criando outras formas mais complexas. É espantoso ver como um punhado de regras simples pode gerar uma tal complexidade. Da mesma maneira, é impressionante o modo como as regras de combinação atómica do mundo real podem gerar a complexidade dos seres vivos — o verdadeiro jogo da vida.

O facto de as regras simples que governam os autómatos celulares poderem dar origem a padrões tão complexos como os exibidos pelos organismos vivos fascinou muitas pessoas. Em

1975, R. Laing propôs máquinas moleculares artificiais que podiam interagir mutuamente pela leitura e escrita recíproca das fitas de cada uma delas. Christopher G. Langton, da Universidade de Michigan, levou estas ideias bastante longe. Nas suas próprias palavras, decidiu "explorar a possibilidade de implementação da 'lógica molecular do estado vivo' numa *bioquímica artificial*, baseada nas interações de *moléculas artificiais*". Estas moléculas artificiais são modeladas como *autómatos virtuais*, com total liberdade de movimentos e de interações mútuas, dentro do espaço abstrato do computador. Mostramos que os autómatos celulares são capazes de suportar autómatos virtuais equivalentes a máquinas de Turing e podem, por isso, executar qualquer tarefa computável. Nesta base, propomos que a noção da 'lógica molecular do estado vivo' possa ser capturada pelas interações dos autómatos virtuais e que por isso a existência de *vida artificial* dentro dos autómatos celulares seja uma hipótese a considerar."

Investigadores como Langton não estão interessados na criação de vida dentro de um tubo de ensaio. Querem criá-la num computador. Caso o consigam, ficamos a imaginar quais poderiam ser as implicações éticas e morais.

Langton está mais interessado no comportamento emergente dos autómatos celulares — ajustando os parâmetros que controlam o desenvolvimento dos autómatos, é possível fazer emergir um novo comportamento complexo. Langton pôs em prática as suas ideias criando uma colónia de insetos artificiais. Para tal, inspirou-se em parte nas observações de Herbert Simon no seu *Sciences of the Artificial*: "Uma formiga, vista como um sistema comportamental, é algo de bastante simples. A complexidade aparente do seu comportamento ao longo do tempo é, em grande parte, uma consequência da complexidade do ambiente que a cerca." Langton também se inspirou nas ideias de E. O. Wilson sobre os insetos sociais. Wilson identificou comportamentos de agregados em colónias de formigas — comunicação de massas —, aquilo a que ele chama "transferência entre grupos de informação que um só indivíduo não poderia passar a outro".

Langton criou uma formiga artificial a que deu o nome de "*vant*"[3] — um pequeno grupo de pontos coloridos num ecrã vídeo.

Não se parece com uma formiga. É antes um autómato celular que se pode mover num ecrã vídeo. Quando choca com outros objetos do seu ambiente, incluindo outras *vants*, obedece a um conjunto de regras programadas que lhe dizem como se deve comportar. As *vants* de Langton cooperam na construção de trilhos, criando, por meio dessa cooperação, agregados que representam um comportamento de uma ordem superior — tal como acontece com as formigas reais. Apesar das suas limitações, as *vants* podem exibir comportamentos "emergentes". É caso para uma pessoa se interrogar sobre o que não fariam *vants* mais complicadas. Poderá a vida ser realmente uma espécie de jogo vídeo?

Langton tem também explorado os autómatos autorreprodutores. Como é evidente, interessa que a reprodução seja parte integrante da simulação da vida. Uma vez programada a reprodução, é possível estudar a evolução. Um passo nesta direção consiste em começar por estudar a evolução molecular estimulada por agentes catalíticos. É notável que os autómatos celulares possam imitar a atividade catalítica. O objetivo final seria simular o que os químicos Manfred Eigen e Peter Schuster chamam hiperciclos — hierarquias de vários níveis de reações catalíticas cíclicas, que podem ser a base da evolução molecular. Estas reações cíclicas podem ser vistas como os ciclos limites de reações moleculares ilineares. O seu aparecimento indicaria que as regras da bioquímica artificial usadas eram na verdade corretas, podendo conduzir a uma verdadeira evolução.

O computador abriu também as portas aos modelos diretos de evolução real — organismos que têm ação conjunta com o ambiente e entre si, formando um ecossistema complexo —, em vez de a tentar deduzir a partir da bioquímica artificial. Estes ecossistemas são muito complexos, dependendo a sua evolução do desenvolvimento de muitos subsistemas que conduzem a diversas formas novas. Em tempo real estas mudanças demoram uma eternidade, pelo que a experimentação é impossível. A única maneira de ver a evolução em ação é através de uma modelação em computador. Mateen Rizki e Michael Conrad, dois cientistas de computadores que realizaram essa modelação, comentam: "A tecnologia do computador possibilitou uma nova forma de explorar o problema. É agora possível construir modelos pormenorizados da teoria da evolução do ecossistema. Materializados em

programas da simulação, estes modelos são um novo tipo de laboratório para o estudo dos processos evolucionários."

Enquanto alguns cientistas estudam a complexidade da evolução bastante *depois* do advento das primeiras moléculas replicativas como o ADN, outros examinam o problema difícil da origem da vida — o que aconteceu *antes* do aparecimento da primeira molécula replicativa. O ADN é uma molécula complicada. Uma vez obtida uma molécula como o ADN é possível ver como a vida evoluiu. Mas como se construiu essa primeira molécula replicativa? A produção do ADN a partir de combinações aleatórias de moléculas mais simples é demasiadamente improvável. Teve de ser produzido de outra forma.

Este mistério — o mistério da evolução molecular pré-biótica — está atualmente a ser investigado por muitas pessoas com o auxílio da modelação em computador. A ideia básica é que se começa com um caldo de aminoácidos e outros metabólitos pequenos, que são os tijolos do ADN ou ARN, tentando chegar ao topo da cadeia das reações químicas, às proteínas complexas e aos ácidos nucleicos. J. Doyne Farmer, Stuart A. Kauffman e Norman H. Packard descrevem o seu trabalho da seguinte maneira: "A possibilidade que aqui estudamos é a de a vida ter surgido por meio da evolução de conjuntos autocatalíticos de polipéptidos e ou ARN padrão simples. Por *conjunto autocatalítico* queremos dizer que cada membro desse conjunto é o produto de (pelo menos) uma reação catalisada por (pelo menos) um outro membro. Aqui, a nossa tese central é a que a padronização não é necessária para se atingir um conjunto autocatalítico. Alternativamente, os polímeros simples podem catalisar a formação uns dos outros, gerando conjuntos autocatalíticos que evoluem no tempo, criando espécies químicas complexas cujas propriedades estão ajustadas para uma colaboração efetiva entre si. O sistema puxa-se assim a si próprio desde um estado inicial simples até um conjunto autocatalítico sofisticado que pode ser visto como uma forma precursora de vida." Estes autores acham que um tal cenário é, de facto, possível. Logo que a concentração dos polipéptidos simples ultrapasse um dado limiar, uma rede autocatalítica dispara, dando origem a um rico "caldo" de proteínas. Embora tais estudos de computador nunca sejam

totalmente conclusivos, mantém viva a esperança de um dia virmos a compreender a origem da vida numa base química.

Alguns investigadores como Stuart Kauffman e Robert Smith, da Universidade da Pensilvânia, usam autómatos para simular o processo evolucionário. Concebem autómatos adaptativos nos quais identificam o "genótipo" com as regras específicas que governam os vários elementos de cada autómato e o "fenótipo" com as propriedades dinâmicas do autómato resultante. Esta é uma tentativa de imitar a vida real, na qual os genes governam a síntese da proteína e a construção das células, enquanto o comportamento do organismo resultante define o seu fenótipo. As mutações são, para estes autómatos, mudanças aleatórias no genótipo — nas regras. A seleção pelo ambiente atua no genótipo, mudando assim a distribuição dos genótipos na geração seguinte. Todas estas características fazem parte do programa do computador. Deixam-se os autómatos interagir com o "cenário da aptidão", sendo então possível, por meio das simulações, acompanhar ao longo de umas cem gerações a forma como sobrevivem os autómatos mais aptos. Um facto surpreendente revelado por estas simulações é que os autómatos *não* se fixam muitas vezes numa configuração de sobrevivência ótima, em particular quando se aumenta o grau de complexidade da entidade. Uma segunda descoberta é que mesmo que uma população seja conduzida a um atrator ótimo, a seleção, devido a mutações constantes, pode ser demasiadamente fraca para assegurar a sua permanência aí.

Ainda não se esclareceram as implicações de tais estudos para a evolução real. Mas os autómatos adaptativos são um exemplo de comportamento de aprendizagem e de reconhecimento de padrões. Por outras palavras, as simulações da evolução podem não só ensinar-nos algo sobre a evolução biológica, mas também fornecer-nos um exemplo de aprendizagem artificial. A compreensão da vida artificial poderá vir a permitir-nos concebê-la de forma apropriada e utilizar estas novas formas da vida na resolução de problemas complexos para nosso proveito. Tornar-se-ão, sem dúvida, os nossos escravos computacionais.

Os trabalhos de cientistas como Kauffman, Langton, Farmer e Packard exemplificam um novo tipo de estratégia para a resolução

do problema da biologia, uma estratégia que tem sido denominada de "biologia computacional". Trata-se de biologia executada num computador, em detrimento do laboratório ou do campo. Os biólogos tradicionais poderão olhar com desconfiança a biologia computacional. Esta é, no entanto, uma estratégia que poderá alargar o nosso conhecimento de muitos problemas fundamentais da biologia.

O próprio trabalho de Stuart Kauffman na Universidade da Pensilvânia, por exemplo, indica que a seleção natural pode ser apenas uma parte da explicação do processo evolutivo — trata-se de um ponto de vista que, caso esteja correto, terá bastantes implicações na biologia. Kauffman diz que "tinha passado mais de uma década a explorar a hipótese de que grande parte da ordem biológica pode refletir propriedades auto-organizativas inerentes aos sistemas complexos, mesmo na ausência de seleção natural. É evidente que, desde Darwin, temos vindo a considerar a seleção natural, que escolhe as nossas raras mutações úteis de entre uma infinidade de mutações inúteis, como a única fonte de ordem nos sistemas biológicos. Mas estará esta suposição correta?"

Kauffman, que efetuou estudos intensivos em computador (tais como o estudo dos autómatos acima descrito) de sistemas de genes em larga escala, a fim de tentar responder a esta questão, descobriu que sistemas com apenas 10.000 genes, em que cada gene é regulado por outros dois, tendem a assentar espontaneamente num pequeno número de padrões estáveis. Estes padrões não têm nenhuma ligação direta com a seleção natural. "De uma forma mais geral", conclui ele, "o facto de os modelos genómicos montados aleatoriamente exibirem uma ordem bem marcada, mesmo que só ligeiramente reminiscente da que se encontra nos organismos vivos, desfere um rude golpe na opinião geral segundo a qual a seleção é a única fonte de ordem biológica. Penso que essa opinião está errada. Os sistemas complexos exibem uma ordem bastante mais espontânea do que a que de início tínhamos suposto, uma ordem que havia sido ignorada pela teoria evolucionária. Mas a perceção desse facto apenas representa o início da exposição do nosso problema. [...] A nossa tarefa torna-se agora muito mais árdua, pois é necessário não só visionar as propriedades de auto-ordenação dos sistemas complexos, como também compreender como essa auto-

ordenação permite, limita, guia e atua com a seleção natural. Vale a pena referir que nunca foi prestada qualquer atenção a este problema. A física tem sistemas complexos e ordem espontânea, por exemplo nos vidros de *spin*, mas não tem necessidade de considerar a seleção. Os biólogos apercebem-se perfeitamente da seleção natural, mas nunca se interrogaram como é que a seleção se comporta com as propriedades coletivas auto-ordenadas dos sistemas complexos. Estamos a entrar em terrenos inexplorados."

Uma vez que os cientistas se confrontam com tais desafios, parece provável que a biologia computacional tenha vindo para ficar. A primeira reunião de trabalho sobre biologia computacional teve lugar em 1987 sob os auspícios do Instituto de Santa Fé.

Modelando Moléculas

Se passarmos da modelação de moléculas artificiais para a modelação de moléculas reais, enfrentamos um novo desafio — até que ponto o modelo reflete a realidade? Para as moléculas artificiais esse problema não se põe. No entanto, a recompensa que se obtém, tanto em conhecimento teórico como em aplicações comerciais, da modelação de moléculas verdadeiras é muito grande, uma vez que a modelação computacional de moléculas reais nos oferece um grande domínio de pormenores que, de outro modo, nos seria inacessível. Esse domínio permite-nos depois conceber, de forma direta, moléculas e drogas úteis.

Antes do advento dos computadores os cientistas costumavam realizar modelos plásticos das grandes moléculas com a ajuda de pauzinhos e esferas. Esferas de cores diferentes, representando os diferentes átomos, eram ligadas por pauzinhos que representavam as ligações químicas. Usando estas esculturas moleculares, os cientistas podiam determinar as distâncias interatómicas entre os diversos átomos e os vários ângulos entre as ligações. Determinavam desta maneira a correlação entre os dados experimentais (obtidos por meio de diapasão de raios X por um cristal composto pelas moléculas em estudo) e o modelo teórico. Foi por este método que James Watson e Francis Crick determinaram a estrutura do ADN — tratou-se de uma combinação de informação de raios X com a construção de

modelos com base em esferas e pauzinhos, à qual juntaram algumas conjeturas brilhantes.

A impressão com que se fica ao olhar-se para uma dessas esculturas moleculares é a de uma entidade estática e complexa. Sabe-se agora que esta impressão, longamente mantida pelos cientistas, não corresponde à realidade. As moléculas movem-se. São entidades dinâmicas que se esticam e que giram. Os movimentos mais rápidos são os das librações básicas do comprimento da ligação, com uma frequência de cerca de um bilião de vibrações por segundo. Os movimentos mais lentos são os de rotação em torno do eixo de uma ligação, e ainda mais lentos são os movimentos de partes da molécula. Os estudos de raios X revelaram somente a posição *média* dos átomos na molécula, permanecendo por isso a sensação de uma entidade estática.

Estas mudanças e flutuações conformacionais das grandes biomoléculas constituem uma parte importante da sua função biológica. Esta observação deu origem à nova disciplina teórica da dinâmica de proteínas, iniciada por Martin Karplus (agora em Harvard) e pelos seus colegas da Digital Equipment Corporation num artigo histórico de 1977: "Dinâmica das proteínas dobradas". "Estas flutuações", afirma Karplus, "têm de ser tomadas em conta no estudo do desenvolvimento evolucionário." O novo campo da dinâmica de proteínas é uma consequência direta da capacidade do computador para modelar as complexidades das moléculas.

A modelação de grandes moléculas em computador é hoje uma pequena indústria, uma história de sucesso que se baseia num conjunto de fatores. Em primeiro lugar, existe um corpo crescente de bons dados experimentais, com base nos quais os cientistas podem testar os seus modelos. Em segundo lugar, os computadores já existentes têm bastante poder calculacional; novos algoritmos podem simular em pormenor a dinâmica das moléculas em movimento. Finalmente, o campo dos gráficos de computador deu passos gigantescos, sendo agora possível aos investigadores visualizar os resultados do seu trabalho em três dimensões e a cores (para que se possam distinguir as diferentes partes das moléculas). As moléculas flutuam no espaço no ecrã,

podendo ser rodadas e aumentadas a fim de se otimizar a visualização.

A primeira grande utilização do computador para a modelação de moléculas teve lugar em 1964, quando Cyrus Levinthal e Robert Langridge, respetivamente um químico de proteínas e um físico, que trabalhavam em Harvard, conseguiram mostrar moléculas tridimensionais num ecrã. Langridge está agora na Universidade da Califórnia, em San Francisco, onde dirige o laboratório de gráficos computacionais e estuda a interação de moléculas complexas. Levinthal, agora na Universidade de Columbia, continua a trabalhar em dinâmica de proteínas enquanto prossegue os seus múltiplos interesses. Levinthal interessa-se especialmente pela possibilidade de utilizar processadores paralelos — uma técnica computacional recente —, em vez de computadores sequenciais, para imitar a dinâmica molecular. Ele explica: "Se se pensar no que realmente se passa quando uma proteína, um conjunto constituído por, digamos, cinco mil átomos, assenta na água, é óbvio que as interações de todos esses átomos se realizam simultaneamente, e não sequencialmente, isto é, depois das outras, tal como temos tido de as tratar. Se dispuséssemos de uma máquina que pudesse calcular estas interações atómicas simultaneamente, todas em paralelo e em tempo real, poderíamos ser quase tão rápidos como uma proteína real." O advento de novas máquinas com paralelismo maciço irá transformar a indústria da modelação molecular.

O problema fundamental da estrutura proteica é o de compreender como é que estas longas moléculas se dobram, formando uma estrutura tridimensional particular. Uma molécula de proteína pode ser vista como uma corrente em que os elos representam os aminoácidos. Conhecemos para a maioria das moléculas proteicas a sequência exata por que estão dispostos os vinte tipos de aminoácidos diferentes ao longo da corrente. Se imaginássemos que assentávamos esta corrente numa mesa, largando-a de seguida, veríamos algo de notável. A corrente iria girar e contorcer-se até acabar por ficar toda enrolada em si própria. Em primeiro lugar, a corrente iria serpentear, acabando por formar uma mola frouxamente enrolada (estrutura secundária); depois, a mola resultante iria enrolar-se em torno de

si própria, formando um objeto tridimensional complicado (estrutura terciária). Algumas partes da corrente original poderiam ser projetadas para fora, ficando outras totalmente enroladas. A maior parte da molécula poderia ficar relativamente inerte. enquanto que uma única parte que sobressaísse seria o ponto ativo que iria interagir com as outras moléculas. Esse ponto ativo pode ter uma estrutura tridimensional específica, crucial para a sua função biológica. O problema que os modeladores moleculares enfrentam consiste em conhecer, dada a sequência de aminoácidos da corrente, a estrutura tridimensional final. Ninguém conhece uma resposta completa a este problema, e até que haja progressos nesta área a "engenharia molecular" e a indústria das "moléculas feitas por encomenda" permanecerão severamente limitadas.

Qual é a lei física que determina a forma final da molécula depois de dobrada? Presumivelmente, a resposta é que a molécula se adapta à forma correspondente ao estado de menor energia. O problema está em que para as proteínas complexas existem dúzias, se não mesmo centenas, de configurações diferentes, todas com uma energia muito próxima do verdadeiro mínimo. Encontrar o verdadeiro mínimo é como encontrar uma agulha num palheiro.

Este é um problema que reduz os modeladores de moléculas à sua insignificância. Havendo tantos estados de energia próximos do mínimo, e dependendo a energia da molécula do modelo utilizado — da forma como modelamos as leis das forças, a torção das ligações, a atração ou a repulsão elétrica entre os átomos —, se fizéssemos um pequeno erro no modelo ou ignorássemos uma força considerada irrelevante, acabaríamos por escolher o mínimo de energia errado e, portanto, também a configuração tridimensional (3-D) errada. Estes problemas multiplicam-se quando estudamos a interação de duas moléculas. Até hoje, ainda está por resolver o problema da determinação da estrutura tridimensional (3-D) das moléculas complexas. A sua resolução representará uma grande descoberta.

Os modeladores moleculares estão também interessados em outras moléculas além das proteínas. Arnold Hagler, do Instituto Agouron, tem vindo a estudar tanto as hormonas peptídicas como

as proteínas. Os péptidos são uma hormona que liberta gonadotropina (GnRH, que estimula a ovulação e a produção de esperma) e vasopressina (que contrai os vasos sanguíneos), e ambas têm uma certa importância biológica. Hagler quer tentar compreender a razão de estas hormonas serem tão poderosas, identificando os seus pontos ativos e os seus recetores. Pretende então construir uma molécula que bloqueie a sua atividade sem quaisquer "efeitos secundários".

Os péptidos são muito mais instáveis do que as proteínas, estando sempre a agitar-se. Isso torna difícil o seu estudo, já que a sua atividade depende da forma que apresentam. Observando moléculas em mutação que se assemelham a péptidos, mas que são menos flexíveis, Hagler espera isolar os componentes ativos essenciais dos péptidos a fim de conceber um antagonista. Já concebeu um modelo de um antagonista da GnRH.

O mundo da modelação molecular em computador abriu uma janela sobre um microcosmo nunca antes visto. Não é o mundo real, mas tem a vantagem única de o podermos gerir e manipular. E, graças a essa possibilidade, aumentamos o nosso poder de gestão e manipulação do mundo real das moléculas.

Sistemas Periciais: Modelando a Destreza

Uma vez, numa pequena conversa informal a que assisti no Reality Club, Edward Feigenbaum, antigo director do Departamento de Ciências dos Computadores de Stanford e fundador do Teknowledge[4], segurava uma página do jornal local de San José. Leu-nos que nesse dia as cenouras podiam ser compradas a $.89 o molho, o *hamburger* estava à venda a $1.59 o quilo e alguns *microchips* especiais estavam em saldo a $1.89 cada um. Este, dizia ele, era o verdadeiro sinal da revolução do computador. O *microchip*, cuja conceção exigiu a utilização de um pensamento científico mais do que milenário, a destreza de engenharia de milhares de pessoas, todo o poder da moderna tecnologia, estava a ser vendido a preços comparáveis aos da fruta e dos legumes.

Feigenbaum, um líder da ciência dos computadores e da inteligência artificial, não estava a vender *microchips* nesse dia; estava a falar de sistemas periciais — programas de computador que englobam e manipulam informações úteis, informações que muitas vezes se identificam com a "perícia" de um especialista humano. Os sistemas periciais são programas de computador destinados a ajudar as pessoas no seu trabalho.

O primeiro sistema pericial foi o DENDRAL, iniciado nos anos sessenta por Feigenbaum e Joshua Lederberg, um biólogo laureado com o Prémio Nobel, e no qual trabalhou mais tarde Bruce Buchanan, todos em Stanford nessa altura. A tarefa do DENDRAL consistia em enumerar estruturas possíveis de moléculas orgânicas depois de lhe terem sido fornecidos dados obtidos por espectrómetros de massa referentes a essas moléculas (os espectrómetros dão informações sobre a massa das moléculas), bem como algumas restrições, indicadas pelo utilizador, sobre as estruturas moleculares possíveis (estas restrições incorporavam o conhecimento do especialista). A fim de incorporar no programa restrições plausíveis, os criadores do DENDRAL dirigiram-se a verdadeiros especialistas — os químicos que se tinham debatido com o problema ao longo das suas carreiras. Os químicos tinham imensas regras — regras práticas — baseadas no conhecimento e em conjeturas. Todo este conhecimento químico e esta intuição foram organizados algoritmicamente, tendo sido atribuída uma valência associada (o crédito que merece uma dada conjetura) às conetividades entre as componentes do programa. Ao longo dos anos o DENDRAL ganhou uma capacidade cada vez maior de adivinhar a estrutura das moléculas orgânicas a partir dos dados fornecidos pelo espectrómetro de massa. Significativamente, depressa começou a ser utilizado, como um auxiliar, pelas pessoas a quem deveria servir — os químicos. Pelo menos vinte e cinco artigos já foram publicados com resultados que foram obtidos com o auxílio do DENDRAL.

O sucesso deste sistema pericial em breve levou ao desenvolvimento de muitos outros. O MYCIN, iniciado por Edward Shortliffe, é um auxiliar de diagnóstico médico para infeções sanguíneas e meningíticas. O PROSPECTOR trabalha como consultor para os geólogos que procuram depósitos de metais. O

MACSYMA efetua manipulação simbólica de equações algébricas, podendo fazer integrações elementares simbólicas. Auxilia assim os cientistas e os engenheiros no seu trabalho. Existem mesmo sistemas periciais que pretendem automatizar a investigação científica e que estão a ser desenvolvidos por Peter Friedland no Projeto de Programação Heurística de Stanford. O objetivo é desenvolver um sistema pericial no campo da biologia molecular que venha a colaborar com os cientistas na tentativa de tirar conclusões a partir dos dados experimentais e sugerir novas hipóteses a serem verificadas. Bruce Buchanan está presentemente a procurar um processo de dedução da estrutura tridimensional das proteínas dobradas a partir de dados da ressonância magnética nuclear e de outros tipos de dados químicos.

Os sistemas periciais são um dos sucessos da IA. Envolvem programas de busca sequencial que utilizam a capacidade de memória dos modernos computadores com o fim de representar o conhecimento. Os sistemas periciais não entendem, evidentemente, aquilo que estão a fazer, da mesma maneira que uma máquina de calcular não entende a adição. Mas trabalhando em conjunto com um utilizador humano qualificado comportam-se como manuais dinâmicos de conhecimentos e de destrezas, sendo como tal bastante úteis. Os sistemas periciais são usados para guiar a melhor estratégia de investimento ou verificar a fiabilidade de um candidato a uma linha de crédito. Podem também ser usados como instrumentos de aprendizagem. Uma pessoa inexperiente poderia aprender muita química orgânica usando o DENDRAL como manual de estudo.

Com isto, terminamos a nossa breve, e muito incompleta, análise da modelação em computador. Embora me tenha esforçado por dar ao leitor uma ideia da diversidade das simulações por computador, a exposição efetuada está incompleta. Algumas das aplicações mais comezinhas que não saltam à vista do público merecem ser mencionadas. Por exemplo, um modelo computacional do eleitorado norte-americano realizado na década de 50 verificou a resposta do eleitorado a temas sociais. Essas descobertas foram postas ao serviço da bem sucedida campanha presidencial de John F. Kennedy. Modelos computacionais da economia nacional e internacional ajudam as

várias pessoas responsáveis pela tomada de decisões. A teoria de jogos pode ser posta em prática sob a forma de programas que têm vindo a ajudar a compreender os processos de negociações (vistos como um jogo) e a evitar situações de impasse ou mesmo de guerra. Existem, contudo, outras aplicações, mais diretas, dos modelos computacionais em negociações.

Por exemplo, o Tratado da Lei dos Mares serviu-se de computadores de uma forma muito importante. Elliot Richardson, o herói do "Massacre de Sábado à Noite" durante a crise do Watergate, era o principal representante dos EUA à mesa das negociações do tratado (que os EUA, ironicamente, não assinaram, ao contrário de outras 130 nações). Richardson falou das negociações do tratado durante um grande encontro a que presidi, subordinado ao tema "cultura do computador", encontro que era patrocinado pela Academia das Ciências de Nova York. Uma das sessões, presidida por Donald Straus, presidente do Instituto de Investigação da Associação Americana de Mediação, era dedicada às negociações assistidas por computador.

O impasse que bloqueava uma importante parte do tratado tinha a ver com as operações de exploração mineira de filões metálicos a grande profundidade no leito dos oceanos. Não existe nenhuma autoridade internacional em tais regiões. As nações industrializadas dispunham dos conhecimentos e do capital necessários para levar a cabo essas operações mineiras, mas as nações menos desenvolvidas achavam-se no direito de partilhar os lucros como moeda de troca pela sua cooperação política. Em 1970 a Assembleia Geral das Nações Unidas declarou, sem nenhuma oposição, que esses filões eram uma "herança comum da humanidade". Sem um tratado internacional que regulasse as operações de exploração mineira, os bancos dos países industrializados não arriscariam um investimento. Assim, as delegações estavam altamente motivadas para conseguir chegar a um acordo.

Dan Nyhart e outras pessoas no MIT tinham já antes desenvolvido um modelo de computador que incorporava quase tudo o que se sabia sobre os fatores económicos da exploração mineira a grande profundidade. O governo dos Estados Unidos, bem como os de outros países, estavam interessados na

viabilidade comercial de uma nova exploração mineira como esta, tendo apoiado o desenvolvimento do modelo. Jim Sebenius, que trabalhava na altura para Richardson no Departamento do Comércio, ouviu falar do Modelo de Exploração Mineira Oceânica a Grande Profundidade do MIT por alturas do seu envolvimento nas negociações da Lei do Mar. Apercebeu-se do auxílio que um tal modelo poderia prestar a quem tivesse de vencer o desafio de fazer 150 nações, com diferentes culturas e diferentes valores, chegar a um acordo. O embaixador de Singapura, Tommy Koh, que presidiu ao grupo de trabalho encarregado das questões mineiras, apercebeu-se também da importância de um modelo de computador complexo para o processo das negociações.

A chave do sucesso que estas negociações vieram a ter esteve no facto de estes e outros dirigentes terem convencido os representantes das diversas nações da credibilidade do modelo do computador. O facto de os conselheiros políticos de muitas companhias mineiras comerciais terem tecido críticas ao modelo ajudou, ironicamente, os representantes dos países do Terceiro Mundo a aceitar a sua credibilidade. Usando o modelo, foram resolvidos todos os pormenores económicos do Tratado de Exploração Mineira do Mar Profundo, que viria a ser produzido por uma agência internacional.

Seria uma grande ajuda se esse tipo de modelos de computador pudesse ser utilizado para negociações de controle de armamento. Mas os problemas colocados pelo estabelecimento de equivalências de armamentos assumem demasiada dificuldade de ultrapassar, não sendo fácil um acordo entre as partes interessadas quanto ao modelo de computador a utilizar. De qualquer maneira, a modelação por computador pode vir a desempenhar um importante papel em muitos tipos de negociações.

A modelação em computador é um instrumento novo e poderoso no ambiente de trabalho científico. Podemos compreender a realidade simulando-a. No próximo capítulo vamos examinar aquele que é certamente o maior desafio colocado à simulação por computador, a modelação do pedaço de matéria mais complexo de todo o universo conhecido — o cérebro humano.

[1] Carta de Direitos é a secção da Constituição dos Estados Unidos que define os direitos, liberdades e garantias dos cidadãos norte-americanos. (*N. do T.*)
[2] Aglutinação das palavras inglesas "*picture element*", a que em português poderemos chamar "ponto de imagem" (*N. do T.*).
[3] O nome "vant" deve provavelmente significar "*video-ant*", o que em inglês quer dizer "a formiga do ecrã". (*N. do T.*)
[4] Aglutinação das palavras inglesas "*technical knowledge*", que em português significa: "conhecimento técnico". (*N. do T.*)

CAPÍTULO 6

– CONEXIONISMO / REDES NEURAIS –

> É opinião geral que o "computador do futuro" terá um alto grau de paralelismo e uma grande imunidade às falhas. A conceção dessa tal máquina tem-se, contudo, revelado uma tarefa surpreendentemente difícil. Já teríamos desistido há muito tempo se não existisse o cérebro a dar-nos a prova viva da viabilidade e do poder desse processamento paralelo com imunidade às falhas.
>
> *JOHN S. DENKER, 1985*

Já há muito tempo que o homem acalentava o sonho de voar, e os pássaros eram a prova viva de que voar era, de facto, possível. Assim, não foi surpreendente que as nossas primeiras tentativas para voar se baseassem na imitação desses pássaros. Reza a lenda que a primeira tentativa de voo foi efetuada por Dédalo. Porém, uma das primeiras tentativas históricas de voo utilizou o ornitóptero de Leonardo da Vinci — que era um conjunto de asas operado mecanicamente. Contudo, a solução final encontrada, como todos sabemos, acabou por não ser uma imitação assim tão fiel dos pássaros. Em vez disso, o homem começou por alcançar os céus em balões que nada têm a ver com pássaros, e mais tarde, em aviões, helicópteros, foguetões, etc. É verdade que os aviões imitam parcialmente os pássaros — têm asas e caudas como eles. Mas também têm hélices e motores mecânicos. Embora possamos aprender muito com a natureza, as nossas hipóteses de sucesso são muito limitadas se nos restringirmos a uma imitação.

O homem também acalenta o sonho de vir a construir um cérebro artificial, e se, como indica a citação anterior de John Denker dos laboratórios Bell da AT&T, não tivéssemos a prova viva de que o cérebro faz aquilo que faz, poderíamos pensar que esse sonho era, na verdade, impossível.

Não duvido de que a natureza tem sido generosa connosco, fornecendo-nos exemplos do que pode ser feito. Pergunto a mim mesmo como iremos avançar no futuro, quando tivermos

esgotado esta enorme fonte de desafios. Um dia poderemos exceder a natureza. No entanto, por agora, a natureza excede-nos em muitas áreas, especialmente no que se refere ao comportamento inteligente e adaptativo. O desafio da construção de um cérebro ou de uma inteligência artificial está na vanguarda das novas ciências da complexidade. Mais uma vez, foi o advento do computador que abriu esta fronteira.

O computador e o cérebro, embora sejam muitas vezes comparados, são coisas muito diferentes — tão diferentes como um cavalo e uma locomotiva (o "cavalo de ferro"). A base da comparação é que tanto o computador digital como o cérebro processam informação, mas os processos utilizados por um e por outro são totalmente distintos. O cérebro caracteriza-se pela sua diversidade de capacidades, pelo facto de o seu funcionamento ser adaptativo e dependente do contexto, e pelo seu grande poder de generalização. Os computadores não podem realmente fazer nenhuma destas coisas de forma muito eficaz (se é que o podem, de todo), mas podem computar e manipular símbolos a uma velocidade de longe superior à de qualquer cérebro.

Existem outras diferenças. Ao contrário dos computadores, o cérebro é autoconstruído; evoluiu num ambiente tão rico como o próprio mundo. Não existem dois cérebros idênticos, nem sequer dois neurónios idênticos, mesmo entre dois gémeos verdadeiros. O cérebro compreende o significado das coisas, o seu modo de funcionamento; é sensível à semântica. Os computadores digitais limitam-se a obedecer às regras ou à sintaxe; é por esta razão que eles são tão bons a fazer cálculos, mas apresentam tão maus resultados a fazer aquilo em que os seres humanos são excelentes. Ao contrário do "mundo" do computador, o mundo real não está etiquetado; no entanto, o nosso cérebro consegue organizar a respetiva experiência, bem como memorizar e recordar partes dela. É evidente que o cérebro possui hierarquias de reconhecimento de padrões. No campo visual, ele organiza os textões ("átomos" percetuais) em objetos, os objetos em cenários, e estes, em conceitos abstratos. Os computadores atuais não conseguem fazer nada disto.

Se examinarmos o cérebro anatomicamente, veremos também até que ponto ele é diferente de qualquer computador

eletrónico atual. Apesar de não conhecermos pormenorizadamente a arquitetura do cérebro, sabemos qual é a escala das suas operações. O número de neurónios do nosso cérebro é da ordem de grandeza de 10^{11} ou 10^{12}. Cada um desses neurónios pode ter desde algumas até várias centenas de milhares de sinapses que efetuam ligações a outros neurónios. Regra geral, existem alguns milhares. Assim, no nosso cérebro, existem cerca de 10^{15} sinapses, e, assumindo que cada uma dessas sinapses pode tomar dois estados (inibitório e excitatório), concluímos que existem $2^{10_{15}}$ estados possíveis do cérebro. Este número enorme (mas finito) representa o número total de diferentes estados possíveis do cérebro e sugere que existe, na realidade, um limite para o número de experiências diferentes que um ser humano pode ter. Este número é de longe superior ao número de átomos que se calcula existir dentro do universo visível, sendo muitíssimo superior ao número de estados possíveis de um grande supercomputador.

O computador difere do cérebro não só no número de unidades que o constitui, mas também na velocidade a que essas unidades operam. Os microcircuitos de um computador operam numa escala de velocidades da ordem dos nanossegundos — 10^{-9} segundos —, enquanto que os neurónios típicos operam numa escala de velocidades da ordem dos milissegundos —10^{-3} segundos, isto é, são um milhão de vezes mais vagarosos. No entanto, em cerca de 100 milissegundos, 100 unidades de tempo de disparo de um neurónio, o cérebro consegue coisas notáveis e definidas no domínio da perceção, da audição e do pensamento. Como consegue, então, um cérebro vagaroso competir com um computador rápido? Consegue-o utilizando um *paralelismo maciço* — biliões de neurónios a funcionar simultaneamente em paralelo. Um computador sequencial, apesar da sua velocidade, faz as suas computações passo a passo. Mesmo a *Conection Machine* de Dan Hillis, a última palavra em computadores paralelos, com mais de 65.000 unidades de processamento que funcionam em paralelo, não se aproxima sequer do paralelismo do cérebro.

O cérebro é bastante imune às falhas. Nenhuma operação do cérebro depende de um só neurónio isolado — de facto, apesar de milhares de neurónios morrerem todos os dias, não parecemos ficar afetados por isso (talvez até o efeito seja salutar). Pelo

contrário, se um único fio de um circuito falha, todo um computador sequencial pode falhar. Sabemos que o cérebro, como consequência da sua arquitetura fortemente paralela, é altamente redundante, enquanto a maioria dos computadores não o é.

Em poucas palavras, o cérebro é uma rede, enquanto a maioria dos computadores é uma hierarquia sequencial. Os computadores têm unidades centrais de processamento; se o cérebro tem uma autoridade executiva, ela está espalhada por toda a rede. Os computadores têm programas que lhes dão as instruções a seguir. Pelo contrário, as redes não são tanto programadas como concebidas. Embora as redes possam realizar computações, não o fazem da mesma maneira que um computador sequencial, passo a passo.

Assim, o cérebro e os computadores sequenciais (ou seriais, de série) são verdadeiramente diferentes. Alguns puristas poderiam insistir em que um computador sequencial pode, em princípio, simular exatamente processos físicos, inclusive os que ocorrem no cérebro. Qualquer computação paralela também pode ser realizada em série. Se, no entanto, examinássemos as exigências de uma simulação exata, veríamos que, na prática, ela seria impossível de executar, pelo menos em tempo real. A simulação eficaz de um milissegundo de operação do cérebro — o funcionamento de cada neurónio, o movimento de cada vesícula sináptica ou de cada ião — poderia demorar um milhar de anos.

Perante as diferenças existentes entre o verdadeiro cérebro e o verdadeiro computador, a ideia de o cérebro (ou a mente), tal como um computador digital, possuir um programa interno parece um pouco bizarra. Esta ideia — de a essência da mente ser um programa que pode ser compreendido independentemente do seu suporte material — afigura-se-nos, hoje em dia, algo estranha. No entanto, era esta a hipótese central da ciência cognitiva há apenas alguns anos atrás (ver o capítulo "Esperando o messias", mais adiante). Nas suas formas mais radicais, esta hipótese não me parece ser apoiada por quaisquer provas. Todas as provas disponíveis sugerem que o conhecimento no cérebro não é representado por um programa — um conjunto de instruções de manipulação de símbolos; se o é, de todo, é mais provável que

seja representado por uma rede de ligações. Este capítulo tem por objetivo explorar esta ideia conexionista.

Em retrospetiva, podemos ver como o advento do computador deu origem a uma "indústria de modas", de novas formas de pensar a mente e de construir máquinas de aprendizagem. A história contemporânea desta indústria intelectual é instrutiva, não só por mostrar como pessoas sensatas foram induzidas em erro no passado, mas também por tentar mostrar como ainda somos induzidos em erro hoje em dia (o que é muito mais difícil). Este breve apanhado fornecerá também uma perspetiva geral que servirá para mostrar o desenvolvimento recente do conexionismo nas ciências cognitiva e computacional e a sua concretização específica no processamento paralelo distribuído.

Quando, nos anos quarenta e cinquenta, os cientistas começaram a perguntar o que é que os computadores poderiam e não poderiam fazer no campo da simulação de inteligência, já estavam, à partida, divididos em pelo menos dois campos — aqueles a que eu chamarei "computacionistas" e os "conexionistas". Os computacionistas achavam que a essência da cognição era a computação — no sentido de que pode ser realizada num computador sequencial de alta velocidade. O paradigma dessa computação era a máquina de Turing. Os computacionistas também acalentavam a noção de que a simulação da inteligência poderia ser alcançada principalmente mediante a manipulação de símbolos de acordo com um certo conjunto de regras.

Os conexionistas, pelo contrário, achavam que a chave da cognição estava na resposta de uma rede paralela neural ou eletrónica aos estímulos presentes na entrada. O paradigma era o cérebro. Os conexionistas rejeitavam a ideia de que a simulação de ações inteligentes complexas pudesse ser conseguida pela manipulação de símbolos de acordo com regras, por não acharem essa ideia muito útil. Como alternativa, achavam que a inteligência era uma propriedade do desenho de uma rede.

Apesar de ter tentado exagerar as diferenças entre os conexionistas e os computacionistas, os seus pontos de vista, na prática, nem sempre são assim tão distintos. Em primeiro lugar,

as redes neurais podem, e fazem-no mesmo, calcular como qualquer computador sequencial. Apenas o fazem de uma maneira diferente. Em segundo lugar, qualquer tipo de rede paralela pode, *em princípio*, ser simulado num computador sequencial — apenas é muito difícil fazê-lo, sendo a simulação incrivelmente lenta. Assim, de um ponto de vista matemático, *em princípio*, as duas perspetivas são equivalentes. Para quê então todo este rebulício?

É necessário saber distinguir entre estratégia e táticas. O objetivo estratégico dos conexionistas e dos computacionistas é o mesmo — simular a inteligência em toda a sua riqueza. As táticas, contudo, são bastante diferentes, como podemos ver pelos contrastes referidos acima. Quando dois grupos competem para receber fundos de investigação, as diferenças entre eles são exageradas e, apesar da estratégia comum, são agravadas as diferenças táticas.

Embora a competição intelectual entre estes dois grupos tenha sido intensa no passado, apresenta hoje tendência a diminuir. Não quero, no entanto, minimizar as diferenças que separam as duas perspetivas, pois a ideia que cada uma tem de como se atinge a mente e o comportamento inteligente é bastante diferente. O facto de, *em princípio*, as duas perspetivas serem equivalentes não traz nenhuma consolação prática.

Em 1943, Warren McCulloch e Walter H. Pitts convenceram as pessoas de que as redes neurais podiam computar; podiam exibir lógica. Embora isso hoje pareça óbvio, em 1943 foi visto como uma descoberta importante. Esta descoberta abriu o caminho a outros desafios. Uma questão se levantava: como poderiam essas redes aprender? Os primeiros indícios de resposta apareceram em 1949 no trabalho de Donald Hebb na sua *Organization of Behavior*. Era evidente que a existência de capacidades de aprendizagem numa máquina exigia algumas mudanças físicas que representassem o facto de a aprendizagem ter tido lugar. Hebb avançou com uma sugestão, baseada na biologia, que é hoje conhecida por regra de Hebb: Se duas unidades em cada extremo de uma ligação forem ativadas simultaneamente, a ligação entre elas será fortalecida. Esta regra reflete a suposição razoável de que quanto mais uma ligação é utilizada mais fácil se torna a sua

reutilização. Mas como pode uma máquina aprender, fazendo uso da regra de Hebb?

Imagine-se uma rede ligando um conjunto de unidades de processamento (neurónios), tendo ainda uma entrada e uma saída. As unidades são todas semelhantes, mas há que atender a que cada uma responde de maneira ligeiramente diferente a uma entrada e a que a força de uma unidade é limitada por uma espécie de grau de admissão. Finalmente, deixem-se as unidades competir entre si pela resposta à entrada. Isto pode ser posto em prática pela regra de Hebb — uma ligação ganha tanto mais força quanto mais vezes for usada. Quando confrontadas com um padrão na entrada, as unidades ajustarão a força das suas ligações a esse padrão, refletindo-se esse facto numa saída bem definida. Padrões de entrada semelhantes terão padrões de saída semelhantes; a máquina "aprende" assim a reconhecer padrões. A um aparelho baseado nestes princípios dá-se o nome de "máquina de aprendizagem competitiva". Embora não seja difícil pôr um destes aparelhos a aprender coisas fáceis, é muito difícil pô-lo a aprender coisas difíceis. Por exemplo, enquanto para os seres humanos é bastante fácil reconhecer duas fotografias diferentes da mesma cara, nenhuma máquina de aprendizagem consegue ainda fazer isto.

Em 1951, Marvin Minsky, que era na altura um estudante de pós-graduação em Matemática em Princeton e que viria em breve a ser uma autoridade em investigação de IA, e Dean Edmonds, um seu colega, foram para Harvard, a fim de construir o *Snark*, uma máquina de aprendizagem, com fundos que tinham sido obtidos por George Miller. Nas palavras de Minsky[1]:

> [O *Snark*] era composto por trezentos tubos e alguns motores. Necessitou de algumas embraiagens elétricas automáticas que nós próprios construímos. A memória da máquina era armazenada nas posições dos seus 40 botões de controlo, e a máquina quando estava a aprender usava as embraiagens para ajustar os seus próprios botões de controlo. Para fazer mover as embraiagens, usámos um giropiloto que sobrou de um bombardeiro B24. [...] Surpreendeu-nos que este pequeno sistema nervoso pudesse ter várias atividades a decorrer simultaneamente no seu interior. Devido ao esquema aleatório das suas ligações internas, tinha uma espécie de propriedade de imunidade às falhas. [...] Não me parece que alguma vez tivéssemos chegado a solucionar todas as falhas da

máquina, mas isso não interessava. Com uma conceção tão disparatada, tinha mesmo de funcionar, qualquer que fosse a forma como a construíssemos.

Minsky prosseguiu, escrevendo uma tese de doutoramento sobre um problema relacionado com a aprendizagem. Mais tarde, foi para o MIT trabalhar com Warren McCulloch e Oliver Selfridge, dois pioneiros da nova área que viria a ser conhecida por investigação de IA. Quando John McCarthy entrou para o corpo docente do MIT, fundou, em conjunto com Minsky, o Projeto da Inteligência Artificial. Mais tarde, em 1963, McCarthy foi para Stanford, onde deu início a um outro laboratório de IA. Em breve, mais um centro foi inaugurado no Laboratório de Investigação de Stanford, totalizando, juntamente com o laboratório de IA da Universidade de Carnegie-Mellon, instalado por Allen Newell e Herbert Simon, quatro centros de IA que trabalhavam em grande união; juntou-se uma força formidável a trabalhar no desenvolvimento da perspetiva computacional. A ideia fundamental era que a essência da mente podia ser capturada por um programa que manipulasse símbolos. Em retrospetiva, podemos ver que a força material que impulsionava esta perspetiva intelectual era o facto de os computadores digitais, cujos princípios de operação eram da mesma índole, já existirem, funcionarem e estarem prontos a ser utilizados.

Como em qualquer empreendimento novo, surgiram sucessos e falhanços. Embora a aprendizagem seja, sem dúvida, uma característica da inteligência, uma máquina não tem necessariamente de ter capacidades de aprendizagem para poder exibir um comportamento inteligente. Necessita unicamente de ter o programa certo. Foram escritos programas capazes de provar teoremas, manipular objetos, disputar jogos, como as damas, o gamão e o xadrez. Mas era também evidente que o processo seguido pelos programas para desempenhar estas tarefas — procura em série maciça — era muito diferente do que era seguido pelos seres humanos. Para além disso, as limitações introduzidas por esta abordagem tornaram-se óbvias. Em nenhum lugar isto se tornou tão óbvio como na tentativa de escrever programas capazes de traduzir línguas humanas. O problema de o significado das palavras depender do contexto tornou-se óbvio. As pessoas compreendem as coisas em termos da sua função (ver a discussão entre Stan Ulam e Gian-Carlo Rota relatada no capítulo

"Simulando a realidade") e só pelo método da força bruta os programas conseguem representar o significado, listando sequencialmente todos os possíveis significados que uma palavra pode ter e definindo assim o significado de uma palavra pela maneira como ela é usada operacionalmente. Esta abordagem tem tido um sucesso limitado, porque a definição operacional de significado é extraordinariamente limitada. O número de significados possíveis de uma palavra cresce rapidamente com o contexto — tem-se o problema da "explosão do significado".

Muitos cientistas de IA decidiram enfrentar o problema da dependência do contexto, limitando esse mesmo contexto — criando um pequeno microcosmo artificial, no qual todos os termos e operações se referiam uns aos outros. Tentaram isolar o contexto, evitando assim o problema da "explosão do significado". Estes métodos são conhecidos por "enquadramentos", "manuscritos" e "esquemas". Roger Shank, da Universidade de Yale, por exemplo, desenvolveu um manuscrito de restaurante, sendo o restaurante, presumivelmente, um contexto isolado. Vários aspetos do restaurante — a mesa, a ementa, a empregada, a conta e o serviço — podem ser representados por símbolos num programa, juntamente com as relações lógicas entre eles. O problema ocorre quando acontece alguma coisa que sai fora do contexto restrito do microcosmo do restaurante. O cliente, por exemplo, está com dores de cabeça e pede uma aspirina à empregada. O programa tem de chamar um outro manuscrito — o "manuscrito da dor de cabeça" — e "compreender" que num bom restaurante existem aspirinas à disposição dos clientes. Os símbolos que representam a "ementa" e a "empregada" são manipulados de acordo com as regras do programa. Os programas são, por isso, muito inflexíveis: passando-se qualquer coisa fora do normal, o programa fica em apuros.

A IA, independentemente dos seus sucessos e falhanços, criou uma nova forma de encarar a mente — um conjunto de regras para a manipulação de símbolos referentes a conceitos e a objetos. Uma vez, numa discussão com Marvin Minsky, perguntei-lhe por que é que ele e McCarthy tinham decidido chamar ao seu empreendimento "inteligência artificial", em vez de "ciência cognitiva", designação que me parecia muito mais apropriada. Marvin respondeu de forma característica: "Se alguma vez lhe

tivéssemos chamado qualquer outra coisa que não inteligência artificial, nunca teríamos entrado nas universidades. Agora, que já lá estamos dentro e que os filósofos e os psicólogos sabem que somos o inimigo, já é tarde demais." Minsky fez uma exposição estimulante das suas ideias no seu novo livro *The Society of Mind* (1985); trata-se de um livro eclético, mas brilhante, que qualquer pessoa interessada pela perspetiva da IA deveria examinar.

No início da década de 60 eclodiu uma polémica entre Marvin Minsky e Frank Rosenblatt (que tinham sido colegas de turma no Liceu Científico de Bronx, em Nova York), sobre a natureza das máquinas de aprendizagem. Rosenblatt inventou o *perceptrão*, um aparelho de aprendizagem simples, semelhante a um neurónio. Tinha um conjunto de entradas de uma "retina" — uma matriz espacial de unidades sensoriais — que eram depois processadas por um conjunto de unidades binárias de entrada que computavam uma função das entradas da "retina". Os resultados destas computações seguiam para uma ou mais unidades de decisão que as analisavam, modificavam as ligações das unidades de entrada e produziam em seguida uma saída de resultados apropriada. A esperança era que o perceptrão tivesse capacidades de "perceção" — pudesse aprender a reconhecer padrões. Conforme Rosenblatt expôs no seu livro *Principles of Neurodynamics* (1962): "O objetivo dos perceptrões não consiste em recriar pormenorizadamente nenhum sistema nervoso. Eles são redes simplificadas, concebidas com o fim de permitir o estudo das leis que relacionam a organização de uma rede nervosa com a organização do seu ambiente e com as ações "psicológicas' de que é capaz." Rosenblatt mostrou como é que uma dessas redes de tipo neural, em vez de ser realizada em *hardware*, podia ser simulada num computador digital sequencial e forneceu ainda um contributo à análise matemática dessas redes.

Continuou depois a desenvolver perceptrões que exibiam aquilo a que ele chamou "aprendizagem espontânea", tendo ficado muito entusiasmado com as suas possibilidades. Esse entusiasmo veio, contudo, a revelar-se sem fundamento. Os sarilhos que arranjou com a comunidade da IA, no entanto, vieram-lhe da sua pretensão exagerada de que os perceptrões eram superiores aos computadores, uma pretensão bastante estranha, visto que o

próprio Rosenblatt simulava perceptrões em computadores convencionais. Ele achava que os perceptrões, devido às suas propriedades estatísticas, eram, de alguma forma, diferentes dos computadores seriais ou sequenciais normais.

Rosenblatt também criticava fortemente a noção de IA segundo a qual os poderes intelectuais da mente podiam ser capturados por manipulações de símbolos. Em sintonia com a perspetiva conexionista, achava que a única maneira de se atingirem os poderes intelectuais da mente consistia em imitar o cérebro. Minsky, McCarthy e outros membros da comunidade da IA estavam-se nas tintas para o modo *como* o cérebro fazia: interessava-lhes somente simular *o que* o cérebro fazia.

Rosenblatt expôs exageradamente as suas teses. Durante os anos sessenta, Minsky, numa frutuosa colaboração com Seymour Papert, efetuou uma análise matemática dos perceptrões e demonstrou de forma rigorosa as suas limitações. Os mesmos problemas com que os utilizadores dos computadores sequenciais se defrontavam, como seja a explosão combinatorial de padrões, surgiam também nas redes de perceptrões, com a diferença de que surgiam como problemas de rede e não como problemas sequenciais. O seu livro *Perceptrons* (1969) colocou um fim definitivo à investigação dos perceptrões. Rosenblatt morreu num acidente náutico solitário que pode ter sido suicídio.

Parecia que os computacionistas haviam triunfado. Os trabalhos com redes do tipo neural pararam por completo. Foi, contudo, uma vitória temporária. Os resultados negativos que Minsky e Papert deduziram só se aplicavam aos perceptrões mais elementares, aos perceptrões de camada única. O trabalho de Minsky e Papert não se aplica às redes de perceptrões de camada múltipla ou às que contêm "unidades escondidas" (cujas entradas e saídas não se ligam a unidades externas). Minsky faz agora uma nova avaliação do livro que escreveu em conjunto com Papert: "Reconheço agora que o livro foi excessivamente destruidor. [...] Assim, depois de me ter irritado com Rosenblatt por ele exagerar e conduzir tantas pessoas por uma pista falsa, comecei a aperceber-me de que, em comparação com o seu resultado ..., esta máquina é tão simples que seria surpreendente que a natureza não a utilizasse nalgum sítio." Rosenblatt, apesar de ter

sido o proponente do conexionismo mais controverso, não foi o único. A investigação do conexionismo prosseguiu durante os anos setenta. Começou a emergir com toda a força quando as dificuldades da perspetiva computacional tradicional se tornaram óbvias, mesmo para os próprios protagonistas.

Em 1955, sensivelmente na mesma altura em que Rosenblatt desenvolvia os seus perceptrões, Oliver Selfridge criou o *Pandemónio*, um exemplo computacional de perceção que faz uso de mecanismos dinâmicos interativos. A análise matemática e os modelos de S. Grossberg, nos últimos anos setenta, conduziram a um maior conhecimento das propriedades das redes neurais e das máquinas de aprendizagem competitiva. J. A. Anderson e Longuet-Higgens, trabalhando independentemente, adotaram a causa dos modelos de redes neurais e insistiram na representação distribuída do conhecimento pela rede, em detrimento da representação localizada. Em 1976, David Marr e T. Poggio criaram um modelo de perceção de profundidade estereoscópica, de índole conexionista. Em 1982, J. A. Feldman e H. Ballard, usando pela primeira vez o termo "conexionista" para descrever o seu trabalho, tornaram explícitos muitos dos princípios organizacionais da nova abordagem. Douglas Hofstadter, autor do livro *Gödel*, *Escher*, *Bach* (1979), realçou a importância de um domínio subcognitivo — o ponto de vista que considera os símbolos e os conceitos como compostos verdadeiramente complexos.

Como um rio que tivesse mergulhado nas profundezas da terra no decurso dos anos sessenta, para só voltar a emergir, com toda a sua força, nos anos oitenta, a perspetiva conexionista é agora a abordagem dominante na simulação da inteligência. Tem estado a atrair alguns dos jovens mais brilhantes, sob a rubrica do processamento paralelo distribuído (PDP[2]). Os pioneiros da estratégia do PDP, David E. Rumelhart, James L. McClelland, Geoffrey E. Hinton, juntamente com mais outros treze colegas, formaram o Grupo de Investigação de PDP. Apesar de estar baseado no Instituto de Ciências Cognitivas da Universidade da Califórnia, em San Diego, o Grupo de Investigação de PDP tem origem num grande número de instituições norte-americanas. Em 1986, a editora do MIT publicou a coletânea, em dois volumes, dos artigos publicados por este grupo, *Parallel Distributed*

Processing. Esses volumes têm tido um grande impacto na orientação da investigação. (Grande parte do material discutido neste capítulo aparece nesses volumes.)

Surgiram também outros grupos de investigação — parte do padrão das novas ciências da complexidade. Já mencionámos o Centro para o Estudo de Sistemas Complexos da Universidade de Illinois e o Centro de Estudos Ilineares em Los Álamos. Muitos departamentos universitários de ciências computacionais alteraram também o foco dos seus interesses. Nalguns casos as universidades criaram novos centros, de que é um exemplo o Instituto de Ciências Ilineares da Universidade da Califórnia, San Diego. Alguns laboratórios de empresas, como os laboratórios Bell de AT&T e a IBM, integram esta vaga, juntamente com outros laboratórios mais pequenos. O Instituto de Ciências Neurológicas da Universidade Rockefeller e o Instituto Salk, dirigido por Gerard Edelman, são uma espécie de consórcio de cérebros que se dedica ao estudo do cérebro. Outros países seguem também a mesma orientação. No Japão, o Projeto da Quinta Geração, orientado por Kazuhiro Fuchi, ensaia novas arquiteturas de computadores.

O Processamento Paralelo Distribuído refere-se a um conjunto de modelos de computador. Tal como o nome indica, estes sistemas não são sequenciais, mas paralelos. O processamento de informação que neles ocorre é distribuído por toda a rede, em lugar de se localizar num dado ponto, como seja o microcircuito de um interruptor. "Estes modelos", afirmam McClelland, Rumelhart e Hinton, "supõem que o processamento de informação tem lugar através das interações de um grande número de elementos simples de processamento, aos quais se dá o nome de unidades, que enviam sinais inibitórios e excitatórios às outras unidades em volta." Os modelos que constroem são inspirados pela arquitetura do cérebro, uma vez que "as pessoas são mais espertas que os computadores atuais. […] O cérebro baseia-se numa arquitetura computacional que é mais apropriada para tratar de um aspeto central das tarefas naturais de processamento de informação em que o homem sobressai."

A fim de se dar ao leitor uma panorâmica geral do novo conexionismo, ou PDP, pensei que seria útil descrever de forma concisa alguns dos seus tópicos principais. Irei também descrever

alguns modelos concretos — redes de Hopfield e máquinas de Boltzmann, o sistema imunitário, modelos classificadores e evolutivos — e apreciar este desenvolvimento.

O tema primeiro e central do conexionismo é a conceção de redes *inspiradas pela arquitetura neural*. Embora seja impossível imitar exatamente o cérebro, uma vez que ninguém o conhece suficientemente bem para tanto, os conexionistas vão muitas vezes buscar pistas às ciências neurais para as suas conceções. Ao contrário dos computacionistas, que rejeitam o cérebro como exemplo, Rumelhart e McClelland acreditam "que, lentamente, acabará por surgir uma compreensão das relações entre os fenómenos cognitivos e as funções cerebrais. Acreditamos ainda que as teorias cognitivas podem ser uma fonte de informações muito útil para o cientista neurológico. Já não acreditamos, contudo, que o conhecimento atual das ciências neurológicas não forneça indicações úteis às pessoas que se interessam pelo funcionamento da mente. [...] Pelo contrário, descobrimos que a informação relativa ao processamento *à maneira do cérebro* tem sido muito produtiva para os nossos esforços de construção de modelos."

Por exemplo, a organização do cérebro em neurónios, ligados por axónios e dendrites, serve de modelo aos conexionistas na conceção de cérebros. Os neurónios correspondem às "unidades" e os axónios e dendrites correspondem às ligações. Há neurónios que não estão ligados nem a entradas nem a saídas. Alguns ligam-se simplesmente a outros neurónios, formando estes uma parte importante do sistema que é conhecida por "camadas invisíveis" do PDP. Os sinais no cérebro podem ser de dois tipos — inibitório e excitatório. Estas duas possibilidades também se refletem nas conceções dos conexionistas. Do mesmo modo, a aprendizagem reflete-se na alteração das ligações, tal como as propriedades químicas das ligações neurais se alteram durante o processo de aprendizagem de um organismo.

Em poucas palavras, são as ligações, a própria conceção de uma rede, as responsáveis pelo seu funcionamento, e não um programa qualquer do tipo dos que aparecem num computador convencional.

É importante, no entanto, fazer notar que, apesar de as conceções do PDP se inspirarem no cérebro, elas não são, nem podem ser, uma imitação fiel dele. Estas conceções fazem uso de dispositivos "semelhantes a neurónios", não de neurónios nem de qualquer outra coisa que se aproxime da complexidade biológica de um neurónio verdadeiro. Para muitas das redes e sistemas usados pelos investigadores do PDP não existe nenhum análogo na anatomia neurológica real. Apesar destas diferenças, os conexionistas acreditam estarem hoje muito mais próximos da construção de redes semelhantes às do cérebro do que em qualquer outra tentativa anterior.

A *ênfase no processamento paralelo*, em detrimento do processamento sequencial, está de acordo com esta perspetiva neurológica. O cérebro é uma rede fortemente paralela, pelo que possui uma grande redundância e imunidade às falhas. Além disso, os sistemas paralelos têm maior facilidade em transformar a informação de uma maneira especial que parece ser desejável para simular o comportamento inteligente.

A nova forma de representação do conhecimento constitui um outro tópico: *o conhecimento é distribuído pela totalidade da rede*; não se localiza num núcleo ferromagnético específico, nem na posição de um microinterruptor. A representação do conhecimento, de acordo com os conexionistas, é distribuída pelas forças das ligações entre as unidades. Os modelos de redes que iremos descrever de seguida vão mostrar como isto pode ser feito. Embora as redes neurais possam realizar computações tal como os computadores comuns, esta imagem é de certa forma enganadora. Não se pode bem afirmar que os computadores computam uma dada solução; seria mais correto afirmar que eles acabam por assentar nessa solução, de uma forma muito semelhante à nossa prática subjetiva de resolução de problemas.

Existe uma polémica de longa data (que ainda hoje está acesa) entre os cientistas neurológicos sobre a questão da localização ou ilocalização da memória no cérebro. A tese de que cada neurónio armazena um *n*-grama de memória está absolutamente posta de parte. No entanto, também o está a hipótese de a memória se distribuir pela totalidade do sistema nervoso. No século XIX era muito vulgar a ideia de que partes

altamente localizadas do cérebro realizavam ações específicas. O cérebro era visto como uma máquina com uma grande variedade de peças; algumas peças correspondiam à memória, outras, a funções motoras, e por aí adiante. Cientistas neurológicos como John Hughlings Jackson e Karl S. Lashley, nos Estados Unidos, e Aleksandr R. Luriia, na União Soviética, chamaram a atenção para as dificuldades levantadas por esta perspetiva da função neurológica estritamente localizada e argumentaram energicamente (e com bastante exagero, no caso de Lashley) a favor de uma função distribuída. O debate centra-se hoje em dia no *grau* de localização e no *grau* de distribuição da função neurológica.

Um dos problemas mais salientes que os sistemas distribuídos podem ter aliviado é o *problema das restrições*. Ao tratarmos de problemas de vida prática, em lugar de problemas matemáticos inventados, descobrimos que existem muitas restrições, algumas das quais formuladas implicitamente, ao tipo de soluções aceitáveis. Ao encaminhar o tráfego aéreo entre diferentes cidades em todo o mundo, é necessário restringir os aviões a navegar próximo da superfície da Terra e não pelo meio dela. Este é um exemplo de uma restrição específica. O facto de ao encomendarmos um *hamburger* esperarmos que ele seja servido numa mesa e não no chão é um exemplo de uma restrição implícita. Os computadores correntes possuem algoritmos, como é o caso do recente algoritmo de Karmarkar, que são bastante eficientes na resolução de problemas em que as várias restrições são todas explícitas. Porém os seres humanos são bons na resolução de problemas nos quais as restrições estão implícitas ou são ambíguas; de facto, notabilizam-se nisso. O problema das restrições implícitas está relacionado de perto com o problema do significado dependente do contexto — saber como funcionam as coisas do mundo, tal como um *hamburger* prestes a ser servido. Além disso, as restrições variam no tempo com o contexto do problema — o problema do contexto é dinâmico, e não estático. Uma das esperanças do PDP é a de conceber sistemas que estejam mais próximos das capacidades humanas de lidar com restrições.

A perspetiva conexionista empenha-se na *compreensão da cognição ao micronível subsimbólico*. Isto entra em contraste

direto com a perspetiva computacional da IA. Lembramos que uma das primeiras ambições de investigação da IA era a de simular o comportamento inteligente por meio da manipulação de símbolos que representassem diretamente conceitos e objetos. As palavras da linguagem, por exemplo, são símbolos que se referem a conceitos e a objetos. Se pudéssemos ao menos encontrar as regras corretas de manipulação dessas palavas, poderíamos simular um comportamento linguístico inteligente. Embora as palavras obedeçam a certas regras, não poderemos captar a totalidade do seu significado desta maneira, devido ao facto de esse significado depender do contexto, bem como ao facto de ser necessário recorrer à forma como os conceitos e os objetos funcionam, e não apenas aos conceitos e objetos em si mesmos, a fim de se usarem as palavras de forma correta. A tentativa de encontrar um programa de manipulação simbólica a um nível macroscópico que fosse capaz de simular o comportamento da linguagem não foi bem-sucedida.

É evidente que macrossímbolos como palavras e conceitos e os objetos a que eles se referem se apoiam num outro nível; os macrossímbolos são compostos, não são os "átomos" de cognição. Assim, os investigadores do PDP descem mais um degrau da escada reducionista (apesar de eles apelidarem o seu trabalho de "interacionista", em vez de "reducionista"). Paul Smolenski, ao contrário de Allen Newell e de Herbert Simon com a sua hipótese de simbologia física, apela àquilo que ele chama o *paradigma subsimbólico* "no qual se põe como hipótese que o nível mais poderoso de descrição dos sistemas cognitivos está abaixo do nível que é descrito naturalmente pela manipulação simbólica". Os macrossímbolos, segundo Smolenski, emergem de um nível subsimbólico que é, na verdade, a rede de ligações. Uma descrição da forma como os macrossímbolos emergem a partir de um nível mais elementar está maravilhosamente articulada em dois livros de Douglas Hofstadter — ambos bastante populares: *Gödel, Escher, Bach* e *Metamagical Themas* (1983).

Estes são os grandes tópicos que se identificam com o conexionismo. A seguir, iremos abordar alguns dos modelos que ao mesmo tempo inspiraram e foram inspirados por estes tópicos.

Redes de Hopfield

Em 1982, John Hopfield, do Cal Tech, escreveu um artigo muito importante, no qual apresentou um conjunto de equações que descreviam o comportamento dinâmico do modelo de uma rede neural.

A rede neural modelada por Hopfield pode ser vista como um sistema eletrónico em que a peça chave é o modelo do neurónio, um circuito elementar que consiste num condensador com uma "dendrite" de entrada e um "axónio" de saída. O axónio de cada neurónio está ligado à dendrite de um outro neurónio através de uma "sinapse", representada neste modelo por uma resistência. Podemos imaginar milhares destes neurónios, todos ligados uns aos outros por resistências, formando uma rede. Todas as ligações entre um neurónio e outro são descritas por aquilo a que chamamos a "matriz de ligações", que especifica a força da ligação sináptica entre a dendrite e o axónio de diferentes neurónios. Podemos também, além disto, supor que uma corrente elétrica é posta a circular em cada neurónio e perguntar o que irá então acontecer à rede. Hopfield demonstrou que acontece algo de notável — este modelo simples de rede pode exibir comportamentos de memória e de aprendizagem. Além disso, recordações específicas são memorizadas de forma distribuída por toda a rede, não se localizando num ponto específico. Não é muito difícil compreender como é que isso acontece.

O número de equações que descrevem a operação do modelo de Hopfield é igual ao número de "neurónios" existentes na rede. Suponhamos que existe um milhão de neurónios. Embora este sistema de um milhão de equações possa ser resolvido exatamente, Hopfield conseguiu demonstrar que introduzindo a simplificação de a matriz ser simétrica (de modo a que a força com que uma dendrite se liga a um axónio seja igual à força com que esse axónio se liga à dendrite — uma suposição que não é aceitável do ponto de vista neurológico), as soluções das equações eram pontos fixos do espaço de estado neural (o espaço de estado e os pontos fixos foram descritos no capítulo anterior: "A vida pode ser bastante ilinear"). Isto quer dizer que a corrente que percorre o circuito pode atingir vários estados estacionários

diferentes, correspondendo cada estado estacionário a um ponto fixo diferente.

De acordo com John Denker, que descreveu um modelo análogo ao de Hopfield, é possível visualizar este sistema eletrónico complicado, porque as equações de rede de Hopfield, apesar de descreverem uma rede elétrica, têm um análogo exato na mecânica clássica — um berlinde que desliza ao longo de uma superfície com montes e vales. A fim de que esta analogia mecânica seja perfeita, a massa do berlinde tem de ser nula, para que não tenha inércia, e este tem de se mover num fluído viscoso como o mel. O berlinde move-se ao longo de uma superfície, mas os montes e os vales, em vez de duas, estão definidos num milhão de dimensões, supondo-se que um milhão é o número de neurónios existentes. A posição do berlinde neste espaço com um milhão de dimensões é especificada por outras tantas coordenadas — que também especificam o estado do sistema. Assim, uma boa maneira de imaginar a dinâmica de um modelo de Hopfield é pensar num berlinde desprovido de massa a mover-se em mel num espaço com um milhão de dimensões!

Agora é fácil ver o que se passa numa rede de Hopfield, porque, se largarmos o berlinde numa dada posição do espaço multidimensional, ele vai-se deslocar até ao ponto mais baixo — um mínimo — do vale mais próximo. A inércia não o força a passar para lá do mínimo, uma vez que é nula a sua massa neste líquido viscoso; o berlinde limita-se a ir lentamente assentar no fundo. O berlinde em repouso no fundo corresponde a um ponto fixo do sistema. Este ponto fixo (podem existir muitos no espaço multidimensional) tem uma bacia de atração específica. Largando o berlinde em qualquer ponto dessa bacia, ele rolará até ao ponto fixo que lhe está associado, imobilizando-se aí.

Claramente, a característica mais importante deste sistema é a superfície multidimensional de montes e vales. Mostra-se que a forma desta superfície é controlada pela matriz de ligações que especifica a força da ligação entre os vários neurónios. Escolhendo a matriz de ligações apropriada, é possível definir os pontos fixos do sistema — os sítios onde o berlinde se irá imobilizar no espaço multidimensional. Mas que tem tudo isto a ver com a memória e com a aprendizagem?

As posições dos pontos fixos podem representar informação armazenada ou memória. Por exemplo, suponhamos que se pretendia que uma rede de Hopfield armazenasse uma lista com o nome e o número de telefone dos amigos de uma certa pessoa. Os nomes e os números podiam ser codificados de forma a que cada letra do nome e cada número fossem representados por uma distância numa das coordenadas do espaço *n*-dimensional. Escolhendo a matriz de ligações apropriada, cada nome e cada número corresponderão então às coordenadas de um mínimo ou ponto fixo. Estando num certo ponto fixo, basta ler e descodificar as suas coordenadas para se obter um nome e um número de telefone.

Suponhamos agora que pretendíamos saber o número de telefone de um amigo e não nos conseguíamos lembrar do número todo, mas apenas de alguns dígitos correspondentes ao indicativo: 039, por exemplo. Além disso, não nos recordávamos do apelido do nosso amigo, só do seu nome próprio — Francisco. Usando esta informação, podemos colocar o berlinde na posição do espaço multidimensional que corresponde àquilo que já sabemos — "Francisco" e "039" — e escolher aleatoriamente o valor das outras coordenadas. Bem, agora é altamente provável que, mesmo com esta informação parcial contida nas coordenadas iniciais do berlinde, este fique colocado algures na bacia de atração do ponto fixo correto e role até lá. No ponto fixo lemos as coordenadas correspondentes ao registo total armazenado: "Francisco Salcedo, (039)712352." Este é um exemplo de uma "memória endereçável pelo conteúdo" ou MEC (recordação associativa). Basta especificar parte do conteúdo de uma memória para se obter a sua totalidade.

Curiosamente, esta memória de nomes e números de telefone distribui-se por toda a rede. Demonstra-se que o único efeito da eliminação de parte da rede é uma deslocação das bacias de atração — o sistema é resistente. Se se tentar armazenar mais informação na rede do que aquela que pode ser coordenada de forma segura no espaço multidimensional, os pontos fixos "diluem-se" — começam-se a sobrepor. Ninguém defende que este modelo reproduz de forma realística as verdadeiras funções neurais. Apresenta, no entanto, muitas das propriedades que seriam de esperar do cérebro.

Matematicamente, o modelo de Hopfield, que serve para descrever redes neurais, é idêntico a um outro modelo, o vidro de *spin*, que surge no campo inteiramente distinto da física da matéria condensada (não é, pois, de espantar que esse tenha sido o campo em que Hopfield trabalhou antes de se interessar pelas redes neurais). Os vidros de *spin* são substâncias nas quais os *spins*[3] de moléculas vizinhos interagem de forma especial. Verifica-se que as equações que descrevem as interações dos *spins* atómicos vizinhos são idênticas às do modelo neural de Hopfield. Um dos efeitos secundários do trabalho de Hopfield foi que muitos físicos teóricos que trabalhavam em vidros de *spin* se tornaram, de um dia para o outro, grandes especialistas das propriedades das redes neurais. Alguns deles, tal como Hopfield, mudaram de campo.

A rede de Hopfield é também capaz de aprender. Essa aprendizagem é feita pondo em prática e regra de Hebb — isto é, fortalecendo as ligações que aprofundam os mínimos dos pontos fixos que se pretende reforçar. Também podem ser adicionadas novas memórias, criando novos mínimos no espaço multidimensional. É possível, caso não se tenha cuidado, criar uma obsessão ou *idée fixe*[4] — um ponto fixo com uma bacia de atração tão larga e profunda que todas as outras bacias escorrem para lá.

O modelo de Hopfield não é realista do ponto de vista neurológico. Para começar, os neurónios no cérebro não se ligam de forma simétrica. A partir do momento em que não se supõe uma matriz de ligações simétrica, perde-se a analogia matemática exata, bem como os pontos fixos. As pessoas que examinam matematicamente essas generalizações do modelo simétrico simples supõem que entram em jogo outros tipos de atratores — ciclos limites e atratores estranhos.

Apesar das suas limitações, o modelo simples fornece uma nova metáfora para a mente — uma superfície multidimensional de montes e vales. Esta superfície muda continuamente de forma, como resultado da aprendizagem efetuada a partir de novas experiências externas e processos internos, criando assim novos atratores (nunca um verdadeiro ponto fixo, pois isso quereria dizer que o pensamento tinha parado). Todas as complexidades da

mente humana podiam, segundo esta conceção, ser representadas pelas reentrâncias e saliências de uma tal superfície, uma espécie de frenologia moderna (a frenologia era a pseudociência do século XIX que correlacionava bossas na cabeça com carácter humano).

É possível desenvolver mais estas ideias sobre redes de Hopfield. Por exemplo, Alan Lapedes e Robert Farber dividiram a procura de mínimos no espaço de estado *n*-dimensional em duas partes — uma mestra e uma serva. A rede mestra tem uma matriz de ligações simétrica e, por isso, pontos fixos definidos. A rede serva tem uma matriz de ligações assimétrica, o que faz com que não mostre pontos fixos; o sistema move-se ciclicamente numa região de atração. A rede mestra, no entanto, controla a serva. Segundo os seus proponentes: "A nossa formulação envolve, assim, duas redes de forma natural — a primeira rede otimiza ou "programa" a segunda rede, executando esta então a tarefa. Referimo-nos à relação entre as duas redes como sendo uma relação mestre-servo. Este método de programação neural por otimização permite fundir (e separar de novo) duas bacias de atração, pesar certas componentes de um ponto fixo de modo a que este atraia mais intensamente ('esculpindo' as bacias) e permita, ainda, a divisão dos neurónios em subpopulações inibitórias e excitatórias." Lapedes e Farber prosseguem com a formulação de um modelo concreto que põe estas ideias em prática e mostra que a sua ação como MEC é superior à de uma rede única.

Uma relação possível e interessante destes modelos com o mundo real é dada pelo trabalho de Bill Baird e W. J. Freeman sobre o reconhecimento de padrões no bolbo olfatório do coelho. Os dados eletroencefalográficos do bolbo olfatório no cérebro do coelho indicam que quando o sistema está inativo os sinais no bolbo são oscilações aleatórias. Quando o coelho cheira alguma coisa, altera-se esta aleatoriedade, observando-se ao mesmo tempo na atividade do bolbo oscilações coerentes e um padrão espacial regular. Estes padrões podem ser correlacionados com reconhecimentos de odores específicos.

Pode-se efetuar um modelo matemático de rede neural do bolbo olfatório do coelho que se assemelha a uma rede de aprendizagem de Hopfield. Existem estados de equilíbrio, bacias

de atração e ciclos limites correspondentes aos dados fisiológicos observados. Quando o coelho cheira alguma coisa, o sistema rompe o equilíbrio, tornando-se instável. Várias instabilidades competem entre si até o sistema acabar por assentar num ciclo limite — o odor foi reconhecido. Existe, assim, uma relação notável entre modelos abstratos de redes neurais e um verdadeiro sistema de reconhecimento de padrões no cérebro de um mamífero.

Máquinas de Boltzmann

Num capítulo anterior descrevemos, invocando o processo de recristalização, o modo como o modelo de computador de um sistema dinâmico podia ser usado para resolver problemas de otimização difíceis. A ideia geral consistia em introduzir uma temperatura e deixar os elementos do sistema adquirir um movimento aleatório, que se iria "congelar" numa configuração ótima à medida que a temperatura baixasse. A recristalização simulada podia ser usada para encontrar soluções aproximadas de problemas de difícil resolução, como o problema do caixeiro-viajante. Será mais correto afirmar que com este método se acaba mais por se assentar no problema do que propriamente por o resolver.

Graças à facilidade que apresenta em otimizar problemas difíceis em que existem muitas restrições, a recristalização simulada pode ser usada para construir um algoritmo de aprendizagem das redes de Hopfield. Esta abordagem foi adotada por Geoffrey Hinton e Terrence J. Sejnowski na construção da sua máquina de Boltzmann e por Paul Smolenski num desenvolvimento semelhante chamado "teoria da harmonia". A máquina de Boltzmann é assim chamada numa justa homenagem a Ludwig Boltzmann, o físico do século XIX que pela primeira vez descreveu matematicamente a mecânica estatística dos gases e formulou a base probabilística da segunda lei da termodinâmica. A máquina de Boltzmann aprende por recristalização simulada.

Imaginemos, mais uma vez, uma rede neural. Desta vez, no entanto, algumas unidades (neurónios) vão interagir diretamente com a vizinhança da rede, que supomos possuir um padrão

definido. Estas unidades sensoriais chamar-se-ão "unidades visíveis". As outras unidades, que formam em geral um grande número, não interagem diretamente com a vizinhança da rede, estando, contudo, ligadas às unidades visíveis e também entre si. São chamadas "unidades escondidas". Pretendemos agora treinar a máquina para que ela reconheça o padrão recolhido pelas unidades visíveis. Para isso, temos de encontrar a melhor paisagem — a superfície multidimensional do espaço de estado que representa todas as ligações neurais — e a única que corresponde ao padrão de entrada dado pela vizinhança da rede. Encontrar esta superfície é, em geral, um problema muito difícil, pois é necessário ajustar a matriz de ligações, não só das unidades visíveis, mas também das unidades escondidas.

É possível resolver este difícil problema de encontrar a melhor matriz de ligações da rede, usando o método da recristalização simulada. Hinton e Sejnowski, na sua construção matemática da máquina de Boltzmann, especificaram um "algoritmo de aprendizagem". Mostraram que, deixando as unidades adquirirem propriedades estocásticas como as de um gás de moléculas, tornando para isso aleatórias as forças de ligação entre essas unidades, o sistema ao "arrefecer" encontra uma solução adequada, uma vez que a matriz de ligações está sujeita às restrições de entrada do padrão criado pela vizinhança da rede. Desta forma, a rede "aprende" a reconhecer um padrão. Encontra a melhor superfície multidimensional que corresponde a um dado padrão de entrada — foi aprendida uma representação interna desse padrão.

Este tipo de aprendizagem é característico dos modelos de PDP. McClelland, Rumelhart e Hinton comentam que "não partimos do princípio de que o objetivo da aprendizagem é a formulação de regras explícitas. Partimos antes do princípio de que o objetivo é a aquisição de forças de ligação, que permitem a uma rede agir *como se* soubesse as regras. Em segundo lugar, não atribuímos capacidades de computação poderosas ao mecanismo de aprendizagem. Em vez disso, adotamos mecanismos muito simples de modulação da força das ligações... baseados em informação disponível localmente na ligação."

Existe um virar de página interessante nestas ideias sobre a aprendizagem. Francis Crick e Graeme Mitchison especularam que os sonhos dos mamíferos (sono de REM) podem ser uma forma de "aprendizagem invertida". Normalmente, as pessoas pensam que os sonhos têm importância mental e representam aspetos simbólicos profundos da nossa vida inconsciente. Crick e Mitchison sugerem exatamente o oposto — os sonhos são a nossa maneira de nos vermos livres de informação inútil. Voltando à nossa grande superfície multidimensional que representa os estados da mente (a nossa frenologia moderna), podem existir muitos vales e montes supérfluos que baralham a nossa capacidade de reconhecer o terreno realmente importante, correspondente a memórias com significado. Os sonhos, de acordo com esta teoria da desaprendizagem, são representados pelo processo de retirar os vales e montes desnecessários, libertando o cérebro dos detritos mentais e deixando ficar somente as partes importantes da memória. A estarem certas, estas ideias de os sonhos serem um processo de desaprendizagem deverão ser verificáveis. Pergunto a mim próprio como é que esta teoria explica os sonhos que se repetem com uma certa persistência (lixo que não quer sair?), os sonhos sequenciais ou o conteúdo simbólico dos sonhos. Essa ideia, de certo modo herética, merece, contudo, ser explorada.

Os Sistemas Imunitário e Evolucionário

O nosso organismo, como o de todos os mamíferos, tem um sistema imunitário altamente evoluído, cuja finalidade consiste em identificar e destruir moléculas invasoras estranhas, ou *antigénios*. Este processo termina poucos dias após a exposição ao antigénio. Para que o possa fazer sem também atacar o nosso próprio organismo, o sistema imunitário tem de ser capaz de distinguir as nossas próprias moléculas, a fim de não as destruir. O sistema imunitário, tal como o sistema evolucionário, é, portanto, um sistema poderoso de reconhecimento de padrões, com capacidades de aprendizagem e memória. Esta característica do sistema imunitário sugeriu a certas pessoas que um modelo de computador dinâmico que simulasse o sistema imunitário poderia também aprender a ter memória. Um grupo formado por J. Doyne

Farmer, Norman Packard e Alan Perelson tem vindo a estudar este modelo, enquanto um outro grupo, formado por Geoffrey Hoffman, Maurice Benson, Geoffrey Bree e Paul Kinahan, também o tem estudado, embora partindo de uma base ligeiramente diferente.

O sistema imunitário não tem, ao que parece, diretamente nada a ver com a maneira como o cérebro aprende ou com redes neurais. O mesmo acontece com o sistema evolucionário. No entanto, como salienta Gerald Edelman, cada um destes três sistemas de reconhecimento de padrões — o cérebro, o sistema imunitário e o sistema evolucionário —, pode ser, no essencial, idêntico aos outros dois, quando visto na perspetiva de princípios abstratos; só é diferente a escala de tempo em que funcionam. O sistema evolucionário trabalha numa escala de tempo de centenas de milhares de anos, o sistema imunitário funciona à escala de dias e o cérebro opera em alguns milissegundos. Assim, se compreendermos como é que o sistema imunitário reconhece e destrói os antigénios, talvez aprendamos como é que as redes naturais reconhecem e podem destruir ideias. No fim de contas, tanto o sistema imunitário como a rede neural são compostos por biliões de células altamente especializadas que se excitam e inibem umas às outras. Ambos aprendem e têm memória. Como é que o sistema imunitário consegue isso?

Os componentes de regulação primários do sistema imunitário são os linfócitos (as células sanguíneas brancas produzidas na nossa medula óssea a um ritmo de cerca de um milhão por segundo), os anticorpos (moléculas associadas ao linfócito) e fatores célula-T específicos (cuja ação não discutiremos aqui por razões de simplicidade). Cada linfócito B tem na sua superfície cerca de uma centena de milhares de anticorpos, que podem ser imaginados como pequenas chaves moleculares que sobressaem do corpo da molécula do linfócito. Todos os anticorpos de cada linfócito particular são idênticos, diferindo, porém, ligeiramente de linfócito para linfócito. Cada anticorpo tem um ponto ativo chamado *paratope*[5]. O *paratope* pode ser visto como os dentes da "chave", de modo que cada linfócito B tem milhares de chaves, todas idênticas, a sair do seu corpo.

Cada anticorpo, bem como os antigénios que ataca, tem também um outro ponto ativo, chamado *epitope*, que funciona como uma "fechadura". Quando a chave de um anticorpo se adapta à fechadura de um antigénio, o antigénio é destruído, é assim que o sistema imunitário desempenha a sua tarefa de se livrar dos antigénios. Além disso, sempre que a chave de um anticorpo encontra uma fechadura e nela consegue entrar, desencadeia um processo de produção, no qual são fabricadas milhões de réplicas do seu linfócito B associado, cada uma das quais com o seu conjunto de chaves idênticas, feitas por encomenda para destruir aquele antigénio particular. O organismo mobiliza assim a sua defesa.

No entanto, os anticorpos, para além de serem chaves, são também fechaduras — têm *epitopes*. Podem, portanto, reconhecer e destruir outros anticorpos dentro do seu próprio sistema imunitário. Desta forma, o sistema imunitário pode atacar-se a si próprio. Se o fizesse, teríamos uma resposta autoimunitária maciça e depressa morreríamos. De facto, o sistema imunitário, em geral, não se ataca a si mesmo; a forma como se regula a si mesmo foi pela primeira vez descrita por Niels Jerne na sua "teoria da rede idiotípica". De acordo com esta teoria, um anticorpo específico é fomentado se a sua "chave" for muito usada, e suprimido, se a sua fechadura for usada. Assim, mesmo que sejam produzidos anticorpos autodestrutivos, a sua quantidade é regulada (e suprimida) por outros anticorpos. Tal como no sistema evolucionário, há uma "luta pela sobrevivência" entre os anticorpos existentes num dado ambiente.

Cada réplica de um linfócito específico estimula ou suprime, desta maneira, uma fração da produção de todas as outras réplicas. Além disso, o sistema imunitário é mantido por uma substituição diária de cerca de 5% dos linfócitos, bem como pela morte natural de igual número.

Pode-se descrever o processo estabelecendo equações matemáticas do número de elementos de cada uma das *n*-réplicas. Ver-se-ia que este sistema dinâmico pode ser descrito por meio de um espaço de estado com *n*-dimensões. Neste espaço de estado existe um grande número de atratores que correspondem a estados estáveis do sistema imunitário, que, por

sua vez, correspondem à "memória" do sistema. A aprendizagem, neste sistema, consiste em encontrar um estado mais estável, com um maior valor de sobrevivência. Assim, o modelo matemático da rede idiotípica parece ter as mesmas propriedades de reconhecimento, memória e aprendizagem que a verdadeira resposta imunitária. Mas que tem tudo isto a ver com redes neurais?

A perspetiva convencional da aprendizagem de redes neurais sustenta que a aprendizagem corresponde à modificação das forças nas ligações neurais. Na resposta imunitária, essas ligações entre neurónios corresponderiam à afinidade entre certas chaves e fechaduras, e essa afinidade não está sujeita a modificações. O que se modifica no sistema imunitário é a quantidade de réplicas, e esta pode ser análoga à quantidade de neurónios. Mas os neurónios não se aniquilam uns aos outros. Assim, em vez de se matarem neurónios, pode acontecer numa rede neural que o ritmo de disparo de grupos de neurónios seja alterado, e esse facto reflete, efetivamente, uma aprendizagem (isto vai contra a perspetiva convencional). A ideia de que grupos de neurónios competem entre si — um "darwinismo neural" — foi desenvolvida em pormenor por Gerald Edelman. Apesar de ser difícil de sustentar, a analogia entre a resposta imunitária, a evolução e a rede neural é bastante sugestiva.

A questão de saber se o sistema imunitário pode ou não dizer algo sobre a aprendizagem neural pode estar em aberto. Mas não há dúvida de que esse sistema — pelo menos o modelo concebido por Farmer, Packard e Perelson — nos diz diretamente algo sobre um outro sistema de aprendizagem e resolução de problemas — o *sistema de classificadores* de John Holland, da Universidade de Michigan. Farmer, Packard e Perelson mostraram que, apesar das diferenças superficiais, no essencial o sistema imunitário e o sistema de classificadores têm a mesma dinâmica.

O sistema de classificadores de Holland tem sido usado para tudo, desde regular o fluxo de gás num *pipeline* até jogar uma partida de póquer. De acordo com Farmer e os seus colegas: "O sistema pode ser dividido em duas partes, um conjunto de *regras* ou *classificadores* e uma *lista de mensagens*. As regras contêm informação que dá respostas possíveis ao sistema, ao passo que a

lista de mensagens restringe as entradas do ambiente exterior e fornece um ponto de encontro para as regras comunicarem e atuarem entre si. [...] As regras do classificador são constituídas por várias partes: uma ou mais *condições*, uma *ação* e uma *força*. [...] As condições permitem ao classificador 'ler' a lista de mensagens, procurando concordâncias das condições com as mensagens afixadas na lista. Quando é encontrada uma concordância, e se simultaneamente forem satisfeitos certos critérios, a regra pode afixar a sua parte de ação como uma nova mensagem na lista. Algumas regras têm um efeito especial como *efetoras*, o que quer dizer que as suas partes de ação originam saídas externas. [...]

A *força* é um número que está associado a cada regra e que serve para indicar o valor dessa regra no sistema. Esta é a base da aprendizagem. Se uma regra dá origem a respostas úteis, consegue com isso ganhar mais força; se não der, perde-a. Às regras com mais força é dada uma maior influência na determinação da resposta global do sistema."

Podemos agora ver a analogia entre o sistema de classificadores de Holland e o sistema imunitário. As regras de classificação funcionam como anticorpos; as suas condições, como "fechaduras" dos *epitopes*; as suas ações, como "chaves" dos *paratopes*; a sua força, como o número de elementos existentes de uma dada réplica, e por aí em diante. A memória e a aprendizagem nos dois sistemas é semelhante. Podemos dizer, sem exagero, que os princípios do sistema imunitário podem regular o refluxo do gás num *pipeline* e ensinar-nos a jogar póquer.

Holland vê um maior desafio no estudo de tais sistemas adaptativos: "No centro de áreas de estudo tão diversas como a psicologia cognitiva, a inteligência artificial, a economia, a imunogénese, a genética e a ecologia, encontramos sistemas ilineares que se mantêm longe do equilíbrio ao longo de toda a sua história. Em cada caso, o sistema só pode funcionar (ou continuar a existir) se realizar uma adaptação contínua a um ambiente que exibe uma inovação perpétua. [...] A tarefa da teoria é explicar a universalidade destas características, elucidando, para isso, os mecanismos que asseguram a sua

emergência e evolução. O caminho que mais esperanças abre parece ser uma combinação da modelação em computador com uma matemática que dê um maior relevo à análise combinatória (o ramo da matemática que trata de combinações) e à competição entre processos paralelos."

Já mencionei a analogia existente entre o sistema imunitário e o sistema evolucionário. A aprendizagem evolucionária é uma forma de procurar um conjunto de comportamentos, usando uma variação aleatória seguida de uma seleção. Michael Conrad e os seus colaboradores construíram modelos computacionais do processo evolucionário que exibem este tipo de aprendizagem. Dizem eles que introduzem uma "busca aleatória paralela em que um conjunto finito de sistemas é exposto a mutações aleatórias. Se existir uma função de aptidão... a busca aleatória paralela usa-a somente para parar o processo de aprendizagem quando a execução estiver dentro de um certo limite de tolerância do ideal. Em todos os outros sentidos, esta busca é cega [tal como a evolução]. Por outras palavras, a seleção de um conjunto aleatório, de acordo com certos critérios de aptidão, é um procedimento de aprendizagem algorítmica."

Todos os sistemas que considerámos até agora — a resposta imunitária, o sistema de classificadores e o sistema evolucionário (e talvez o cérebro) — reconhecem e aprendem de acordo com os mesmos princípios gerais. Gerald Edelman, da Universidade de Rockefeller, apelidou-os de "sistemas seletivos", tendo identificado os seus princípios operacionais gerais como "reportório aleatório", "princípio de seleção" e "amplificação".

"Reportório aleatório" significa que todos estes objetos diferem ligeiramente entre si, tal como as "chaves" do *paratope* em milhões de anticorpos diferentes ou como a cor das asas de uma borboleta numa população de borboletas. O "princípio seletivo" significa que um critério só seleciona alguns dos objetos "mais aptos" do reportório aleatório; todos os outros objetos são suprimidos ou eliminados. Finalmente, a "amplificação" é uma forma de aumentar o número dos objetos selecionados, tal como acontece na replicação dos linfócitos corretos ou na reprodução das borboletas mais aptas. Estes três passos constituem um reconhecimento de padrões ou um algoritmo de aprendizagem.

Podemos ver estes mesmos princípios em funcionamento na máquina de Boltzmann, que também faz uso da aleatoriedade e da seleção.

Talvez o nosso pensamento seja um exemplo de um sistema seletivo. Primeiro, muitas ideias dispersas competem pela sobrevivência. Depois, vem a seleção das ideias que trabalham melhor — uma ideia domina, seguindo-se a sua amplificação. Possivelmente, a lição a extrair deste modelo de sistema seletivo é que nunca aprenderemos nada sem que estejamos dispostos a correr um risco e a tolerar um pouco de aleatoriedade na nossa vida.

Neste breve sumário de modelos que põem em prática algumas das novas ideias sobre a memória e a aprendizagem, não mencionei muitos trabalhos interessantes sobre o modo de produção da fala, processamento de frases, modelos sociais e comportamentais, e mesmo outros modelos neurológicos. Mas procurei dar ao leitor uma ideia da natureza da memória distribuída e dos sistemas de aprendizagem, bem como das diferenças que os separam da perspetiva computacional da geração anterior de cientistas cognitivos e de computação.

Em 1987, a "Primeira Conferência Internacional de Redes Neurais" reuniu mais de duas mil pessoas. Nesta brilhante reunião foram reveladas, entre outras coisas, as enormes potencialidades comerciais destas novas ideias. As novas companhias, bem como as antigas (querendo isto dizer aquelas com mais de cinco anos), avançaram, estando prontas, ou quase prontas, para entrar no mercado com aparelhos de redes neurais. As redes neurais diferem dos computadores convencionais e de programas de computador como os sistemas periciais da IA, que se limitam a fazer precisamente aquilo para que foram programados. As redes neurais *aprendem*. Essa característica irá, ela própria, criar uma nova indústria. Como dizia Esther Dyson na sua circular *Release 1.0*: "Sim, as redes neurais são autoprogramadas; como a publicidade certamente lembrará, podem "aprender por elas próprias". Sim, os resultados são superiores aos que se poderiam esperar de uma "mera" programação, ou de regras explícitas, mas isso não quer dizer que não haja trabalho a realizar. Mesmo depois de alguém ter construído o sistema de aprendizagem — a

rede neural em si mesma — o utilizador (ou o revendedor) tem de desenvolver os 'materiais de aprendizagem', configurar os dados de entrada e de saída e ligar o sistema ao seu ambiente — outros computadores, dispositivos de entrada, ecrãs de computador. Estes problemas, que poderão parecer triviais — gerir o treino, o processamento prévio dos dados e a integração dos sistemas —, representarão um desafio para os utilizadores e uma oportunidade para os empresários, à medida que os engenheiros produzem *software* de redes neurais mais barato e mais poderoso, bem como *hardware* capaz de o correr."

A atitude da nova geração de cientistas que trabalha com ideias conexionistas e PDP é muito diferente da de alguns investigadores de IA há mais de uma década. Os cientistas deixaram de apregoar os seus sucessos aos sete ventos (exceto aqueles que têm interesses financeiros em alguma companhia). Não falam em resolver já amanhã o problema da mente, nem em encontrar uma solução para o problema da cognição. Já não falam das suas máquinas como se elas "pensassem" ou se tivessem capacidades humanas. As pessoas que trabalham nesta área sentem-se, na sua maioria, humildes perante o enorme desafio que enfrentam. Também se sentem entusiasmadas por esse desafio. Mas os progressos serão lentos.

Não é muito difícil encontrar argumentos que levem a prever um falhanço nesta nova abordagem do problema da cognição. As próprias pessoas que trabalham neste campo estão bem cientes dessas críticas.

Uma das maiores críticas que se fazem consiste em que os modelos dos conexionistas não são realistas do ponto de vista neural. A diferença entre um neurónio verdadeiro e o neurónio de um modelo conexionista é semelhante à diferença entre uma mão humana e um alicate. Os neurónios disparam uma série de impulsos graduais, tão depressa são inibitórios como excitatórios, e na rede neural o paralelismo é verdadeiramente maciço. Os modelos dos neurónios, pelo contrário, só conhecem duas respostas (ligado ou desligado), são muitas vezes simplesmente excitatórios, e a rede é pouco paralela. Talvez os modelos conexionistas tenham pouco ou nada a ver com o cérebro e sejam enganadoras as suas pretensões de serem inspirados pelo

funcionamento do cérebro. O facto de o cérebro fazer todas as coisas maravilhosas que faz não constitui nenhuma garantia de que os modelos conexionistas o vão imitar.

Mesmo que os modelos imitem a estrutura do cérebro — construindo aviões em vez de balões, por assim dizer —, como poderemos saber se a rede neural é realmente a chave para o funcionamento do cérebro?

Talvez a rede neural seja uma parte visível, mas unicamente auxiliar, do cérebro e a chave da sua operação esteja numa bioquímica complexa e na ação de neurotransmissores. Talvez a rede neural sirva simplesmente como função de regulação daquilo que é, essencialmente, um sistema químico. Este ponto de vista é uma espécie de heresia, mas o simples facto de poder ser mantido cientificamente é um indicador da nossa ignorância sobre o funcionamento geral do cérebro. Confrontados com uma tal ignorância, por que nos devemos deixar inspirar pelo pouco que se sabe? As ciências neurológicas ao inspirarem os conexionistas podem ser um exemplo do roto a ajudar o nu.

Os conexionistas orgulham-se muito do facto de terem abandonado a ideia computacionista de que a essência da cognição consiste na manipulação de símbolos que se referem diretamente a conceitos e coisas. Na verdade, estão empenhados em compreender a cognição ao micronível subsimbólico. Mas estarão eles, de facto, a fazê-lo? Se se examinar o seu trabalho em pormenor, descobre-se, por exemplo, que as palavras referentes a conceitos e coisas são representadas num programa por etiquetas — tal como os computacionistas faziam, com a única diferença de que os conexionistas o fazem numa rede paralela e não num programa sequencial. Está longe de ser este o "micronível subsimbólico" que se esforçam por atingir. De facto, ninguém sabe como se representa um conceito ou uma coisa no micronível subsimbólico, nem sequer qual é o significado exato dessa expressão. Se se pudesse realizar esta ambição, estar-se-ia muito perto de encontrar uma solução para o problema da cognição. E ninguém está prestes a consegui-lo.

Uma outra crítica que se faz facilmente ao projeto conexionista é que se trata de uma mistura de ideias parciais, não

parecendo existir quaisquer grandes princípios orientadores. Como resultado, muitos problemas não são colocados de forma precisa, não se sabendo muito bem para onde é que o projeto caminha. Talvez, no entanto, o projeto ainda esteja pouco maduro e seja cedo demais para identificar os princípios básicos desta nova ciência.

É muito mais fácil criticar este trabalho do que enfrentar o desafio que ele representa. Até agora, os conexionistas criaram modelos interessantes. Novos modelos estão a ser explorados matematicamente. Em última análise, gostaríamos de ver uma máquina, baseada nestas ideias, que conseguisse reconhecer assinaturas, a fala de vários interlocutores e, por fim, caras humanas. Mesmo com o projeto conexionista, por mais entusiasmante que seja, continuamos a precisar de impor a nossa exigência severa — construir uma máquina ou escrever um programa que realmente realize essas tarefas. Os proponentes do PDP estão cientes desta exigência.

Como Rumelhart e McClelland o disseram, de forma sucinta: "a verdadeira prova faz-se no pudim".

Veremos qual é o seu sabor.

---

[1] Relatado por Jeremy Bernstein no seu perfil publicado na *New Yorker* (vol. 57, 1981, pp. 50-126). (N. do A.)
A *New Yorker* é uma revista cultural muito popular nos Estados Unidos (*N. do T.*)

[2] Sigla inglesa de *parallel distributed processing* (processamento paralelo distribuído). (*N. do T.*)

[3] *Spin* — palavra inglesa que significa rotação e que é usada em mecânica quântica para designar uma propriedade das partículas que não tem análogo exato em física clássica, mas que é semelhante a uma rotação. (*N. do T.*)

[4] "Ideia fixa". Em francês no original. (*N. do T.*)

[5] Em inglês: semelhante a cação ou dentudo, peixe grande do género Esqualo (*Squalus*). (*N. do R.*)

CAPÍTULO 7

– A "MASSA" RÁPIDA TORNA-SE MAIS RÁPIDA –

> É opinião geralmente aceite que os mercados estão sempre certos — isto é, os preços do mercado entram em conta com desenvolvimentos futuros, mesmo quando não se sabe muito bem quais serão esses desenvolvimentos. Eu parto da opinião contrária. Estou em crer que os preços do mercado estão sempre errados, no sentido de que apresentam uma perspetiva parcial do futuro.
>
> *GEORGE SOROS, 1987*

Durante a Segunda Grande Guerra, Albert Einstein, incitado por Leo Szilard, escreveu a Franklin Roosevelt uma carta que se tornou famosa. Esta carta, na qual Einstein expressava a opinião de que a cisão nuclear podia ser utilizada para produzir uma arma e que a Alemanha poderia estar a envidar esforços nesse sentido, desencadeou uma cadeia de acontecimentos que levaram à criação do projeto Manhattan e à primeira e única utilização de armas atómicas pelos Estados Unidos, contra o Japão. O tema abstrato da física nuclear passou para a vanguarda do pensamento humano, influenciando os destinos da política externa e a ordem internacional entre as nações. Alguns cientistas que possuíam os conhecimentos necessários para construir as armas passaram do mundo obscuro da investigação académica para a ribalta da opinião pública. Aquilo que os cientistas pensavam ser ou não possível ganhou um outro significado. Este cenário — a transformação de conhecimentos abstratos em artefatos práticos — repete-se, hoje em dia, numa área inteiramente diferente.

A indústria bancária, desde há muito tempo afastada de grandes inovações tecnológicas, foi atingida por uma revolução que irá alterar para sempre a sua forma de atuar. Esta revolução é uma consequência de progressos ocorridos nas telecomunicações, no processamento de dados e, como é evidente, nos computadores. Uma nova classe de pessoas que domina esta nova tecnologia ganhou uma grande proeminência e,

em muitos casos, foi ocupar posições de liderança em grandes instituições financeiras.

A sobrevivência institucional num ambiente bancário altamente competitivo pode depender de progressos na modelação em computador de mercados e da economia, no *software* e nos algoritmos, bem como nas telecomunicações que fornecem os dados de entrada. Os bancos, que sempre estiveram interessados em contratar especialistas de processamento de dados, contratam agora cientistas de computadores, engenheiros e matemáticos que os ajudem a desenvolver novos equipamentos e algoritmos. Até agora, deixavam as suas necessidades internas a cargo dos seus fornecedores de computadores e de *software*. No entanto, depressa se aperceberam de que, para manterem uma vantagem competitiva, tinham de tomar eles próprios a responsabilidade da investigação e do desenvolvimento. As grandes instituições de serviços financeiros já têm os seus próprios corpos de investigadores que examinam a melhor maneira de aumentar a eficiência dos seus processamentos de dados, utilizando novos tipos de *hardware* e *software*. A matemática abstrata, por vezes desenvolvida com o fim de compreender sistemas seletivos e adaptativos, é agora utilizada para apoiar decisões financeiras. As ciências da complexidade estão a ter impacto nos mundos financeiros e dos negócios. E esse impacto ainda agora começou.

Os verdadeiros motores da economia mundial de hoje são os grandes bancos internacionais, ligados eletronicamente entre si por uma rede que, vista no seu conjunto, representa o primeiro computador global do mundo. Em 1986, mais de 64 triliões de dólares foram transacionados através desta rede, tendo esse volume vindo a crescer. (O outro computador global, o segundo maior, é o sistema de comunicações militares dos EUA.) A rede bancária de computadores não é hierárquica, mas paralela, apesar de representar alguns componentes hierárquicos. Dentro de cada instituição financeira, o sistema é hierárquico, mas globalmente não existe nenhum supervisor, nem nenhuma autoridade executiva central. Neste sentido, é um "mercado livre". Alguns cientistas de computadores tentam neste momento desenvolver modelos computacionais do primeiro computador global do mundo, a fim de o compreenderem melhor.

Se olharmos para trás, podemos reconhecer quais os acontecimentos que levaram ao surgimento deste computador global. Umas poucas décadas atrás, a colocação em órbita dos primeiros satélites criou uma curiosidade tecnológica, tornando-se um símbolo da realização nacional. Algumas pessoas queixaram-se do alto custo dos satélites. No entanto, os satélites vieram abrir as portas a novas comunicações transcontinentais e intercontinentais fiáveis. As instituições financeiras depressa tiraram partido dessas comunicações. Os bancos de Londres podiam conceder crédito aos bancos de Nova York durante o período em que o Sol já se tinha posto em Inglaterra mas os Nova-Yorkinos ainda estavam a trabalhar. Da mesma maneira, os bancos de Nova York podiam dar crédito aos bancos da costa oeste, que depois o transmitiam para a Ásia. O dinheiro trabalhava enquanto as pessoas dormiam. O sistema de satélites permitiu que um "bónus" de crédito rodasse com a zona de dia em torno do planeta. Estima-se que os satélites aumentaram em cerca de 5% as reservas mundiais de crédito — centenas de biliões de dólares —, um valor muito superior ao custo total dos sistemas de satélites.

Quando, no final desta década, as fibras ópticas forem colocadas ao longo do Atlântico e do Pacífico, muitas das aplicações dos satélites tornar-se-ão obsoletas. A maior largura de banda proporcionada pelos sistemas fotónicos irá permitir aos supercomputadores em diferentes continentes falar uns com os outros. É possível que os computadores europeus e asiáticos venham a comprar e a vender nos mercados norte-americanos (e vice-versa). Desde já, a computação e as telecomunicações internacionais destruíram o mercado da arbitragem de câmbios em que se ganhava dinheiro a partir de pequenas diferenças entre as taxas cambiais. A única vantagem em ter um computador local perto do mercado reside em cerca de uma centena de milissegundos que a luz demora a viajar entre continentes. Mas essa é uma vantagem significativa se se possuir um algoritmo rápido. Falei recentemente com um matemático que acabara de arranjar emprego numa empresa de investimentos de Nova York onde se desenvolviam algoritmos para determinar opções de compra e venda. Para quê? Para que esta instituição pudesse avançar com as suas ordens de compra e venda um milissegundo antes das suas competidoras.

É sabido que uma das formas de comunicação mais rápidas é uma boa anedota. Os homens de negócios saem muitas vezes dos seus escritórios em Londres com uma anedota nova, voam para Nova York no *Concorde* e descobrem nessa noite, num *cocktail*, que já toda a gente conhece a anedota. Como é isto possível? Os bancos e as empresas de investimento mantêm linhas telefónicas permanentemente em contato com todo o mundo, para o caso de haver necessidade de transmitir uma notícia súbita. Os operadores que se ocupam dessas linhas não têm, muitas vezes, nenhuma notícia comercial para transmitir, e então divertem-se a trocar anedotas entre si. É assim que as anedotas circulam tão depressa à volta do globo. Ainda são uma das formas de comunicação humana mais rápidas.

A introdução da computação de alta velocidade, do processamento de dados e de *software* inovador transformou a indústria de serviços financeiros. Os dirigentes dessa indústria, embora bem atentos ao impacto da tecnologia, nem sempre tiveram a mesma atenção. Uma década atrás, a indústria de investimentos foi atingida por uma revolução tecnológica, sob a forma de um novo sistema eletrónico de permuta de ações. Apesar de sofrer de uma avalanche de papelada (havia quem lhe chamasse o "holocausto da papelada"), a Bolsa de Valores de Nova York adiou a instalação desta tecnologia inovadora. Estavam em demasia ocupados a ganhar dinheiro e receavam perder clientes durante o período de renovação. As bolsas de Londres e Tóquio, que não estavam tão preocupadas com os rendimentos a curto prazo, tornaram-se mercados eletrónicos. Graças à sua compreensão do destino que a indústria tomava, ficaram com uma maior parcela da ação. Mesmo hoje, um dos maiores problemas que se colocam é que, com os avanços da tecnologia, os sistemas depressa se tornam obsoletos e incompetitivos. Como se renova uma rede por completo sem a desligar primeiro?

São necessários novos talentos para gerir a moderna indústria de serviços financeiros — não só programadores de computadores, mas também matemáticos de alto nível, capazes de conceber algoritmos mais rápidos. Em Setembro de 1986 houve um deslize do mercado, o primeiro "assistido por computador". Uma das razões desta falha foi que os programas de compra e venda de muitas empresas de investimentos e

corretagem diferiam entre si de forma a criar uma instabilidade no sistema. Embora o primeiro passo tomado pelos programas de compra e venda da maioria das empresas fosse o mesmo, os segundo, terceiro e quarto passos já diferiam. Isto pode produzir um ciclo de realimentação positivo; quando se torna instável, o mercado pode sofrer uma queda livre antes que os operadores humanos tenham quaisquer hipóteses de intervir, acarretando custos financeiros a muita gente. Quando perguntei a muitos analistas da bolsa por "instabilidades" ou "singularidades" no comportamento do mercado, eles nunca tinham ouvido falar de tal coisa. Muitos deles não têm nenhum treino de matemática moderna, nem sequer da mais rudimentar.

Quais são as hipóteses de virmos algum dia a compreender os sistemas económicos? Embora se trate de exemplos claros de sistemas extremamente complexos, existem muitos dados quantitativos que nos permitem verificar as nossa ideias. Os economistas profissionais que se preocupam com os assuntos de ordem prática não são muito bem sucedidos na previsão do futuro da economia. São espertos, mas pura e simplesmente não têm as ferramentas intelectuais certas nas suas mãos.

Quando estava a aprender, na escola, as curvas da oferta e da procura, perguntei ao meu professor: "Donde é que vêm essas curvas? Foram inventadas, baseadas em dados, ou representam uma teoria?" A melhor resposta que obtive, pelo menos aquela de que me lembro, foi que representavam a teoria do equilíbrio económico. O mercado, afirmaram-me, estabelece um equilíbrio, e o ponto em que as curvas da oferta e da procura se intercetam determina o preço. Esta afirmação, por muito razoável que pareça, é um disparate chapado.

O sistema económico, a ser alguma coisa, é um sistema afastado do equilíbrio, tal como o sistema evolucionário e a resposta imunológica. Está continuamente a efetuar ajustamentos para se manter a si mesmo longe do equilíbrio (embora possa existir equilíbrio local). Não se sabe quase nada sobre sistemas dinâmicos longe do equilíbrio. Provavelmente, os vários tipos de atratores — pontos fixos, ciclos limites e atratores estranhos — desempenham um papel na compreensão de como funciona um sistema complexo como a economia. Alguns economistas

matemáticos, como Kenneth Arrow, de Stanford, expressaram um entusiasmo cauteloso acerca da aplicação das novas ideias sobre caos à dinâmica económica. Os matemáticos, e não só, esforçam-se agora por aplicar conhecimentos colhidos nas ciências da complexidade ao problema, aparentemente intratável, de compreender a economia mundial. Eu, no entanto, vaticino que, *ainda que* este problema possa ser resolvido (o que não é muito provável num futuro próximo), não será possível usar esse conhecimento para ganhar dinheiro nos mercados financeiros. Só é possível ganhar dinheiro quando existe um risco real, baseado numa verdadeira incerteza. Sem incerteza não existe risco.

Como o gestor George Soros salientou no seu livro *The Alchemy of Finance* (1987), as propensões humanas influenciam profundamente os mercados, de uma forma reflexiva. Uma vez que essas propensões são influenciadas pelos desenvolvimentos políticos e pelos fatores culturais, é provavelmente impossível fazer um modelo seguro da economia internacional. Tal como o tempo meteorológico, a economia internacional é um sistema que não pode ser simulado. No entanto, as previsões de curta prazo e a visualização das tendências globais de longo prazo podem tornar-se possíveis utilizando modelos matemáticos.

Lembro-me de que nos anos sessenta alguns intelectuais falavam da "Era da informação" e da "aldeia global". Bem, estas já chegaram, mas não exatamente na forma que esses intelectuais antecipavam. Felix Rohatyn, um banqueiro investidor de Nova York e um cidadão com espírito público, comentou recentemente que vivemos na "cultura do dinheiro", um desenvolvimento trazido pelas novas tecnologias de processamento de dados. Com isto queria dizer que a forma dominante de trocas comerciais entre as pessoas não eram os bens e os serviços, mas sim o dinheiro. O dinheiro é, evidentemente, um tipo de informação que se pode mover à velocidade da luz. As pessoas podem facilmente investi-lo, transferi-lo e emprestá-lo. Muitas pessoas fazem-no neste momento, acumulando grandes fortunas.

Umas poucas décadas atrás, pegando numa revista de negócios americana, encontrar-se-iam artigos sobre novos produtos, indústrias que produziam bens e serviços e as pessoas que eram responsáveis por tudo isso. Hoje as grandes notícias são

sobre *acordos*, transações financeiras, compra, venda, conglomeração, integração, despojamento e destruição de companhias. Jovens inteligentes que querem enriquecer são atraídos por todos estes negócios e querem uma fatia do bolo. Não se produz nada, mas, aparentemente, é criada riqueza. Este copo transbordou com o colapso do mercado a 19 de outubro de 1987.

Seria até possível imaginar uma sátira inspirada pelo tema da "cultura do dinheiro". As pessoas investem na indústria de serviços financeiros, que, por seu turno, serve o seu investimento. Nada se troca a não ser informação; ninguém produz nada; o dinheiro, no entanto, está sempre a mudar de mão. O sistema faz lembrar uma pessoa que puxasse pelos atacadores dos próprios sapatos e começasse assim a subir no ar; o sistema ascende desta forma — só existe dinheiro que é trocado e produz mais dinheiro com base na confiança humana de que essa troca continuará. A imagem com que se fica é a de uma "cadeia de cartas" imensa, com promessas de pagamento para todos, mas à custa de ninguém. Como é evidente, não poderá funcionar eternamente. A certo ponto, a confiança humana é abalada, e muita gente fica magoada.

A verdadeira cultura do dinheiro, como é evidente, investe em produtos e em serviços. O que mudou foi a velocidade com que isso é feito. A velocidade, apesar de ser um parâmetro quantitativo, pode, quando aumentada drasticamente, conduzir a alterações qualitativas — as alterações que observamos na economia global, e em particular nas grandes multinacionais, que desempenham um papel bastante importante na sua manutenção. Em muitas dessas grandes empresas ocorreu uma mudança, tanto nos corpos dirigentes como na tónica da empresa. As companhias costumavam ser geridas por empresários tradicionais que compreendiam o produto e a maneira como ele era produzido e vendido, quer se tratasse de automóveis, quer de petróleo. Mas, com a ascensão da cultura do dinheiro, muitas companhias, especialmente as petrolíferas, descobriram que podiam ganhar mais dinheiro investindo e negociando o seu capital excedentário do que fazendo aquilo que a companhia tradicionalmente fazia — procurar petróleo. Os engenheiros e os vendedores foram substituídos por analistas do mercado monetário internacional e

por contabilistas. Estes recém-chegados começaram a gerir as companhias. Como é evidente, uma tal situação leva-nos a perguntar quem é que, de facto, está a tomar conta da loja.

Em 1986 reuni-me com um grupo de banqueiros e homens de negócios. Disse-lhes que sabia de um "ninho de computadores" que operava no Luxemburgo ou na Suíça e que usava um novo "computador com um paralelismo maciço", construído por uns génios informáticos em colaboração com um grupo brilhante de jovens homens de negócios, cujo objetivo expresso consistia em reconhecer padrões no mercado de bens de consumo. Tinha uma capacidade de aprendizagem semelhante à de uma máquina de Boltzmann. Os negociantes estavam a tirar entre dois e três milhões de dólares por dia e a semear a destruição no mercado europeu de bens de consumo.

A minha audiência ficou petrificada. "Quem são? Que é que fazem?", perguntaram, debruçando-se nas cadeiras. Disse-lhes que a história era falsa, mas que se poderia facilmente tornar verdadeira num futuro próximo. Este tipo de "ataque tecnológico" proveniente de um adversário, tão receado pelos estrategos militares, também pode ocorrer no mundo financeiro.

A tomada de decisões financeiras não será apenas influenciada pelos progressos nos sistemas de reconhecimento de padrões; também o advento de modelos minuciosos da economia global irá ter algum impacto. A economia mundial gera uma quantidade de dados tão grande que nem um ser humano nem uma equipa os podem digerir. Já os computadores, no entanto, podem usar esses dados em modelos pormenorizados de várias economias nacionais e internacionais e analisá-los. Modelos de longo alcance realizados em supercomputadores tornar-se-ão um valioso triunfo nas mãos dos seus criadores — serão bolas de cristal capazes de efetuar previsões económicas realistas. Pode-se antever a caracterização dos sistemas económicos com base em diferentes ciclos limites e atratores estranhos. A economia internacional é um sistema ilinear; pode ser entendida como tal.

Existem perigos na operação do sistema global de computadores. Uma grande instabilidade poderia ter por consequência uma catástrofe económica internacional pior do que

a de 1987. Muitas pessoas preveem que isso pode vir a acontecer — que os mercados não irão estabilizar depois do colapso de Outubro de 1987. Uma vez que ninguém nem nenhum grupo compreende o que acontece na economia mundial e que também não existe nenhum governo executivo central, todo o sistema pode acabar por ir ter à bacia de atração de um ponto fixo que apresente uma atividade económica muito baixa. Os governos nacionais teriam de intervir para fazer o sistema arrancar de novo, e novas instituições internacionais teriam de ser criadas, com prejuízo de alguma soberania nacional, a fim de impedir a reocorrência do colapso.

Apesar de todas as vantagens da tecnologia dos computadores, é impossível rejeitar o juízo humano na tomada de decisões. No entanto, grande parte das instalações destes novos equipamentos informáticos foi mesmo concebida com esse fim. Acho isso preocupante. As decisões elementares, uma grande quantidade delas, podem ser tomadas, e são mesmo, por computadores. Talvez no futuro os computadores tomem também decisões económicas mais complexas. Mas as pessoas, com o seu desejo inato de regular os seus próprios destinos, revelar-se-ão inconscientes se passarem para os computadores esse tipo de ponderações de alto nível.

A difusão das responsabilidades encorajada pelos computadores é um outro grande problema. Uma vez, enquanto esperava que o pequeno-almoço fosse servido num hotel moderno e luxuoso, e depois de uma espera considerável, perguntei ao empregado qual era a razão do atraso — onde é que estava o meu pequeno-almoço? "O senhor desculpe, mas o computador foi-se a baixo.", foi a resposta que recebi. Contei aos meus colegas de mesa que no futuro iríamos ouvir frequentemente essa desculpa. O atraso no meu pequeno-almoço não era culpa do empregado, nem do cozinheiro. Nem mesmo ao gerente se podiam atribuir quaisquer responsabilidades. Só o fabricante, o programador ou o instalador do computador, já todos desaparecidos há muito, podiam ser responsabilizados pelo facto de o meu pequeno-almoço estar atrasado. A difusão das responsabilidades serve certos interesses, sendo importante, em cada caso, identificá-los cuidadosamente. Metemo-nos num grande sarilho se não soubermos identificar um agente humano com este tipo de

problemas e chamá-lo imediatamente à responsabilidade. Mas existem ainda outros perigos.

Alguns profetas intelectuais programaram o fim da Era do conhecimento e o princípio da Era da informação. A informação tende a afastar o conhecimento. A informação não passa de símbolos e números, enquanto o conhecimento tem valor semântico. O que nós queremos é conhecimento, mas o que muitas vezes obtemos é informação. É um sinal dos tempos que muitas pessoas não saibam ver a diferença entre conhecimento e informação, para não falar já em discernimento, que até o conhecimento tende, por vezes, a afastar.

Examinei apenas um dos impactos que as novas ciências da complexidade irão ter no mundo — o impacto na indústria de serviços financeiros. Existirão outros impactos — na educação, na medicina e na profissão jurídica. O computador, que representa um novo modo de produção, ascendeu à existência criando novas classes de pessoas, novos empregos e novas formas de riqueza. O que acho particularmente interessante neste desenvolvimento é que a matemática abstrata, os algoritmos sofisticados e a tecnologia de vanguarda irão determinar o futuro de indústrias e de profissões desde há muito imunes a essas mudanças.

Um dia, mais próximo do que algumas pessoas pensam, as ciências de complexidade terão um impacto no sistema jurídico, não só no processamento de dados, mas também na própria tomada de decisões. Poderá um sistema pericial substituir um advogado, ou pelo menos assisti-lo? Provavelmente, muito trabalho jurídico de rotina pode ser realizado por computadores, e os advogados descobrirão que podem servir melhor os seus clientes se os usarem. A utilização de memórias endereçáveis pelo conteúdo, por exemplo, pode ser um grande auxílio para quem esteja a trabalhar num certo caso. Neste momento, o impacto das novas ciências da complexidade na profissão jurídica ainda é mínimo; mas não o será por muito mais tempo.

Um novo corpo do conhecimento está a ser criado, tendo a nossa geração o privilégio de assistir a essa criação. Como todas as grandes mudanças da história da humanidade, é uma fonte de desafios, oportunidades, esperanças e perigos. Estamos no limiar

do domínio humano da complexidade — um ponto da atualidade na ciência que nos pode mostrar, pela primeira vez, qual é a nossa verdadeira natureza.

A informação, quer esteja incorporada em organismos, na mente ou na cultura, é parte de um sistema de seleção mais amplo que determina, por meio de competição e cooperação bem-sucedidas, a informação que sobrevive. A informação pode ser codificada em genes, redes nervosas ou instituições, mas o sistema seletivo que promove a sobrevivência permanece o mesmo. Esta perspetiva não tem nada de original. No entanto, é para mim ainda um mistério a razão por que os filósofos, os psicólogos e os cientistas sociais e culturais raramente abordaram a importância da noção de Darwin-Wallace de seleção natural do seu próprio trabalho (esta situação tem vindo a alterar-se recentemente). Um sistema seletivo é um sistema de produção e reconhecimento de padrões, sejam eles o padrão da vida na Terra, a ordem simbólica da mente ou o padrão da cultura. Um sistema seletivo gere a complexidade.

Na parte seguinte deste livro irei transportar o leitor por uma floresta de várias questões filosóficas que se apoiam na ciência contemporânea — a natureza da realidade material, o problema da cognição, o problema corpo-mente, o carácter da investigação científica, a natureza da matemática e o papel dos instrumentos na condução de uma investigação. Estas questões constituem, em parte, o enquadramento do nosso pensamento sobre a empresa científica, uma empresa que abre agora uma nova fronteira — a fronteira da complexidade, explorando a própria ordem da mente, da vida e da natureza.

SEGUNDA PARTE
– FILOSOFIA E ANTIFILOSOFIA –

CAPÍTULO 8
– O CÓDIGO DE CONSTRUÇÃO DO DEMIURGO –

> Ali adiante estava um mundo gigantesco, que existe independentemente de nós, seres humanos, e que enfrentamos como uma grande charada eterna, acessível, pelo menos em parte, ao nosso exame e ao nosso pensamento. A contemplação deste mundo acena-nos como uma libertação. Depressa me apercebi de que muitos homens que eu aprendera a estimar e admirar tinham encontrado uma liberdade interior e segurança ocupando-se dele devotadamente.
>
> *ALBERT EINSTEIN*
>
> *Notas Autobiográficas*

Na passada década de 70 encontrei, nas falésias da costa sul de Big Sur, um grupo de pessoas que previa a chegada iminente de seres extraterrestres. Os visitantes, vindos do outro lado da galáxia, estavam escondidos numa nave espacial cuidadosamente oculta atrás da Lua, num sítio onde não podia ser detetada. Já tinham enviado mensageiros à Terra, seres humanos artificiais, montados "molécula a molécula", para confundir os cientistas. Queria conhecer um desses enviados e pôr-lhe algumas questões sobre física moderna que me intrigavam; mas ninguém me sabia dizer quem eram.

Quando perguntaram ao físico nuclear Enrico Fermi se acreditava na existência de extraterrestres, ele respondeu que os extraterrestres já cá estavam; chamavam-se húngaros. Fermi, tal como muitos dos seus colegas, estava impressionado pelo facto de um país tão pequeno como a Hungria ter produzido tantos cientistas brilhantes — o matemático John von Neumann, os físicos Leo Szilard, Eugene Wigner e Edward Teller — e achava que talvez uma outra explicação extraterrestre fosse necessária

para justificar este excesso intelectual. Sempre que penso no espaço escondido atrás da Lua, não posso deixar de imaginar uma infinidade de húngaros, na sua nave espacial gigante, prontos para aqui chegarem e nos confundirem com o seu génio.

Gosto da ideia de um universo repleto de vida benigna; faz com que aqueles vastos espaços vazios entre as estrelas pareçam mais amigáveis. Conforta-me saber que não há nenhuma outra maneira de provar conclusivamente a inexistência de vida nas proximidades de outras estrelas a não ser indo lá verificar diretamente, o que é pouco provável vir a acontecer num futuro próximo. O máximo que os cientistas podem fazer hoje é estimar as probabilidades de existência de vida extraterrestre. Existe uma forte discordância em torno dessas probabilidades; há mesmo discordância em torno do significado da palavra "vida".

A minha opinião (e não passa de uma opinião) é que, mesmo que a minha conjetura esteja correta e exista bastante vida no resto da galáxia, é bastante improvável que essa vida extraterrestre tenha tanto a capacidade como a vontade de contatar com a Terra. Dada a vastidão do espaço e os diferentes estados de evolução possíveis, o mais provável é que a vida extraterrestre seja ou demasiadamente primitiva para nos poder contatar ou vários milhões de anos mais avançada, conhecendo bastante bem a nossa situação presente e interessando-se pouco por nós. Quero dizer com isto que seria extraordinário que qualquer outra forma de vida da galáxia tivesse evoluído precisamente até ao estádio da nossa sociedade tecnológica ou até um estádio muito próximo, que possuísse quer os meios quer o interesse em contatar connosco.

Apesar destes argumentos que contrariam qualquer hipótese de algum dia virmos a contatar via extraterrestre, muitas pessoas esperam ansiosamente o dia em que, pela primeira vez, a humanidade se confronte diretamente com uma inteligência estranha. Esse dia, se alguma vez chegar, seria talvez o dia mais excitante de toda a longa história da humanidade. Iria alterar a visão do nosso lugar no universo e o futuro da nossa espécie.

Em vez de se limitarem a esperar passivamente, alguns astrónomos planeiam ativamente a procura de sinais vindos do

espaço exterior — trata-se do projeto SETI. SETI, iniciais de *Search for ExtraTerrestrial Intelligence*[1], é um projeto de utilização de um radiotelescópio, sintonizado para receber sinais a uma frequência adequada, com o fim de escutar todos os planetas localizados próximo de estrelas vizinhas. Os astrónomos esperam ouvir sinais inteligentes. Outros astrónomos pensa que estamos sós na galáxia e que qualquer busca desses sinais é um desperdício de recursos escassos. É difícil julgar, à partida, as perspetivas de sucesso do SETI — o projeto representa, em qualquer dos casos, uma hipótese remota, mas excitante.

Não tenho a certeza se o espaço exterior será o único sítio para se procurar uma inteligência estranha. Penso que já aqui existe uma.

Imagine, por um momento, um criador, o demiurgo, como muitos europeus medievais fizeram — um ser que criou pessoalmente o universo. Existe algo de reconfortante quando se crê num deus criador. A maioria dos cientistas, na qual me incluo, rejeita intelectualmente esta crença por ser desesperadamente inadequada e desprovida de provas. É a ideia que dá. Mesmo as pessoas religiosas mais esclarecidas consideram um sacrilégio procurar provas da existência de Deus no mundo natural. Mas vamos manter a noção de demiurgo, por uma simples questão de argumentação. Afinal de contas, não é necessário *acreditar* no demiurgo para se *imaginar* que um ser criou as estrelas, a Terra, a Lua, as plantas, os animais e os seres humanos — tratar-se-á certamente de um ser muito inteligente. Para os meus objetivos, o demiurgo é um bom modelo de Inteligência Estranha de quem recebemos, presentemente, sinais inteligentes. Como funciona o sistema de comunicações? Vamos, primeiro, examinar um exemplo simples do tipo de sistema de comunicações que tenho em mente.

Vamos supor que um grupo de arqueólogos descobria as ruínas de uma civilização ancestral, enterradas no solo de uma selva. De início, o seu conhecimento é quase nulo — sabem simplesmente que essa civilização existiu. Mas à medida que limpam o terreno e o mato descobrem edifícios, templos e túmulos. Lentamente, ao longo de décadas, a partir dos artefatos e inscrições picturais, começam a reconstituir a história de um

povo antigo — estão a interpretar a informação contida nas ruínas. As ruínas podem, portanto, ser vistas como uma mensagem, uma estrutura inteligível, e o povo ancestral que construiu a civilização, como a "inteligência estranha" de quem os arqueólogos recebem a mensagem. Não é normal pensar-se nos artefatos do passado humano como uma linha de comunicação; mas esse é, na realidade, um dos seus atributos.

Vamos agora abandonar este exemplo, no qual imaginámos que as ruínas de uma civilização ancestral eram uma estrutura inteligível, e imaginar que o universo material, as "ruínas" do *big bang* escaldante, contêm uma espécie de mensagem. O universo, ao fim e ao cabo, tal como as ruínas, tem uma estrutura definida, está organizado de forma inteligente, e essa organização pode ser estudada pelos cientistas naturais. O próprio universo pode ser visto como uma linha de comunicação entre a Inteligência Estranha — o demiurgo que o criou — e nós.

Apesar de ser muito antiga a ideia de o universo possuir uma ordem regida por leis naturais que não são óbvias aos sentidos, só nos últimos trezentos anos descobrimos um método para decifrar essa ordem oculta — o método científico-experimental. Este método é tão poderoso que praticamente tudo o que os cientistas sabem sobre o mundo natural foi descoberto através dele. O que eles descobrem é que, de facto, a arquitetura do universo foi construída de acordo com regras universais invisíveis, aquilo a que chamo o código — o código de construção do demiurgo. Exemplos deste código de construção universal são as teorias dos *quanta* e da relatividade, as leis da combinação química e da estrutura molecular, as regras que regem a síntese das proteínas e a forma como os organismos são produzidos, para só mencionar alguns. Os cientistas, ao descobrirem este código, estão a decifrar a mensagem escondida do demiurgo, os truques que ele usou para criar o universo. Nenhuma mente humana poderia ter concebido uma mensagem tão irrepreensivelmente coerente, tão estranhamente imaginativa e, por vezes, tão simplesmente bizarra. Tem mesmo de ser o produto de uma Inteligência Estranha!

E então a matemática? Existirá uma "mensagem" na estrutura da matemática semelhante à que eu visiono na estrutura do

universo físico? Poderemos também vê-la como o produto de uma Inteligência Estranha? A matemática, no fim de contas, não necessita diretamente de observar o mundo físico para se manter honesta; a exigência de consistência formal é suficiente. Apesar das diferenças óbvias entre a matemática e as ciências naturais, o processo pelo qual as descobertas surgem nos dois campos não é totalmente distinto.

Imaginemos que o demiurgo tem, também, poder para criar a lógica — o conjunto de todas as regras consistentes que nos permitem manipular símbolos. A existir uma "mensagem" na matemática, ela parece ser ainda mais estranha que a contida no universo físico. O demiurgo deixou-se, realmente, levar pela imaginação ao criar a matemática — múltiplos tipos diferentes de números, espaços dimensionais infinitos, geometrias bizarras, e ainda álgebras estranhas, para as quais não vemos nenhuma correspondência no mundo físico. Os objetos conceptuais de matemática relacionam-se, frequentemente, uns com os outros, formando um mundo mental. Os matemáticos exploram este mundo estranho e examinam os seus objetos conceptuais, que são, pela sua conceção, estruturas coerentes, que derivam todas de axiomas e definições simples. Mas a matemática, apesar de ser uma construção, continua a poder ser vista como uma mensagem estranha, porque, por vezes, as descobertas do seu conteúdo são de tal maneira surpreendentes que parecem uma descoberta original, e não uma necessidade.

Uma característica da matemática que tem vindo a ser cada vez mais salientada, hoje em dia, é a de que a matemática não é produzida a partir do nada, é um produto do cérebro humano ou do computador. O pensamento matemático não existe por si só numa espécie de espaço lógico, tendo antes de ser incorporado numa estrutura material como o cérebro. As estruturas materiais obedecem às leis da natureza — o código cósmico —, e talvez esse facto imponha uma limitação ao tipo de matemática que pode ser produzida. A ligação entre a matemática possível e o código cósmico pode ser mais íntima do que pensamos.

Uma das características estranhas do código cósmico consiste em que, a avaliar por aquilo que nos é dado observar, o demiurgo se apaga a si próprio do código — tem-se uma mensagem

estranha sem qualquer evidência de um ser estranho. Pierre Simon de Laplace, o grande físico-matemático francês do século XIX, viu-se uma vez confrontado com uma pergunta de Napoleão sobre o papel que Deus desempenhava num seu trabalho científico, a *Mecânica Celeste*, que era uma explicação pós-newtoniana da dinâmica dos corpos celestes. Laplace replicou que não tinha nenhuma necessidade de colocar semelhante hipótese. Muitos físicos modernos, adotando a fantasia de um demiurgo, pensam que o Criador não teve qualquer escolha possível ao fazer o universo tal como o fez — não há nenhuma escolha possível na mensagem do código cósmico. Outros cientistas, contestando este ponto de vista, pensam que Ele poderá ter experimentado outros universos com leis diferentes, mas que, uma vez que essas leis não permitiam o surgimento da vida, não existia nesses universos um recetor final da comunicação cósmica. Consequentemente, a vida nunca poderia ouvir falar desses outros universos. O nosso próprio universo é tudo o que alguma vez poderemos vir a conhecer, não parecendo haver nele nenhuma evidência de que Deus tomou alguma opção ao criá-lo. Ainda um outro ponto de vista, mantido por muitos racionalistas, afirma, à semelhança do filósofo Spinoza, que a busca da razão no universo e a busca de Deus são a mesma coisa — a mensagem é Deus.

A questão de saber se Deus é a mensagem, se Ele escreveu a mensagem ou ela se escreveu a si mesma, não tem uma grande importância nas nossas vidas. Podemos abandonar, com segurança, a ideia tradicional de um demiurgo, uma vez que não existe nenhuma prova científica da existência de um criador do mundo natural, nenhuma evidência de uma vontade ou de um objetivo na natureza que vá para além das leis da natureza conhecidas. A própria existência de vida na Terra, que promoveu o forçoso "argumento baseado na conceção" a favor de um criador, pode ser explicada pela evolução [excelentes descrições recentes são feitas por Richard Dawkins no seu livro *O Relojoeiro Cego*[2] (1986), bem como por Jay Gould em todos os seus excelentes livros sobre a evolução]. Temos, portanto, uma mensagem sem um emissor. Mas o que é importante é a forma como essa mensagem, à medida que nos chega pela via da descoberta científica, reordena o nosso mundo. É decifrando o código cósmico que os cientistas aprendem as regras que regem o universo material, a forma como a matéria é criada e a vida organizada.

Este conhecimento, por seu turno, é a base de uma nova tecnologia — equipamento médico, sistemas de comunicação eletrónica, biotecnologia, energia nuclear —, tecnologia que altera profundamente a condição humana e as oportunidades de desenvolvimento social. De certo modo, então, o programa de desenvolvimento histórico humano já está escrito no código cósmico.

O tema geral deste livro é o futuro da ciência e, em particular, a ascensão das ciências da complexidade e as suas consequências para o nosso mundo. A fim de descortinarmos o futuro da ciência, penso ser importante compreendermos, primeiro, o que a ciência é ou não é. Devo primeiro declarar que este é um relato pessoal — um fragmento, de certo modo autobiográfico, da minha experiência — e nem todos os cientistas, ou outras pessoas que abordaram estes assuntos, concordarão comigo.

Vamo-nos libertar desta metáfora do código cósmico e do estranho canal de comunicações com o Ser Estranho e perguntar a nós mesmos: Que se passa na atividade da ciência? Que procuram os cientistas, e por que têm eles razão para esperar vir a obter algum sucesso na sua procura? É a estas questões, especialmente à sua aplicação às ciências naturais e cognitivas, que irei responder no resto deste capítulo e no próximo.

Comecei a pôr este tipo de questões quando era estudante de Física na Universidade de Princeton, no fim da década de 50. Não poderia ter tido um conjunto melhor, mais inspirado ou mais qualificado de professores. A política do departamento exigia que mesmo os professores mais reputados dessem aulas aos estudantes de licenciatura — um investimento de tempo que dava frutos no futuro da física. Mas, se aprendi muito com os meus professores, aprendi outro tanto com os meus colegas de física. Éramos um curso espetacular, confiante e ambicioso em dar algum contributo à ciência.

O meu colega de laboratório, Boris, classificou-se em primeiro lugar entre todos os estudantes de licenciatura do meu ano, o que provocou alguns comentários invejosos por parte de outros estudantes de física. Achávamos que esta distinção não era inteiramente merecida, pois o Boris só se inscrevia em cadeiras de

ciências ou de matemática, disciplinas nas quais ele era bom e obtinha sempre bons resultados. Quase todos os outros se inscreviam também em cadeiras de literatura, história, arte e ciências políticas, a fim de alargar os horizontes da nossa educação[3]. Nestas cadeiras, era difícil obter boas classificações, uma vez que os critérios de avaliação eram "mais subjetivos". Desafiámos o Boris e dissemos-lhe, sem papas na língua, que o facto de ele ser o primeiro, para nós, não queria dizer nada, a não ser que ele expusesse a sua média às vicissitudes de uma "opinião humanística". Boris reagiu, inscrevendo-se numa cadeira do Departamento de Arte, qualquer coisa como arte medieval ou chinesa, e acabando por sair de lá com uma ótima classificação, para mal dos nossos pecados. Com a confiança que adquiriu, inscreveu-se em mais algumas cadeiras de arte. Acabou por fazer o discurso de despedida na cerimónia de graduação[4].

Nós, os alunos de física, passávamos horas infindáveis a discutir calorosamente diversos problemas de física e matemática; prevalecia um bom equilíbrio entre a competição e a cooperação. Recordei-me dessas discussões, anos mais tarde, quando conheci um amigo, um físico de ascendência chinesa, que tinha sido educado nos Estados Unidos. No final dos anos setenta visitou a China, onde tinha nascido, e deu lá algumas aulas. Quando o interroguei sobre a sua experiência, pareceu-me desencorajado. Explicou-me que, depois das aulas, cada estudante ia estudar sozinho; não existia lá a troca verbal nem a discussão entre alunos que tinham caracterizado a sua educação no Ocidente. "Pensava que estas coisas tinham mudado com a revolução", disse ele, "mas mantinha-se o velho sistema do tempo dos mandarins." Ele sabia, como eu vim a saber mais tarde, que a aquisição de um conjunto de competências intelectuais era vista na China como um meio de se sustentar a si próprio e à família. Não se partilha o conhecimento quando os recursos são escassos. Nunca me ocorreu que a nossa troca livre de ideias entre estudantes de licenciatura, algo que dávamos por adquirido, fosse influenciada pela abundância material da nossa sociedade. Hoje, com os estudantes de licenciatura norte-americanos a preocuparem-se de novo com as possibilidades de emprego, há mais competição e menos cooperação com troca livre de ideias.

Os professores de física estavam demasiado ocupados a *fazer* e *ensinar* física para poderem pensar *sobre* ela. Pensar *sobre* a ciência era o que faziam os filósofos da ciência. Por isso, os estudantes persistentes, como eu e os meus colegas, assistíamos ou inscrevíamo-nos nas cadeiras do Departamento de Filosofia. Esse departamento tinha a sorte de contar com Carl Hempel, um lógico-empirista do Círculo de Viena dirigido pelo filósofo Rudolf Carnap, e Hilary Putman, um filósofo com um interesse persistente pela física teórica (que agora está em Harvard). As cadeiras de filosofia eram um rito de passagem para nós, estudantes de física — uma vez satisfeita a nossa curiosidade sobre o que os filósofos andavam a preparar, seguíamos a nossa atividade de investigação científica. Nestas cadeiras, familiarizei-me com a filosofia do lógico-empirismo, o operacionalismo de Percy Bridgman, filósofo de ciência de Harvard, expresso no livro *The Logic of Modern Physics* (1927), os pontos de vista de Hans Reichenbach sobre o espaço e tempo, o programa de lógica de Russell-Whitehead, a visão global de Wittgenstein, os pontos de vista de Karl Popper, expressos no livro *The Logic of Scientific Discovery* (1935), que tiveram um grande impacto no nosso pensamento, e muitos outros. Muitos destes distintos filósofos dedicaram o seu pensamento à análise e interpretação da reivindicação especial que as ciências naturais fazem da verdade. Quiseram tornar os métodos da ciência rigorosos, tendo os seus esforços ajudado a clarificar o meu pensamento. Como jovem cientista, a leitura destes filósofos apoiava a minha convicção de estar envolvido numa das grandes aventuras do espírito humano.

Mas a relação entre cientistas e filósofos de ciência é semelhante à relação entre políticos de sucesso e cientistas políticos — um está interessado em ser eficaz, enquanto o outro está interessado em compreender a base dessa eficácia. O contato com a filosofia da ciência reforçou a minha convicção de que eu estava realmente interessado em fazer ciência e não em pensar como é que ela funcionava. Queria ler o código cósmico. Descobri que os filósofos da ciência quando tentavam *fazer* ciência costumavam baralhar a sua investigação de uma maneira terrível. (Estou convencido, pela leitura dos livros mais recentes de Popper sobre a teoria quântica, que ele não compreendeu essa teoria, provavelmente porque foi mal encaminhado pela sua agenda filosófica. É notável a sua afirmação em que confessa ter ficado

surpreendido por certas experiências não violarem a teoria quântica, uma conclusão que poucos físicos partilhariam.)

A razão por que os filósofos, e não só, obtêm resultados tão fracos quando tentam eles próprios realizar investigação científica está em que os cientistas, graças ao seu treino profissional, incorporam um conjunto de competências e atitudes. O mesmo se passa com os cientistas, como eu, que se põem a efetuar investigações filosóficas. Estas competências e atitudes, a que o cientista-filósofo Michael Polanyi dá o nome de "conhecimento tácito", não são prontamente comunicáveis. Um exemplo desse conhecimento tácito é o conhecimento possuído por qualquer pessoa que saiba andar de bicicleta. Por muitos livros que se leiam ou muitas aulas a que se vá sobre andar de bicicleta, nunca se adquire um verdadeiro treino para se andar — falhar-se-á logo na primeira tentativa. O mesmo se passa com certas competências cognitivas e intuitivas; são competências implícitas aprendidas pelos nossos "parceiros silenciosos" durante um longo treino. As competências implícitas de um cientista, tal como as de um ciclista, um bailarino ou um ator, são essenciais para o seu trabalho. Outros profissionais, como os filósofos, não têm acesso fácil a essas competências implícitas; já adquiriram as suas próprias competências implícitas, apropriadas à sua tradição profissional. A minha experiência subsequente, como investigador de física, só veio confirmar a minha perspetiva anterior de que a componente cognitiva e intuitiva inverbal da tarefa científica — uma área sobre a qual pouco se sabe — é essencial para o seu sucesso criativo.

Os filósofos da ciência estão certos quando insistem na necessidade de rigor do método científico; na verdade, os próprios cientistas insistem no rigor. Mas não é esta a razão principal do sucesso da ciência. O sucesso da tarefa científica não depende da aderência rigorosa dos cientistas a um conjunto de regras estipuladas por filósofos, cientistas ou qualquer outra pessoa. O método científico é poderoso porque, tal como o processo evolucionário, é um sistema poderosamente seletivo. Pela sua própria conceção, as teorias científicas são sempre vulneráveis à destruição, tal como uma espécie, sujeita à pressão ambiental, está sujeita à extinção. Graças a essa vulnerabilidade, a verdade científica tem a força que lhe advém da sobrevivência num

ambiente cheio de desafios. As competências do cientista (uma das quais, entre muitas outras, é a aderência ao rigor) são exercitadas na arena do criticismo intenso e da verificação experimental — são vulneráveis aos desafios que a todo o momento enfrentam. Mesmo quando as teorias científicas não sobrevivem, o que acaba por acontecer a quase todas, a sua descendência evolucionária mantém intactos os melhores "genes" — as ideias que continuam a funcionar — da teoria anterior. Ironicamente, é a disposição de arriscar tudo, incluindo a própria existência, que garante a sobrevivência. Bem-vindo, pois, ao mundo do método científico — combate sangrento de vida ou de morte! Irei dedicar um capítulo posterior ao "método científico" (tal como ele é). Mas qual é o objetivo final da tarefa científica?

O fim último de toda a atividade científica — o pensamento, a observação e a experimentação — é a procura de uma representação conceitual coerente da realidade — uma teoria ou imagem da realidade. Uma tal imagem da realidade, nem que seja uma imagem parcial, tem uma estrutura implicativa muito rica, não só para a ciência, como também para a cultura, a tecnologia e o comércio. Essas imagens da realidade mostram-nos novos aspetos do código de construção do universo, criando uma imagem mental que vai além de tudo o que podemos apreender diretamente com os nossos sentidos e instrumentos. E a motivação que está por trás da descoberta destas teorias é o desejo do cientista de descobrir o que (com raios e coriscos!) se está realmente a passar.

Uma teoria científica pode ser imaginada como um mapa que, como qualquer vulgar mapa das estradas, nos indica os sítios por onde se anda e descreve o território e as regras a que ele obedece — regras como as que exigem que um rio, no mapa, contorne uma montanha, e que não lhe passe por cima. Tal como verdadeiros mapas de estrada, os "mapas" das teorias científicas funcionam porque existe ali mesmo, "ali", um território que lhes corresponde, na nossa experiência comum. Existem mapas grandes, com um grande âmbito, como a teoria da relatividade, de Einstein, ou a teoria da seleção natural, de Darwin. Mas a maioria dos mapas que os cientistas usam no dia-a-dia são mais pequenos e mais pormenorizados, como seja a teoria dos metais ou a teoria da síntese das proteínas. É evidente que a metáfora do

mapa irá falhar a certo ponto, uma vez que o mapa é uma entidade espacial, enquanto uma teoria é uma entidade conceptual; de qualquer forma, penso ser uma metáfora útil.

Todas as grandes teorias do mundo natural postulam uma lei ou hipótese que é o seu ponto fulcral. As leis de Newton, na mecânica clássica, e a hipótese de que a informação vai sempre do ADN para as proteínas, e nunca em sentido contrário, na biologia molecular, são exemplos dessas leis postuladas. Na metáfora dos mapas, essas leis refletem, simplesmente, as regras gerais de que nos servimos quando desenhamos um mapa. Por vezes, a descoberta científica de um novo território faz com que as regras do desenho de mapas sejam modificadas. De qualquer forma, a cada mapa de qualidade está associado um conjunto definido de regras.

A que é que correspondem, no mundo, as leis naturais e em que sentido é que elas existem? Elas são, como irei defender, seguindo o filósofo iluminista Emmanuel Kant, os princípios organizacionais que tornam inteligível e coerente a nossa experiência do mundo natural. Estes princípios organizacionais são incorporados num enquadramento lógico e coerente chamado teoria. Uma teoria fornece, portanto, uma imagem lógica do mundo natural, uma imagem que é, em parte, um produto das nossas mentes e cultura. Mas existe uma parte da teoria, que é, de facto, a parte mais importante, que *não* é um produto da nossa mente — aquilo a que vou chamar a "estrutura invariante" da teoria. A "estrutura invariante" da teoria corresponde às características da teoria que são independentes da nossa descrição específica do território da natureza e das regras a que ela obedece. Nem todas as teorias possuem essa "estrutura invariante". Historicamente, essas teorias são teorias terminais — becos sem saída na evolução do conhecimento científico. Por exemplo, a teoria de que o calor é uma substância — o flogisto[5] — não tinha nenhuma estrutura invariante, porque o calor não é uma substância. Mas quando uma teoria possui uma estrutura invariante no mundo natural, esta não pode ser retirada, modificando simplesmente a teoria. As estruturas invariantes das teorias são os códigos de construção do demiurgo.

As teorias são imagens do mundo, e a relação dessas imagens com os seus invariantes lembra-me uma história notável do pintor Pablo Picasso. Picasso não desenvolvia teorias científicas, pintava quadros, mas a história seguinte revela que ele compreendia o que estou a tentar explicar. Picasso viajava no compartimento de um comboio em companhia de um outro homem que, reconhecendo Picasso, lhe perguntou por que é que ele não pintava as pessoas "tal como elas eram". Picasso perguntou-lhe o que é que ele queria dizer com "tal como elas eram", ao que o homem puxou da carteira e tirou uma fotografia da sua mulher e disse: "Esta é a minha mulher." Picasso respondeu-lhe: "Não é um pouco pequena e plana?" As teorias são imagens criadas pelas pessoas. Mas, tanto nos retratos de Picasso como nas fotografias, aparece um corpo humano — a estrutura invariante — que está a ser representado.

Embora seja claro que os mapas são, em parte, *criados* por nós, as descrições da natureza, os objetos dos mapas, o território e as suas regras, não são criados por nós, têm, pelo contrário, de ser *descobertos*. Imagine duas pessoas a jogar xadrez e suponha que não conhece as regras do jogo. De início, aperceber-se-á do tabuleiro e das diferenças entre as peças — o "território" do jogo de xadrez. Depois, observando a forma como os jogadores mexem as peças, descobre as regras do jogo — o modo como começa, os vários movimentos possíveis das peças e por aí adiante. Está claro que as regras não são dadas com o "território", mas especificam a maneira como ele se pode modificar. As regras e as peças definem, portanto, o jogo. Talvez, ao fim de um longo período, venhamos a descobrir que o nosso conhecimento das regras está incompleto — observamos um dos jogadores a pôr em prática uma nova regra. Da mesma forma, o nosso conhecimento das regras da natureza pode-se alterar com o tempo. E, tal como as regras do xadrez, as regras da natureza correspondem a algo que "existe ali".

Não importa se se acredita que a Terra repousa nas costas de uma tartaruga gigante ou que é um planeta a orbitar em roda do Sol; em qualquer dos casos, a teoria é sobre o mundo real, a Terra e o seu movimento. A teoria gravitacional é *sobre* a gravitação, a teoria atómica é sobre os átomos, a genética é sobre o ADN e a sua expressão. Este "mobiliário" do mundo científico,

que constitui aquilo a que eu chamarei o "reportório da realidade", vai-se refletir na "estrutura invariante" da teoria correspondente. Os átomos, as bactérias e os genes podem ter sido meras hipóteses, em tempos — conjeturas destinadas a correlacionar dados e a promover um programa de investigação. Mas, se eles realmente estão lá, tornam-se parte do reportório da realidade. Para ser exato, a descrição teórica destas entidades pode ser construída pelas nossas mentes, inventando "princípios reguladores" para tornar o mundo inteligível. Também o nosso conhecimento do reportório da realidade pode ser alterado com o tempo — os átomos, que dantes se consideravam indivisíveis, podem ser decompostos; veio-se a descobrir que a relatividade do movimento não é aplicável à luz. No entanto, o reconhecimento de um reportório da realidade implica que existe algo independente da consciência, cuja existência não pode "ser teorizada". Embora, historicamente, os objetos de investigação científica possam surgir como hipóteses e a demarcação entre o que é e o que não é um objeto não seja sempre clara (essa demarcação pode, ela mesma, ser discutida), quer-me parecer que não é possível negar a sua existência sem começar por negar a existência de um mundo objetivo e a possibilidade da ciência.

Podemos explorar um pouco mais a nossa metáfora do xadrez. À medida que observamos as várias peças e as regras a que elas obedecem, desenvolvemos, ao fim de um certo tempo, "uma teoria" do jogo. As regras, concluímos, não são aplicadas pelos jogadores de uma forma arbitrária, mas sim com um propósito bem definido — ganhar o jogo com a captura do rei adversário. Esta "teoria" fornece uma panorâmica geral daquilo que realmente se passa — porque são realizadas certas jogadas. A teoria fornece, portanto, uma explicação coerente da ação. O mesmo se passa com a ciência. Se aplicássemos a imagem do xadrez, poderíamos supor que as peças do xadrez correspondem, por exemplo, aos átomos. As regras a que as peças obedecem correspondem às regras a que visivelmente os átomos obedecem — as regras que regem os saltos quânticos e que produzem as linhas espectrais. Finalmente a teoria — neste caso a teoria quântica — fornece um relato quantitativo coerente das regras e do território — tem-se uma panorâmica geral.

Temos, portanto, os objetos do mundo — o reportório da realidade —, as regras a que eles obedecem e, finalmente, as grandes teorias, as imagens mentais que integram todos estes componentes num todo coerente. Temos que descrever os objetos e as regras de alguma maneira. Vou chamar a esta descrição uma "representação" — a linguagem das nossas teorias. Algumas teorias podem parecer distintas por usarem linguagens ou representações diferentes. Mas são, de facto, a mesma coisa se elas tiverem a mesma "estrutura invariante". Vamos verificar esse facto como se examinássemos a relação entre representações e invariantes mais em pormenor.

A relação entre um invariante e as suas representações pode ser facilmente compreendida se se imaginar uma árvore, ou, ainda melhor, se se olhar para uma real. A árvore pode ser representada ou descrita em língua portuguesa — qual o tipo de árvore, a cor das suas folhas, a sua altura, etc. Esta é uma representação linguística da árvore, na língua portuguesa. Da mesma maneira, podemos descrever a árvore em árabe ou em chinês. São representações distintas. A estrutura invariante, no entanto, corresponde às propriedades profundas e inalteráveis da descrição da árvore, que não mudam com a linguagem. Da mesma maneira, para se exprimir a estrutura invariante de uma teoria é sempre preciso usar uma representação — uma linguagem específica, normalmente a matemática —, mas o invariante é realmente independente dessa representação específica. Um francês e um inglês descrevem as peças e as regras do xadrez de maneira diferente. Da mesma forma, as leis de Newton podem ser expressas de várias maneiras diferentes, mas o conceito essencial — o conceito invariante — mantém-se inalterado. Em resumo, as regras do desenho de mapas podem ser expressas de maneiras diferentes, mas, se pudermos traduzir um conjunto de regras para o outro, elas são, de facto, equivalentes.

A estrutura variante expressa por uma teoria é algo que pode, em princípio, ser verificado por qualquer pessoa, uma vez que corresponde a algo do mundo, e não a algo só da nossa mente. Se estas ideias estiverem corretas, é possível fazer a seguinte "experiência mental". Imaginemos que estabelecíamos contato com uma inteligência extraterrestre — um cristal pensante, num planeta distante, que usa um certo tipo de linguagem. Já se

estudou o problema das linguagens extraterrestres — como comunicar com uma inteligência que não sabe nada nem da nossa linguagem nem da nossa cultura? Como criar uma língua franca para o universo? É óbvio que temos de apelar a uma experiência "comum". Seria possível enviar o número π — a relação entre o perímetro da circunferência e o seu diâmetro — em código binário (o código mais simples), pois é provável que mesmo os cristais pensantes saibam geometria — é uma coisa lógica. Desta forma, a linguagem comum da matemática poderia ser estabelecida. O passo seguinte da comunicação consistiria em apelar à existência de invariantes — a estrutura profunda do mundo material. Para começar, podíamos tentar enviar as equações de Maxwell do campo eletromagnético. Mesmo os cristais pensantes devem conhecer estas leis, uma vez que elas se referem a entidades — ondas eletromagnéticas — que são estruturas invariantes, inclusive no mundo do cristal pensante, ainda que ele possa representar estas leis de uma forma muito diferente da nossa. Se, pelo contrário, tentássemos comunicar os nossos sentimentos ou emoções, esses podiam não ter nenhuma tradução possível para um cristal pensante. Só os elementos invariantes do reportório da realidade, juntamente com as suas regras, podem ser comunicados. Neste sentido, as descobertas das ciências naturais assemelham-se à matemática pura.

Kant foi a primeira pessoa a articular claramente a relação entre teorias do mundo natural e o mundo em si mesmo. Embora hoje em dia algumas das suas ideias sejam peças de museu do pensamento do século XVIII, o enquadramento essencial da sua filosofia permanece intacto; todas as modernas filosofias da ciência são obrigatoriamente influenciadas por ele.

Kant, na minha opinião, criou um grande cisma no mundo do conhecimento e entre as pessoas que pensam sobre ele. O cisma foi entre aqueles que *pensam sobre* e *experimentam com* o mundo natural (hoje chamados cientistas) e aqueles que *pensam sobre* a forma como os cientistas refletem sobre o mundo (hoje chamados filósofos da ciência). Embora esta distinção já existisse antes de Kant, tornou-se depois um verdadeiro cisma. Devido a Kant, a ênfase da filosofia passou do mundo e do que ele contém para a forma como conhecemos esse mundo e para a natureza desse nosso conhecimento. Desta forma, Kant lançou um

programa de investigação filosófica de compreensão da ciência, que ainda hoje se mantém. O programa chama-se "filosofia da ciência", e os seus aderentes falam sobretudo para si próprios, tendo pouca influência na ciência, tal como ela é praticada pelos cientistas. Estes, pelo seu lado, são muitas vezes "antifilósofos" (como o físico Richard Feynman). Acham que a "filosofia da ciência" se expressa quando se pratica realmente a ciência. Todos os grandes cientistas criaram a sua própria filosofia — o seu trabalho. Mas não é fácil dominar a ciência moderna suficientemente bem ao ponto de a poder praticar, e esta dificuldade também agrava o cisma entre cientistas e filósofos.

Embora a filosofia de Kant da forma como compreendemos o mundo, expressa no seu livro *Crítica da Razão Pura*, seja muito complexa e difícil, a sua ideia central pode ser apresentada de um modo simples por um "esboço kantiano" — uma imagem de como Kant via a relação do mundo com a mente. Imaginem-se quatro esferas concêntricas que representam a transição do mundo exterior para o mundo interior. A esfera exterior representa "a coisa em si mesma", e é escura — não temos nenhuma maneira de saber o que é. Para Kant, as coisas em si mesmas não são objetos, não existem no espaço e no tempo; noções como singular e plural não se aplicam a elas. Prosseguindo para dentro, a esfera seguinte, no nosso esboço, é a esfera que corresponde ao mundo natural. Essa esfera é iluminada — não há dúvida de que temos experiência de um mundo que existe no espaço e no tempo públicos. Esta esfera corresponde ao território, na nossa metáfora do mapa. A esfera seguinte, caminhando mais para dentro, representa a mente conhecedora — o mundo cognitivo das nossas representações mentais, a nossa experiência. Possui também o sentido interno do tempo. Esta esfera é iluminada, pois temos acesso ao conteúdo da nossa mente conhecedora. É nesta esfera que estão os mapas do mundo natural. Finalmente, a esfera mais interior deste modelo esboçado do ego kantiano é também escura. É a origem última das nossas cognições e pensamentos, sendo inescrutável. De acordo com Kant, nem a esfera exterior, a coisa em si mesma, nem a mais interior, a mente em si mesma, são investigáveis. Isto está de acordo com o ponto de vista de Kant de que uma ciência da psicologia (não confundir com a neurofisiologia) é, na verdade, impossível — não podemos ter

acesso direto à origem dos nossos pensamentos. Podemos, no entanto, examinar o "eu" empírico ou fenomenológico.

Vamos, por agora, aceitar este modelo kantiano da mente e da realidade. Como é, então, possível ter mapas da realidade, coerentes e invariantes? Ao fim e ao cabo, toda a gente vive no seu próprio mundo de experiências; a minha experiência é diferente da do leitor, e as nossas duas experiências do mundo são diferentes das de um egípcio da Antiguidade. A nossa opinião do mundo é condicionada historicamente. Daqui a um milhar de anos o nosso universo conceitual de hoje, a nossa visão da realidade, podem parecer arcaicos e estranhos. Dá a sensação de que cada um vive no seu mundo privado — um mundo possível. Estes "mundos possíveis" refletem as diferenças existentes entre as culturas e sociedades, os interesses profissionais e as personalidades — resumindo, a intenção humana.

A posição de Kant relativamente à questão do condicionamento histórico e social do conhecimento é bastante clara — não se aplica ao nosso conhecimento dos objetos naturais. Existe um mundo público, comum e natural, que é estudado pela ciência. Mas alguns filósofos contemporâneos não concordam com esta afirmação.

O filósofo contemporâneo Nelson Goodman defendeu de forma particularmente vigorosa o ponto de vista de que não existe nenhuma realidade aborígene, mas apenas uma multiplicidade de realidades. O mundo de aparência é "criado" pela mente, e nela não existe nenhuma realidade última "fora dela", trata-se de uma construção da nossa mente com um estatuto privilegiado. A filosofia de Goodman — um filósofo da compreensão que presta tributo a Kant — tem tido uma certa influência sobre os psicólogos contemporâneos (curiosamente, nunca conseguiram criar um mapa coerente da mente, como Kant sugeria), mas, que eu saiba, não tem tido qualquer influência sobre os cientistas naturais. Jerome Bruner, um psicólogo cognitivo distinto, fez eco das convicções de Goodman: "Tenho argumentado... a favor de uma visão construtivista da realidade: que não podemos conhecer uma realidade nativa; que ela não existe; que qualquer realidade que criemos se baseia numa transmutação de alguma "realidade"

anterior que tomámos como dada. Construímos muitas realidades a partir de intenções divergentes."

Embora este tipo de opiniões possa ajudar algumas pessoas a compreender a multiplicidade da experiência humana e satisfazer de algum modo as necessidades filosóficas de alguns psicólogos, não consola o cientista natural na sua dedicação ontológica à existência de uma realidade nativa. Embora as nossas mentes, baseadas na experiência, possam, realmente, "construir uma realidade" — desenhar um mapa — do mundo natural, isso não significa que esses mapas sejam construções *arbitrárias*. Os mapas do mundo natural incorporam os "invariantes" que são independentes das representações específicas construídas efetivamente por nós. Por "realidade nativa" não me refiro à "coisa em si mesma" de Kant (que é inescrutável), mas ao território da nossa experiência comum, o mundo da aparência. Qualquer indivíduo apto é convidado a verificar a sua experiência, a sua "construção da realidade", para ver se, na verdade, ela está de acordo com o mapa científico.

Uma teoria do mundo natural alicerça-se numa teoria anterior, uma "'realidade' prévia que assumimos como dada". Mas alicerça-se numa teoria anterior por incorporação do que funciona e rejeição do que não funciona. O conhecimento científico, tal como a evolução da vida, é um sistema seletivo. As teorias do mundo natural evoluíram desde a construção orgânico-divina da Idade Média, até ao universo quântico de hoje, passando pelo universo mecanicista de Newton. E a visão de hoje não é ainda, por certo, a resposta final — teremos descobertas novas no futuro. Como uma espécie em evolução, não existe uma "perfeição" final, uma imagem final da realidade válida por toda a eternidade. No entanto, as teorias que inventámos hoje correspondem àquilo que experimentamos e observamos, incorporando o reportório da realidade conhecido, uma ordem invariante que não depende da forma como a representamos e que será, certamente, a base de uma teoria futura. Em resumo, a "realidade nativa" é a estrutura invariante do mundo como é revelada pelo progresso histórico da ciência. As teorias da Terra, das estrelas, do cérebro, das células vivas ou dos átomos podem aparecer e desaparecer, mas estas entidades permanecem sempre.

Simpatizo e identifico-me com a intenção dos filósofos naturais desde há séculos, ou mesmo milénios, na sua luta pela compreensão do universo onde nasceram, na sua procura de uma ordem invariante por trás do rebulício da experiência e dos sentidos. Essa *intenção* de compreender o universo tem sido um tópico sempre presente, desde o início dos tempos, uma motivação permanente para ler o código do demiurgo e descobrir o reportório da realidade. Como fez notar o astrónomo americano Edwin Hubble: "O anseio é mais velho do que a história. Não é satisfeito e jamais será suprimido."

Eu proporia até que os invariantes que encontramos no mundo natural são mais facilmente compreendidos se os considerarmos implícitos na nossa organização do mundo material, tal como os princípios organizacionais de um edifício estão implícitos na sua própria estrutura. Embora o ponto de vista multiplicista dos "mundos possíveis" de Goodman se possa aplicar ao mundo criado pelo homem — o mundo da arte, da literatura, das leis, da história —, não se aplica ao mundo natural. Na minha opinião, o ponto de vista dos "mundos possíveis" só se justifica porque, na realidade, só existe um mundo natural comum a todos. Por isso mesmo é que os "mundos possíveis" de outras pessoas e outras culturas são inteligíveis. Resumindo, aquilo que o demiurgo juntou nenhum homem pode separar, mas aquilo que o homem juntou é mais do que certo que pode ser separado (e acabará por sê-lo).

Embora eu não partilhe o ponto de vista de Goodman sobre o mundo natural (já me chamaram um "realista nato" irreconstruído, talvez mesmo um "fundamentalista científico" — nomes pouco prestigiosos entre os filósofos), acho as suas opiniões muito importantes para a filosofia educacional e úteis na exploração, compreensão e empatia de outras culturas, crenças e condições de vida. Gosto de passar horas, ou mesmo dias, a explorar outros mundos, fazendo-me crer a mim próprio que sou, por exemplo, um autómato sem "vontade própria", um homem de direita ou de esquerda, uma mulher ou uma pessoa de outra raça ou cultura. (Os leitores podem experimentá-lo por sua própria conta e risco.) Os bons atores e os escritores de novelas são grandes adeptos desta experiência. Embora seja fácil deixar-me levar por este jogo de troca de papéis, uma vez que os meus

parceiros silenciosos têm finalmente oportunidade de se exprimir, essa técnica psicológica permite-me, de facto, ter acesso a outros "mundos possíveis" para ver como eles são realmente construídos e que sentimentos e valores os ligam por dentro. Por vezes, mas nem sempre, retorno enriquecido ao meu próprio mundo, quando mais não seja porque fixei os meus limites. Somos todos atores; mas a maioria só conhece um papel.

Os cientistas disputam um "jogo de comunicação" com o território da sua experiência — tentam extrair o máximo possível de informações sobre a realidade e marcam um ponto cada vez que, com base nessas informações, constroem uma teoria mais completa e coerente da realidade. Os cientistas pretendem encontrar essas teorias porque elas lhes mostram uma realidade conceptual, uma estrutura lógica profunda que torna o mundo compreensível e que estaria de outro modo escondida. Essa compreensão não só alivia a frustração da busca que a precedeu, mas revela também, pela primeira vez, aquilo que realmente se passa. O *sentimento* principal que as novas teorias me deixam é o mesmo sentimento que me deixa uma revelação maravilhosa — o receio que uma criança sente ao descobrir que por trás da porta da casa existe uma ordem escondida, um mundo novo à espera de ser descoberto, e que *é por isso* que as coisas dentro de casa são como são.

É importante compreendermos o que são as teorias científicas, porque elas ajudam a definir uma ciência e a estabelecer qual é o seu campo, limitado e particular, de reivindicação da verdade. Mas, antes de salientar as propriedades das teorias, devo sumariar a minha perspetiva geral. A ordem invariante expressa nas nossas teorias — o código cósmico — é possível porque o mundo material está mesmo organizado dessa forma. Enquanto as nossas teorias são invenções livres da nossa mente, os invariantes que elas expressam não só moldam a coerência da nossa experiência, como também refletem a verdadeira estrutura material da natureza. Ou, para dizer o mesmo, os invariantes estão lá, no mundo natural. Vou argumentar (não vou provar!), em primeiro lugar, que esta ordem invariante natural é a *única* ordem universal e coerente e, em segundo lugar, que tudo o resto onde é razoável esperar que exista uma teoria científica é uma consequência dessa ordem invariante. Outras formas de ordem,

tais como as que são criadas pelos seres humanos — a lei, a religião, a economia, a sociedade, a literatura e a arte —, não são uma consequência direta da ordem material da natureza. Não temos nenhuma razão para esperar que haja uma ordem invariante escondida, representada numa teoria científica que as descreva. Esta ordem de origem humana tem uma história (ao contrário da ordem natural, que é eterna) que reflete as mudanças do sistema intencional da consciência humana — crença, desejo, pensamento e sentimento. É uma ordem criada por seres humanos e, portanto, compreendida por eles. Curiosamente, o nosso mundo moderno assiste ao choque entre as consequências da ordem material recentemente descoberta do universo e a ordem de iniciativa humana, mais antiga e ainda ativa — um choque que está no centro da dialética intelectual dos nossos dias. Mas, antes disso, quais são as propriedades de uma teoria científica?

As propriedades principais das teorias científicas que postulam uma estrutura invariante são a coerência lógica, a universalidade e a vulnerabilidade à destruição. Vamos examinar estas características uma por uma.

As teorias científicas têm de estar organizadas de acordo com os cânones da lógica. Se forem lógicas, podemos verificar se cada teoria é internamente consistente e se várias teorias que cubram áreas sobrepostas da realidade não se contradizem. Se as teorias não forem lógicas, não temos, sequer, hipóteses de verificar a respetiva consistência. A partir de uma teoria inconsistente podemos provar o que quisermos (ou o oposto, pelo que essa teoria não interessa). Uma forma de garantir que as teorias são lógicas é fazer com que se apoiem, em parte, na lógica intrínseca da matemática, se bem que tal não seja necessário. Uma teoria científica não tem de ser quantitativa, como se passou com a formulação original da teoria da evolução de Darwin, que nem sequer era matemática, mas tem de ser precisa do ponto de vista lógico.

As teorias científicas, graças à sua coerência, permitem-nos explorar novos territórios com confiança e, se forem boas teorias, podemos explorar *a fundo* o território da realidade.

Graças ao poder da sua coerência, as teorias científicas têm uma estrutura implicativa — apontam para novas áreas, descobertas inesperadas. Esta capacidade de previsão das teorias é impressionante. A recente descoberta, num acelerador de alta energia do CERN[6], das partículas quânticas W e Z^0, cujas massas coincidiam exatamente com os valores previstos por uma teoria matemática abstrata, impressionou os seus próprios descobridores. A confirmação pela experiência, embora rara, revela-se entusiasmante, sendo o indício de que realmente dispomos de uma boa teoria.

O que distingue as teorias científicas das imagens da realidade com origem religiosa, cultural ou política é a intenção dos seus criadores de que elas sejam teorias úteis independentemente da religião, cultura, ideologia política, sexo, raça, personalidade, sentimentos ou opiniões do seu utilizador. Esta é, talvez, a característica da ciência que mais a distingue social e culturalmente — é universal no sentido de que as suas verdades são válidas para *todos*.

A teoria científica é ainda universal num outro sentido — é verdadeira para *tudo*. Tal como os números, uma teoria científica é universal; aplica-se indiferentemente a tudo o que esteja dentro do seu domínio. Pode-se estender de um laboratório terrestre até às galáxias mais distantes. As descobertas sobre as proteínas ou as propriedades das membranas de uma célula são válidas para todas as células desse tipo.

É precisamente esta universalidade das teorias científicas que as torna interessantes aos olhos de algumas pessoas e desinteressantes aos olhos de outras. Algumas pessoas interessam-se por um conhecimento indiferente e universal, enquanto outras se interessam por um conhecimento histórico e muitas vezes pessoal, com características narrativas.

Eis uma história que ilustra a diferença de atitudes das pessoas perante os conhecimentos universal e particular. Fui uma vez convidado para um jantar em Nova York, com um grupo de pessoas da alta-roda. Estavam presentes diversos escritores, editores e intelectuais; eu era o único cientista. A conversa acabou por incidir no *The New York Review of Books*, uma boa revista de

crítica literária que vai muito além da simples crítica de livros — publica ensaios e artigos de reflexão de alta qualidade intelectual. Esta revista, talvez mais do que qualquer outra revista contemporânea, ajuda a incentivar uma comunicação intelectual rápida, com um nível cultural muito bom. Costumava lê-la e apreciava-a muito (apesar de ser um pouco anglófila demais para o meu gosto americano).

Mas prossegui a discussão, descrevendo o meu problema: não me conseguia recordar de nada que lá tivesse lido. A informação era armazenada na minha memória de curta duração e nunca passava para a minha memória de longa duração. Concluí que a justificação era que, apesar do estilo de escrita sempre brilhante e da qualidade da narrativa, não exprimia mais do que a opinião de uma pessoa relativamente ao pensamento e às ações de uma outra pessoa. É difícil, para mim, lembrar-me das opiniões das pessoas (mesmo das minhas próprias). Aquilo que recordo são conceitos e factos, os invariantes da experiência, não o efémero da opinião, gosto e estilos humanos. Essas trivialidades não devem ser consideradas por pessoas sérias, exceto por recreação intelectual.

O silêncio que se seguiu aos meus breves comentários fez-me sentir isolado. O abismo entre as duas culturas — a científica e a humanística — alargou-se consideravelmente. Apercebi-me de que, com os meus disparates, tinha violado os precintos sagrados do templo maior dos outros convidados. Estas pessoas professavam a sua doutrina nesse templo dedicado à opinião política, ao gosto e ao estilo, a uma consciência dominada pela introspeção, crença, sentimentos e futilidades e atividades intelectuais em si mesmas, elementos esses só vagamente ligados pelas restrições do conhecimento. Tentei, sem sucesso, recordar-me de uma piada que me ajudasse nessa situação embaraçosa. Em vez disso, fiz algumas observações apaziguadoras, defendendo que a expressão de opiniões era provavelmente importante na arena política, mesmo por parte de pessoas que não compreendessem o processo político de tomada de decisões, quando mais não seja para preservar o sentido da liberdade intelectual.

Numericamente, os cientistas constituem uma minoria dentro da nossa cultura, mas a sua influência tem vindo a crescer. Uma grande parte do que se chama "ciência" (abusa-se muito desta palavra) não o é realmente. Muitas pessoas, mesmo com uma certa educação, não conseguem ainda alcançar o carácter fundamental do conhecimento científico e as implicações do nosso domínio ainda ténue desse conhecimento. Podem pensar que se trata de uma questão de opinião, que reflete interesses de classes e que é de algum modo "político", ou mesmo anticultural ou antirreligioso. A principal força de motivação da ciência não depende desses fenómenos sociais (apesar de eles serem importantes). São antes as exigências que os objetos da ciência colocam ao investigador que fazem mover a ciência. O público nem sempre se apercebe destas motivações, porque os objetos da investigação parecem demasiado abstratos. Para ser exato, a teoria quântica ou a teoria da genética molecular parecem muito abstratas e afastadas da experiência humana imediata; mas têm a virtude suprema de serem verdadeiras para qualquer pessoa que se decida a examiná-las de perto. E é por isso que um tal conhecimento universal é tão raro como importante e irá continuar a transformar a condição humana.

Por último, as teorias têm de estar de acordo com a experiência e a experimentação. Se uma teoria concorda com a experiência de todos os investigadores competentes, está "correta"; de outra maneira, ou está errada ou não é uma teoria científica. Apesar de os princípios fundamentais em que se baseia uma teoria científica não poderem ser verificados diretamente pela experiência, esses princípios implicam logicamente afirmações que *são* diretamente verificáveis. Por exemplo, a equação de Schrödinger, que descreve a dinâmica das partículas quânticas, pode ser vista como um princípio fundamental. Não é possível verificar diretamente esta equação. Mas podem-se deduzir rigorosamente muitos resultados, como sejam os níveis de energia dos átomos e dos núcleos, a partir da equação de Schrödinger, e comparar esses resultados com aqueles que a experiência fornece. Chama-se a isto a aplicação da teoria. Se a aplicação falha e o resultado está logicamente relacionado com o princípio, então o princípio tem também de falhar. Se for bem-sucedido numa dada aplicação, não podemos, como é evidente, concluir logo que a equação está correta. Mas, se resultar em várias aplicações

sucessivas, os cientistas ganham, de facto, uma tal confiança na correção deste princípio — a equação de Schrödinger, neste caso — que o aceitam, também, como "correto". A decisão de aceitar um princípio como "correto" é tomada com base no consenso e no juízo, e não num procedimento estritamente lógico. Embora uma teoria deva ser logicamente rigorosa, a decisão sobre se ela está "correta" não o é.

Este procedimento da aplicação faz emergir uma característica única das teorias científicas — elas contêm a receita para a sua própria destruição. Uma teoria não pode estar correta se não puder também estar errada. Em qualquer altura, uma pessoa inteligente pode encontrar uma nova aplicação, normalmente num território novo e inexplorado da realidade, que deitará a baixo a teoria e destruirá o consenso. As teorias religiosas e psicanalíticas do mundo e da mente não são científicas, porque, por construção, não têm a capacidade de se autodestruírem. Mas isso não significa que não sejam importantes ou úteis; só quer dizer que não são científicas. Toda a teoria verdadeiramente científica traz sempre atrelada a si uma bomba, pronta a explodir a qualquer momento. Esta vulnerabilidade à destruição significa que cada teoria científica é o resultado de um sistema autosselectivo semelhante ao sistema evolucionário. Qualquer teoria que triunfe, tal como uma espécie vence num nicho ecológico, tem um potencial de sobrevivência no território da realidade que lhe foi atribuído.

Então que nos leva a pensar que essas teorias possam existir? Para responder a esta difícil questão, acho útil examinar o que dizem os matemáticos a respeito da existência de objetos matemáticos. Curiosamente, os matemáticos discordam sobre o que é a prova de existência de um desses objetos. Um grupo de matemáticos — os formalistas, liderados por David Hilbert no princípio deste século — aceitava provas que mostrassem logicamente que um objeto matemático, digamos um espaço a seis dimensões, com certas propriedades, tinha mesmo de existir, ainda que não construíssem explicitamente esse espaço. Chamava-se a esse procedimento uma prova de existência. Um outro grupo — os intuicionistas, liderados por L. E. J. Brouwer — tinha ideias mais rígidas, só aceitando essas provas se o objeto fosse, realmente, construído matematicamente. A isto chamava-se a prova por construção. As provas construtivas eram, em geral,

muito mais difíceis de obter do que as provas de existência, pelo que a grande maioria dos matemáticos seguiu o percurso de Hilbert, pretendendo efetuar avanços rápidos.

Sinto-me atraído por esta exigência construtivista, não tanto para as matemáticas (para as quais os métodos formalistas são suficientemente rigorosos), mas com um qualificativo necessário para a filosofia e as ciências especulativas. Nada destrói uma ideia mal pensada tão depressa como a exigência de uma conceção ou construção pormenorizada. Embora a especulação criativa seja essencial à condução de um inquérito nas suas etapas iniciais, esse inquérito não pode acabar com uma fantasia especulativa. Isso seria demasiado fácil. É forçoso que o resultado final seja uma construção — um modelo lógico definido, um utensílio material ou uma experiência que ponha em prática a especulação inicial. Exigindo apenas a construção, todas as fantasias especulativas se reduzem ao que são normalmente — uma fantasia intelectual com pouco a ver com o mundo real.

Quando se chega à questão complexa e ambígua de decidir sobre a existência de uma teoria científica, não vejo nenhuma alternativa à rigidez e à exigência efetiva de uma construção. Nas ciências naturais, essas teorias existem; temo-las à disposição. São as teorias quântica e da relatividade, a teoria evolucionária, a genética, a química, a bioquímica e a biologia molecular — um conjunto de teorias vasto, interligado e em interação. Graças a estes mapas, dispomos de uma imagem da realidade material muito mais clara do que a que tínhamos antes. Os mapas estão continuamente a ser revistos e reeditados; ainda não foram descritos vastos territórios desconhecidos — a origem do universo e da vida, o funcionamento do cérebro, para só mencionar alguns. Mas é um facto que as teorias científicas existem e funcionam da forma que delas esperamos. E existem apenas quando as podemos construir.

Como são possíveis esses mapas da realidade? Confrontados com esta questão, a sua existência afigura-se-nos um milagre — uma lógica para além da realidade, um código cósmico que regula toda a estrutura do universo! Kant pensava que eles eram possíveis porque a lógica da natureza e a lógica da mente concordavam entre si. Não discordo, mas penso que a

concordância entre a mente e a natureza parece menos ser um milagre quando se aceita a premissa de que a própria mente humana é um fenómeno biológico e, portanto, está, ela também, sujeita às regras da natureza — o código cósmico.

Para ilustrar esta concordância, suponha o leitor que eu lhe dava um texto escrito numa linguagem que nunca tivesse visto antes. Ensino-lhe a linguagem e, passado um bocado, já está a ler e a compreender o texto em língua estrangeira. A seguir, dou-lhe um outro texto que parece escrito numa língua estrangeira mas que, na realidade, não passa de uma salgalhada aleatória. Por muito que lha ensine, o leitor nunca conseguirá aprender essa linguagem, porque não existe ali nada para aprender. Por que era inteligível o primeiro texto e não o é o segundo? Sem dúvida que o facto de o leitor possuir uma mente que já conhece uma linguagem e pode aprender uma outra, e ainda aprender uma ordem, tem uma importância crucial. Mas igualmente importante é o facto de um dos textos ter uma ordem compreensível e o outro não. Da mesma maneira, a ordem da natureza de que nos apercebemos — o código cósmico — está lá porque o mundo material está, de facto, organizado dessa forma.

Penso que a ordem natural é a *única* ordem coerente e universal, e que todas as coisas, do universo da mente e da matéria, para as quais se encontre uma teoria científica ou uma estrutura invariante acabam sempre por ser uma consequência dessa ordem. Outros cientistas que exploram territórios da realidade que não estão ligados ou não são contíguos à ordem material universal do universo não têm nenhuma razão para encontrar uma teoria de base — um código cósmico — como eu a descrevi. Não consigo sequer imaginar como é que poderia existir uma teoria deste tipo, que não se baseie na ordem material.

É importante salientar que, se esta perspetiva for correta, não poderá haver nenhuma teoria científica, do tipo que eu descrevi, para a intencionalidade humana — para as crenças, sentimentos, atos da fala ou consciência em geral —, exceção feita apenas enquanto a consciência estiver sujeita às condições do mundo material. De certo modo, a consciência é, em parte, independente do mundo material, apesar de ser completamente suportada por ele.

Um problema surge à medida que os cientistas buscam as teorias de base do mundo natural, porque a mente humana está tão notavelmente predisposta para encontrar padrões que acaba por encontrá-los mesmo onde não existem. Algumas pessoas encontrarão uma ordem mesmo num texto aleatório. Talvez, pensam elas, o texto não seja aleatório e contenha uma mensagem escondida, pelo que inventam um conjunto de regras para interpretar aquele texto. Essas regras não são fáceis de conseguir se o texto for completamente aleatório, mas suponhamos que, em vez de palavras aleatórias, o texto é constituído por parágrafos aleatórios, e essas pessoas inventam uma teoria sobre a forma como os parágrafos se relacionam entre si. É extremamente difícil convencer as pessoas que querem acreditar num nível mais profundo da realidade de que não existe nenhuma ordem num conjunto de acontecimentos aleatórios. Muitas vezes, quando não conseguem encontrar uma ordem coerente e pensam que ela deverá existir, culpam do seu fracasso o método utilizado — não concluem que, pura e simplesmente, não existe uma representação mais profunda. É por isso que é indispensável ter ideias rígidas quando chega a altura de decidir se uma teoria descritiva da realidade é válida ou não. A maioria não é.

É muito difícil encontrar teorias científicas da realidade. Gostaria de contar uma pequena parábola para ilustrar esta dificuldade.

Era uma vez um rei-filósofo do século XV que era grande amante da verdade. Pretendia compreender como é que o mundo funcionava, como é que as estrelas e a Lua se moviam, qual era a origem do Sol. Por razões pessoais, este rei não estava satisfeito nem com a física de Aristóteles, nem com a cosmologia de Ptolemeu, que eram as teorias em voga na altura. Mandou chamar todos os seus nobres e encarregou-os da missão sagrada de trazerem à sua corte os doze homens e mulheres mais brilhantes de todo o mundo conhecido. Esses doze génios dever-se-iam reunir na sala de mapas da corte e deliberar fazendo uso dos seus conhecimentos, com o fim de desenvolver, no prazo de um ano, uma teoria do universo. O rei, um homem sensato, decidiu não atribuir grandes recompensas aos doze, caso eles conseguissem,

nem puni-los, caso falhassem. O amor à verdade deveria ser a sua única motivação.

Os nobres conseguiram encontrar os doze e estes *eram*, realmente, as pessoas mais brilhantes de todo o mundo conhecido. Depois de terem sido prevenidos pelo rei de que todas as perspetivas aceites até aí poderiam estar erradas e de que deveriam "começar tudo de novo" (era um rei muito poderoso que se poderia arriscar a sofrer a ira da Igreja), começaram as suas discussões. De início, os sábios discordavam bastante uns dos outros, mas depois, como sabiam que a verdade só podia ser uma e não outra, começaram a cooperar e a chegar a acordo. No final do ano, entregaram o seu relatório ao rei, numa cerimónia impressionante.

O relatório principiava de uma forma convencional. Os sábios diziam que o mundo se dividia em substância e aparência — sendo a substância o que as coisas realmente eram, e a aparência, o que elas pareciam ser aos nossos sentidos. A compreensão do mundo da aparência exigia uma observação cuidada e, por vezes, alguma experimentação. Pelo contrário, o mundo da substância, que se esconde por detrás da simples aparência, só podia ser conhecido pela razão; tal como as verdades da geometria só eram conhecidas pela razão. No seu relatório, os sábios propunham que se desse mais importância à substância, que podia ser conhecida diretamente pela razão pura, do que à aparência, que exigia o testemunho de sentidos duvidosos.

O rei, que já tinha ouvido isto antes, interrompeu a leitura do relatório e perguntou como é que as leis do movimento podiam ser deduzidas fazendo uso exclusivo da razão. Como poderia ele, por exemplo, determinar, usando só à razão, que todos os corpos, independentemente do seu peso, caem exatamente ao mesmo tempo sob a influência da gravidade, um facto que ele demonstrara empiricamente, deixando cair balas de canhão e de mosquete do cimo de uma torre? Um dos sábios avançou e deu o seguinte argumento.

Pediu para supor que, pelo contrário, os corpos pesados caíam mais depressa que os corpos leves. Mandou então imaginar que uma corrente ligava o corpo pesado ao corpo leve e que se

atiravam os dois objetos, em conjunto, do cimo da torre. O corpo pesado, de acordo com esta suposição, deveria cair mais depressa que o corpo leve, e a corrente ficaria sob tensão. O corpo mais leve estaria, de facto, a diminuir a rapidez da queda do corpo mais pesado. Portanto, os dois corpos, em conjunto, cairiam mais devagar do que o corpo mais pesado sozinho. Mas os dois corpos, em conjunto, pesam claramente mais do que o corpo pesado por si só e, portanto, de acordo com a suposição, deveriam cair mais depressa que o corpo pesado. Chegámos a uma contradição lógica — o sistema conjunto deveria, ao mesmo tempo, cair mais depressa e mais devagar do que o corpo pesado sozinho — e, portanto, a hipótese de partida é falsa. A única possibilidade lógica, concluiu o sábio, é todos os corpos caírem, exatamente, à mesma velocidade. (Os leitores que estejam convencidos de que o facto de todos os corpos caírem ao mesmo tempo é uma conclusão empírica e não lógica podem-se divertir a tentar descobrir onde é que este argumento está errado.)

O rei ficou muito impressionado com este argumento lógico (na realidade, devido a Galileu), que mostrava não haver necessidade de proceder a experiências, como largar bolas pesadas de torres inclinadas, para compreender a ordem da natureza. Passou a ser citado como "paradigma" de como a ciência podia e deveria ser levada a cabo no futuro — através de deduções lógicas cuidadosas e de argumentação não contaminada pelas provas imperfeitas dos sentidos.

O relatório continuou. Os sábios concluíram que a cosmologia de Ptolemeu, com a Terra colocada no centro do Universo, apesar de estar de acordo com a observação, não passava de uma simples aparência. O Sol, o mais magnífico de todos os objetos celestes e isento de toda a corrupção terrestre, deveria ocupar o centro do universo. O sistema solar heliocêntrico era a substância por trás das aparências. Desta forma, anteciparam as perspetivas corretas de Copérnico.

Mas os sábios continuaram. Dividiram o mundo material em seis substâncias básicas — terra, fogo, ar, água, éter e magnetismo. O mundo mental, ou espiritual, dividia-se em cinco substâncias — satânica, demoníaca, humana, angélica e divina — que atuavam em diferentes órgãos do corpo. Prosseguiram,

argumentando que a lei do movimento de Aristóteles, que afirmava que um corpo material sobre o qual atua uma força constante se move com velocidade constante (como um bloco que é empurrado pelo chão), era válida para corpos perfeitos, como os planetas, que tinham, claramente, uma velocidade constante nas suas órbitas em torno do Sol, e para objetos que deslizassem em cima de superfícies perfeitas. Quando os doze homens doutos terminaram o seu relatório, o rei, muito impressionado, agradeceu-lhes e doou a cada um uma rica recompensa com a qual não contavam. E viveram todos muito felizes para sempre.

Podemos hoje ver, de uma posição privilegiada, que os doze génios, apesar de certos em algumas coisas, estavam errados na maioria delas. A ilação a tirar desta parábola é que, por muito brilhantes que as pessoas sejam, se não estiverem disponíveis a instrumentação, e os dados e as categorias de pensamento, corretos, essas pessoas nunca poderão desenvolver uma teoria científica. Os métodos para a resolução dos problemas que os doze génios foram encarregados de solucionar só se tornaram disponíveis três ou mais séculos depois. Hoje, temos a vantagem de ver as coisas em retrospetiva, pelo que sabemos que essas teorias são possíveis nas ciências naturais — temo-las à mão. Mas, e as outras ciências — as ciências psicológicas e sociais? Dispomos de teorias do tipo das que eu descrevi? Como escreveu Howard Gardner, um psicólogo que reviu de forma simpática, mas crítica, as ciências cognitivas: "E meados do século XX, dois grandes mistérios da Antiguidade — a natureza da matéria física e a natureza da matéria viva — estavam a dois passos de serem esclarecidos. Ao mesmo tempo, no entanto, um terceiro mistério, que já havia fascinado os nossos ancestrais — o enigma da mente humana —, tinha ainda de atingir uma clarificação comparável." Em que base se pode crer que uma tal "clarificação comparável" é, de todo, possível? Que é que leva certos cientistas a acreditar que existe uma estrutura invariante da cognição humana? No próximo capítulo irei focar explicitamente os meus comentários sobre as ciências cognitivas — um desenvolvimento intelectual contemporâneo, dentro da esfera de ação da psicologia empírica e da ciência dos computadores.

[1] Em português: "Busca de Inteligência Extraterrestre". (*N. do T.*)

[2] Blind Watchmaker, em inglês. (N. do R.)

[3] No sistema universitário norte-americano, cada aluno pode escolher, dentro de certos parâmetros, as cadeiras que vai ter, mesmo que essas cadeiras não estejam diretamente relacionadas com a área em que o estudante se quer licenciar. (*N. do T.*)

[4] Honra tradicionalmente concedida, nos estabelecimentos de ensino norte-americanos, ao melhor aluno de entre todos os finalistas. (*N. do T.*)

[5] O flogisto é também conhecido por "calórico" (*N. do T.*)

[6] Centro Europeu de Investigação Nuclear — consórcio científico de vários países europeus, entre os quais Portugal, para o estudo da física de altas energias. A sua sede é em Genebra, Suíça. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 9

– ESPERANDO O MESSIAS –

Por vezes a verdade chega à história montada em cima do erro.

REINHOLD NIEBUHR

Nos transatos anos sessenta, realizou-se uma grande conferência de psicologia dedicada ao comportamento. Os investigadores apresentaram artigos e artigos sobre o comportamento de ratos — que percorriam labirintos com os seus cérebros acompanhados eletronicamente; que estavam drogados, etc. Foi então que alguém apresentou um artigo sobre o comportamento humano. No período de questões que se seguiu à apresentação, alguém da audiência pôs a seguinte questão, meio a brincar: "Este é um artigo muito interessante acerca do comportamento humano. Mas que é que ele nos diz sobre os ratos?" O público riu-se, talvez numa verificação nervosa de que a ênfase da psicologia estava prestes a ser modificada.

A ciência cognitiva surgiu nos anos cinquenta e sessenta em parte como uma reação crítica à psicologia do comportamento — a perspetiva de que podíamos estudar os animais e os seres humanos como sistemas de entrada-saída, sendo a entrada os estímulos sensoriais, recompensa e castigo, enquanto a saída era o comportamento —, perspetiva que dominara a psicologia norte-americana até então. Os cientistas cognitivos pensavam que a psicologia do comportamento estrita, com a sua teoria do arco reflexo, era demasiadamente limitadora, ignorando funções mentais humanas importantes, como a linguagem. Também achavam que estava conceitualmente errada — que muito do comportamento não era imposto a partir do exterior, mas originado de dentro do organismo.

O programa intelectual das ciências cognitivas — um verdadeiro esforço interdisciplinar — é extremamente ambicioso. Os cientistas cognitivos podem ser psicólogos, linguistas, antropólogos, cientistas de computadores, neurocientistas ou mesmo filósofos. Vão necessitar de todo o auxílio que possam

obter, visto que a sua ambição é compreender como funciona qualquer mente, artificial ou humana.

Este território mental é bastante lato segundo quaisquer bitolas. Por isso, os cientistas cognitivos põem deliberadamente pouca ênfase no papel das emoções, por um lado, e na influência dos fatores sociais, culturais e históricos, por outro. O seu principal foco de interesse é a cognição, o pensamento, a tomada de decisões, a linguagem, o reconhecimento de padrões visuais, auditivos ou conceptuais, ou o comportamento inteligente em geral. Não deixa de ser um território bastante lato. Como é que o abordam?

Os cientistas cognitivos, apesar das suas diferenças disciplinares, partilham todos de uma grande suposição: a suposição de que existem representações mentais que podem ser analisadas independentemente da biologia e da neurofisiologia, do "*wetware*[1]" do cérebro, ao micronível dos neurónios, ou do contexto social e cultural, ao macronível da história. De uma forma simples e grosseira, as representações mentais — imagens na mente, conceitos, etc. — podem ser consideradas como existindo independentemente do mundo real. Posta desta maneira, a ciência cognitiva soa a platonismo, um estudo de objetos mentais incorpóreos que, de alguma forma, existem numa mente. Mas, de facto, os seus defensores não são platonistas. Aceitam que as representações mentais de que falam têm, necessariamente, um suporte material, apesar de eles próprios não quererem saber dos pormenores desse suporte.

Muitos cientistas cognitivos inspiraram-se no computador eletrónico. Veem o cérebro como um computador e a mente como um programa interno de comando geral, que manipula a informação. As representações mentais, de acordo com este modelo, são programas. Num verdadeiro computador, as manipulações propriamente ditas são efetuadas em "código-máquina", mas é o programa, escrito por uma pessoa, traduzido para código-máquina, que define a forma como a máquina processa a informação. A tese de alguns cientistas cognitivos é que os sinais eletrónicos em código-máquina, análogos aos sinais do neurocórtex do cérebro, são, na realidade, irrelevantes para a compreensão do funcionamento do programa — a mente. É o

programa que captura a essência da mente e das representações mentais. Têm a esperança de encontrar e compreender o programa — esquecendo o cérebro; esse programa fornecerá o mapa há muito procurado da mente humana. A descoberta de uma teoria tão profunda da mente iria "pôr fim ao problema da cognição". O programa, um conjunto de regras para a manipulação de símbolos, não necessita, sequer, do cérebro para correr; pode ser corrido num computador e atingir a inteligência artificial em substituição da natural.

Neste capítulo irei discutir uma visão crítica das ciências cognitivas. Trata-se de uma visão de um estranho que olha de fora, e não de alguém de dentro que olha para fora. Devo, desde logo, deixar claro que a minha crítica das ciências cognitivas não se concentra nas descrições do mundo mental baseadas na observação. Existe um vasto número de belas e exigentes observações experimentais da cognição humana e do comportamento animal. O que eu critico são as tentativas prematuras, por parte de alguns cientistas cognitivos, de encontrar uma teoria profunda da mente, da mesma forma que a teoria quântica é uma *teoria profunda* dos átomos ou a biologia molecular é uma teoria profunda da genética. O falhanço da psicologia cognitiva em descobrir uma tal teoria profunda fala por si. O meu próprio ponto de vista, formulado de forma simples, é que uma teoria profunda de cognição tem poucas hipóteses de existir, a não ser que se baseie na estrutura material do cérebro ou do computador.

Vejo três futuros possíveis maiores para as ciências cognitivas (que não são mutuamente exclusivos ou logicamente exaustivos). A primeira hipótese, e a mais entusiasmante, é que a base material e organizacional da cognição acabe, de facto, por ser encontrada — é "posto um termo" ao problema da cognição. A questão está em saber a que nível é encontrada esta organização cognitiva e até que ponto ela é simples ou complexa. Pode não existir nenhum programa da mente mais simples do que a própria rede neural, pode não existir nenhum estádio intermédio. Se esta perspetiva estiver correta, então a teoria profunda das ciências cognitivas incorporar-se-á ou nas ciências neurais ou na ciência dos computadores.

Uma segunda possibilidade consiste em as ciências cognitivas se desenvolverem como uma ciência matemática — ter-se-ia uma teoria exata da cognição, baseada na lógica. As ciências cognitivas tornar-se-iam então um ramo especial das matemáticas e poderiam ter pouco ou nada a dizer-nos sobre a cognição humana. No entanto, uma teoria matemática da cognição poderia ser verificada, usando inteligências artificiais, e revelar-se muito frutuosa.

Finalmente, aqueles a quem estes rumos não satisfazem e que pensam que a mente humana pode ser estudada independentemente do seu suporte material irão encontrar-se a navegar à deriva até encontrarem algo semelhante à literatura narrativa, que não é, de todo, uma ciência, embora possa ser tão interessante como ela. Talvez o "problema da cognição" não tenha solução, seja só um problema de como o cérebro funciona. A complexidade, pura e simples, do mecanismo de cognição irá impedir a descoberta de uma teoria profunda e a ciência cognitiva tornar-se-á uma atividade intelectual interpretativa e pluralista.

Para exemplificar o meu ponto de vista, consideremos a capacidade humana de produzir uma linguagem, uma capacidade que alguns cognitivistas se esforçam por compreender independentemente do funcionamento do cérebro, apesar de admitirem que a linguagem é produzida pelo cérebro humano. Consideram que analisando profundamente as linguagens humanas — frases e discurso enquanto forma de comportamento — irão compreender o mecanismo subjacente à linguagem. Embora a análise da linguagem seja uma tarefa, inteiramente legítima, válida e importante, creio que, na sua ambição mais geral, estão equivocados.

Francis Crick comentou uma vez: "Somos iludidos em todos os níveis da nossa introspeção." Eu iria um pouco mais longe: somos iludidos em todos os níveis do nosso *comportamento*. O comportamento é, evidentemente, real; mas, para o compreender, temos de entender os pormenores da sua produção no sistema nervoso: não podemos tratar o cérebro como uma "caixa negra" — um dispositivo de entrada-saída desconhecido. A linguagem é produzida no cérebro de uma forma, até ao momento, mal conhecida. Quando compreendermos a base

neurológica da linguagem, poderemos finalmente compreender a forma como os seres humanos produzem os milagres da fala e do pensamento linguístico.

O postulado central dos cientistas cognitivos — as representações mentais são programas — parece assemelhar-se aos postulados das ciências naturais. Os cientistas naturais, por exemplo, postulam que os genes existem e que o espaço-tempo físico é um espaço de Riemann curvo, a quatro dimensões. O modo como usam os postulados é também semelhante, é o que se chama "método postulacional de Einstein". Einstein, afastando-se do empirismo estrito dos físicos contemporâneos, descreveu ao seu amigo, o filósofo Maurice Solovine, o método que usou para criar a sua teoria da relatividade geral. Einstein dizia que a partir unicamente da intuição baseada na experiência se cria um postulado (para os cientistas cognitivos, este é o postulado de que as representações mentais são programas). O postulado não pode ser verificado diretamente, tal como a equação de Schrödinger, que descrevi atrás, o não pode. Mas, se o postulado for logicamente exato, é possível deduzir resultados a partir dele, e esses, sim, *já podem* ser verificados diretamente. Se os resultados falham, também falha o postulado, pois este está rigorosamente ligado a esses resultados. Se os resultados concordam com a experiência, aumenta a nossa confiança na validade do postulado. Vamos comparar a aplicação desta abordagem nas ciências natural e cognitiva, pois as diferenças são instrutivas.

Os exemplos da aplicação deste método abundam nas ciências naturais. A teoria clássica da genética representa um caso em que se deu uma reviravolta interessante. Baseando-se na observação da reprodução animal e vegetal, os naturalistas e os biólogos postularam a existência de genes. Os genes não podiam, pelo menos nas primeiras décadas deste século, ser vistos — não passavam de uma suposição; mas eram expressos por meio de características discretas, definidas, como o sexo dos animais ou a cor da sua pelagem. A regularidade observada a partir destas características correspondia aos resultados deduzidos a partir das regras genéticas postuladas. Mas a estabilidade genética geral dos organismos vivos sugeria aos cientistas que os genes tinham de ser algo mais do que uma entidade postulada; tinham de ter uma base material. Com a descoberta de que o ADN era essa

substância genética, com a dedução da sua estrutura molecular e com a compreensão do modo como o ARN sintetiza as proteínas, os genes puderam ser identificados como segmentos das moléculas de ADN ou ARN. Por este exemplo, vemos que a entidade postulada, o gene, não era um simples artifício matemático, mas um objeto material (mais exatamente, informação codificada num objeto material).

Um bom exemplo do campo das ciências cognitivas encontra-se na linguística. O seu problema central é: como é possível a linguagem? Os seres humanos têm uma capacidade que mais nenhum organismo tem — podem escrever e falar numa linguagem, exprimir os seus pensamentos de forma lógica com uma capacidade que, na literatura, se torna uma arte. Como é isto possível? Noam Chomsky iniciou uma revolução no campo da linguística no fim dos anos cinquenta e início dos anos sessenta, respondendo, de uma nova forma, a estas questões e colocando a linguística numa base axiomática rigorosa. Embora não haja, hoje em dia, muitos linguistas que mantenham as suas ideias originais, quase toda a linguística moderna é uma reação às ideias embrionárias de Chomsky. Uma revisão excelente e acessível pode ser encontrada no livro *The Mind's New* Science, de Howard Gardner, uma resenha histórica da ascensão das cópias cognitivas.

Chomsky partiu do princípio de que a sintaxe da linguagem — as regras gramaticais que nos dizem como certas palavras podem ser usadas numa frase — era autónoma, independente de outras características como a semântica ou a pragmática. Partia também do princípio de que a linguística era autónoma relativamente às outras ciências cognitivas — era uma área de investigação de pleno direito. Estas eram, na verdade, duas suposições heurísticas, destinadas a livrar a linguística e o estudo da sintaxe de outras preocupações. Ao restringir o foco da linguística, Chomsky esperava conseguir descobrir alguma coisa. E conseguiu-o.

Chomsky interessava-se pelo modo como as frases podiam ser geradas. Como podemos garantir que, de todas as combinações possíveis de palavras, só iremos produzir frases corretas? Em primeiro lugar, mostrou que algumas das antigas ideias

(chamadas "gramáticas de estado finito") ou não funcionavam ou não eram plausíveis. Mas não se ficou por aí, e postulou uma ideia nova — a gramática transformacional, que parecia funcionar. A suposição principal de uma gramática transformacional é que existe um conjunto de regras bem definidas pelas quais uma frase pode ser transformada noutra. Resumindo, existia um procedimento algorítmico capaz de converter a representação abstrata de uma dada frase noutra. Todas as frases corretas, afirmava Chomsky, podiam ser geradas desta maneira. Chomsky prosseguiu postulando a existência de um nível separado na mente — o nível transformacional — que realizava as transformações, tanto as necessárias como as volitivas, de uma frase. Este nível transformacional, que é uma representação mental no sentido da ciência cognitiva, podia ser visto como um programa interno para produzir frases.

Independentemente dos méritos da sua proposta, o trabalho de Chomsky originou um movimento entre os linguistas, no sentido de adotar métodos formais rigorosos no estudo da linguagem, e convidou a psicologia a fazer o mesmo. Chomsky via a mente como estando organizada em módulos, com diferentes partes relativamente independentes umas das outras. Como esta visão modular da mente sugere, esse autor estava empenhado no "mentalismo", a crença de que existem estruturas mentais abstratas no interior da mente que explicam o conhecimento. Estas características organizacionais da mente eram, nesta perspetiva, inatas, e não adquiridas mais tarde por meio da experiência.

Podemos propor uma vaga analogia entre as propostas de Chomsky sobre a produção de linguagem e o exemplo anterior do campo da genética. Tal como os primeiros geneticistas postulavam a existência do gene para explicar os padrões regulares da hereditariedade, Chomsky postula a existência de um nível transformacional para explicar os padrões da produção de linguagem. Os geneticistas, no entanto, descobriram que o gene tem uma base material o ADN , enquanto que até agora ainda não foi descoberta nenhuma base neuroanatómica para o nível transformacional ou os módulos mentais. Embora essa descoberta possa vir a surgir no futuro, duvido de que venha a assemelhar-se à descoberta do ADN e às suas implicações para a genética.

É evidente que Chomsky e outros não afirmam que estas representações mentais estão no cérebro; afirmam é que estão na mente. Não se conhece o suficiente da relação entre o cérebro e a mente para se determinar se o nível transformacional da mente tem uma correspondência na anatomia do cérebro. Este facto, no entanto, não escapa à crítica que eu partilho. Até que a mente e os seus módulos (se estes existirem) sejam compreendidos numa base material e, desta forma, dominados, os modelos da mente avançados pelos cognitivistas e outros irão proliferar, variar e deslizar com a maré da moda intelectual e com algumas descobertas e análises experimentais ocasionais.

Não é meu desejo, com estas críticas, minorar os efeitos extraordinários dos linguistas modernos — esses feitos são muito importantes para a descrição do fenómeno complexo da linguagem. A linguística, e o trabalho de Chomsky em particular, pode ser, realmente, vista como um ramo da matemática — portanto um dos ramos que as ciências cognitivas poderão tomar. As categorias de Chomsky, na sua teoria formal da linguagem, foram aplicadas, com êxito, a outras áreas exteriores à teoria da linguagem — as "linguagens independentes do contexto" usadas na definição de compiladores para computadores, dispositivos informáticos que executam a tradução de linguagens usadas pelas pessoas para linguagens próprias do computador — o código-máquina.

O trabalho dos linguistas que se esforçam por compreender as linguagens humanas propriamente ditas lembra-me o trabalho dos "eletricistas" americanos e franceses no final do século XVIII, e princípios do século XIX, que se esforçavam por compreender os fenómenos elétricos. Os seus resultados eram muitas vezes contraditórios (isso acontecia amiúde, porque não se apercebiam da influência da humidade nos seus instrumentos). Só ao fim de várias décadas começou a surgir uma descrição unificada da eletricidade e do magnetismo. Da mesma maneira, penso que o fenómeno da linguagem que os linguistas investigam hoje em dia virá a ser explicado com base no funcionamento e interação do cérebro com outros cérebros. Mas esse dia não está ainda para breve.

Tanto a questão do modo como as pessoas conseguem *falar* como a questão de como as pessoas conseguem *apreender* são grandes problemas cognitivos. A imagem do mundo exterior, focada em duas retinas na parte posterior do nosso olho, altera-se continuamente, à medida que nos movemos. Como podemos, então, apreender as imagens, apesar das suas mutações, e fazê-las corresponder a objetos? Como construímos a representação unificada e constante do mundo tridimensional visível, que está na nossa mente, a partir da barafunda de informação que se foca nas retinas bidimensionais dos nossos olhos?

David Marr, um investigador do laboratório de inteligência artificial do MIT, dedicou a sua vida a responder a estas questões até morrer prematuramente em 1980. Marr postulou que a visão envolvia a representação simbólica eficiente da imagem — de certo modo existiriam programas na mente que representariam a informação visual. O modelo de visão por ele desenvolvido, tal como o "mentalismo" de Chomsky, recorria a módulos no sistema visual. Esses módulos operavam independentemente entre si, computando diferentes características da informação visual — orientação, forma global, estereoscopia e movimento. Marr desenvolveu modelos específicos e pormenorizados de visão, nos quais punha em prática as suas ideias, que influenciaram profundamente o rumo futuro da investigação. Embora construísse e trabalhasse com computadores, Marr inspirou-se no cérebro e fez uso de muitos conceitos das ciências neurais. Não seria correto classificá-lo como um cognitivista acérrimo, apesar de partilhar algumas das suas ideias. O seu empenho intelectual dirigia-se para uma perspetiva altamente computacional da visão; para ele não existia qualquer correspondência predeterminada entre o observador e o objeto visionado. Em resumo, os programas de visão residiam sobretudo no cérebro do computador, e não no mundo exterior (embora Marr tenha incorporado restrições baseadas em características deste mundo). Quando o seu livro foi editado postumamente em 1984, os cientistas neurológicos já se haviam adiantado, tendo rejeitado muitos dos conceitos usados no seu livro.

O facto de os cientistas cognitivos não parecerem interessar-se pelo que se passa no mundo natural, mas apenas por computações, representações mentais e programas, perturba

muitas pessoas. As linhas de litígio entre os cientistas cognitivos e as ciências naturais, com a sua orientação materialista, podem, por vezes, ser traçadas com uma certa precisão (a meu ver, quando elas não puderem ser traçadas com tanta precisão, estar-se-á perante um sinal de progresso). O campo de investigação da visão chama-nos a atenção para essas linhas de batalha.

James J. Gibson, investigador da visão, e os seus seguidores põem em causa a abordagem computacional e cognitiva da visão. Na sua perspetiva, o mundo já contém toda a informação necessária à perceção. O mundo dos objetos visuais e a lógica desses objetos visuais é um programa que já existe. Vemos o mundo a três dimensões porque ele é tridimensional. Apesar de as nossas sensações se alterarem a todo o momento, apercebemo-nos da constância do mundo porque esta existe. Conforme escreveu Gibson: "Estou convencido de que a invariância parte da realidade, e não do contrário. A invariância temporal da matriz óptica ambiental não é construída ou deduzida: está ali à espera de ser descoberta." Mas a questão de saber como será descoberta mantém-se em aberto — é precisamente a essa questão que os cognitivistas se esforçam por responder. Para os cognitivistas, com o seu empenho em representações internas e não externas, as palavras de Gibson são uma declaração de guerra, e a batalha é encarniçada. A sua intensidade só diminuirá quando alguém construir um computador capaz de ver — reconhecer caras e identificar objetos — ou nós conseguirmos compreender a forma como o cérebro o faz. Muito tempo se pode passar, entretanto, e mesmo então as pessoas dividir-se-ão sobre a interpretação a dar a esse conhecimento.

O facto de podermos ver é algo que a maioria das pessoas dá como adquirido. Mas trata-se verdadeiramente de um grande mistério. Que se passa no interior do cérebro quando nós vemos? Ninguém acredita que exista um homúnculo, um homem muito pequenino, sentado no cérebro a observar o córtex visual. É mais fácil denunciar o sofisma do homúnculo do que evitar cair na armadilha desta forma de pensar. Tal como os geneticistas, que postularam a existência de genes, os investigadores da visão postulam a existência de representações visuais. Mas qual é a base material dessas representações? Acredito que os maiores passos no sentido de responder a estas questões não virão tanto

das ciências cognitivas, mas mais das ciências neurais. O ótimo trabalho desenvolvido ao longo das últimas três décadas pelos neurobiólogos David H. Hubel e Torsten N. Wiesel indica-nos a direção dos progressos futuros.

Ao contrário dos cognitivistas com a sua abordagem "a partir de cima", Hubel e Wiesel estudaram "a partir de baixo" a forma como a informação visual é processada ao longo de percursos neurais numa verdadeira estrutura material — o cérebro de um mamífero. A sua estratégia é descrita, por eles próprios, de uma maneira simples: "Começando, digamos, com as fibras do nervo óptico, registámos com microelétrodos os sinais provenientes de uma única fibra do nervo e tentámos descobrir como podemos influenciar mais eficientemente o disparo, estimulando a retina com luz. Para tal, podemos usar padrões de luz dos mais variados tamanhos, formas e cores, brilhantes ou escuros, em fundo ou invertidos, estacionários ou móveis. Pode demorar um certo tempo, mas, mais tarde ou mais cedo, somos compensados com a descoberta do melhor estímulo para o nervo que está a ser testado, no caso presente, um gânglio nervoso da retina."

Seguindo o disparo de nervos individuais, Hubel e Wiesel descobriram o facto notável de o córtex estriado reagir a orientações específicas das formas no campo visual. O córtex estriado consiste em várias colunas de neurónios em que cada coluna corresponde a uma orientação particular no campo visual — uma linha horizontal aciona uma coluna, e uma linha vertical, outra, sendo as outras colunas acionadas por orientações intermédias entre a vertical e a horizontal. Esta informação é então enviada a outras partes do cérebro. Permanece em aberto a questão de saber por que o cérebro organiza a informação visual desta maneira. É, contudo, claro, afirmam, que "estímulos particulares ligam e desligam os neurónios; grupos de neurónios executam, de facto, transformações particulares. Parece razoável pensar que se os segredos de algumas destas regiões puderem ser desvendados, com o tempo, outras regiões acabariam por revelar os seus segredos." Mas, até agora, não foram ainda desvendados os segredos profundos da visão.

Eric Kandel, um cientista neurológico da Universidade de Columbia, e os seus colaboradores levaram bastante longe esta

abordagem "a partir de baixo", estudando o sistema nervoso da *Aplysia californica*, um caracol marítimo simples. Começaram a descobrir a base da aprendizagem ao nível molecular. As mudanças comportamentais no animal, como seja a reação de retirada, são correlacionadas com a força das ligações nas sinapses (são alterados quer o número quer a atividade das cavidades que contêm neurotransmissores na junção pré-sináptica). Estas, por seu lado, alteram o ritmo de disparo do axónio.

Penso que é chocante o contraste entre as descobertas dos cientistas neurológicos e as da psicologia cognitiva. Apesar de ser muito mais difícil seguir a informação linguística do que a visual, creio que um dia a linguagem será compreendida, da mesma maneira que Hubel e Wiesel compreenderam, ainda que muito parcialmente, o problema do processamento da informação visual. Não será compreendida, no essencial, pela simples análise do modo como as pessoas produzem a linguagem, embora isso ajude imenso, como é evidente. No entanto, compreender o modo como é processada a informação visual ou linguística está muito longe de ser equivalente a compreender a visão ou a linguagem. Mas pode fornecer pistas sobre a forma como pode ser desvendado um enigma tão profundo.

Podemos concluir dos exemplos da investigação da visão e da linguagem que os cientistas cognitivos, de acordo com o seu postulado de que as representações mentais são programas, semelhantes aos de um computador, embarcaram num projeto de investigação muito ambicioso. Vamos supor que voltávamos agora à sala dos mapas da parábola do nosso rei-filósofo e dos seus doze sábios e púnhamos lá vinte génios contemporâneos (Herbert Simon, Allen Newell, John McCarthy, Marvin Minsky, Noam Chomsky, George Miller, Jerome Bruner, Jerry Fodor, Zenon Pylyshyn...) a quem encarregávamos de criar um mapa da mente humana. Penso que, ao fim de trinta anos, o trabalho dos vinte génios se assemelharia ao dos seus colegas do século XV — brilhantemente correto, em parte, mas um falhanço, no geral. E falhariam por uma razão muito semelhante — as atuais categorias de pensamento são inadequadas e a tecnologia disponível ainda não está à altura do problema. Mais do que isso: poderiam falhar devido ao facto de, ao contrário das ciências naturais, esse mapa

não existir. As representações internas, por eles imaginadas, existiam nas suas mentes, e não correspondiam a estruturas invariantes no mundo material. Alguns, duvidando do sucesso final da sua ciência, abandonarão o seu empenho numa noção de um mundo natural unitário, numa realidade aborígene, indo procurar refúgio numa visão pluralística de muitos "mundos" e suas "versões" advogada por Nelson Goodman.

É fácil criticar a ciência cognitiva. Para começar, o cérebro não é um computador digital programável — o modelo do cérebro está errado. Não existem sequer provas de que o cérebro tenha um programa interno, como o dos computadores digitais. De acordo com alguns cientistas neurológicos, o cérebro não tem nenhum "programa" de *software* — todo ele é *hardware* (ou, melhor dito, *wetware*). Não há dúvida de que o cérebro processa informação, mas fá-lo sem recorrer a um programa. Outras pessoas, como o filósofo John Searle, argumentaram que se existisse um tal programa interno o cérebro não funcionaria da maneira que funciona. Assim, o mapa maravilhoso — o programa interno — da mente humana, que alguns cientistas procuram, pode nem sequer existir — é uma espécie de miragem que se volatiliza quando a examinamos de perto. Nenhum modelo da cognição humana sobreviveu ao teste do tempo.

Apesar destas críticas (que só se aplicam ao trabalho de alguns cientistas), vejo com otimismo o futuro das ciências cognitivas, porque elas focam um conjunto de problemas que não vão simplesmente desaparecer. E, por esta razão, as ciências cognitivas não são uma moda intelectual passageira gerada pelo advento dos computadores eletrónicos. Mas, se os cientistas cognitivos procuram uma teoria profunda — uma representação interna — tanto da mente natural como da mente artificial, creio que terá de ser uma teoria sobre objetos materiais — o cérebro e os computadores a interagirem com o mundo. Se existirem os tipos de programas de que falam os cientistas cognitivos e esses programas forem a essência das representações mentais, terão de ser materialmente concretizáveis, não só em teoria (como uma espécie de modelo), mas também na prática. Temos de exigir às ciências cognitivas, como já o fazemos às ciências naturais, uma atitude estritamente construtiva. Alguns cientistas poderão levantar objeções, uma vez que nenhum cientista cognitivo

"credenciado" é um idealista, um platonista; eles são, muitas vezes, materialistas. Contudo, assemelham-se frequentemente a platonistas a viver num mundo de modelos ideais, programas de computador impraticáveis, um mundo de ficção científica e não de factos científicos, quando muito um mundo de objetos e relações matemáticos que não se aplicam ao universo em que vivemos. O estudo do cérebro e dos computadores reais em interação com o mundo é o futuro das ciências cognitivas, se é que esse futuro existe. Receio que, sem uma dedicação às ciências naturais e o enraizamento das ciências cognitivas na verdadeira ordem material do mundo, estas irão assemelhar-se cada vez menos a uma ciência experimental e navegar à deriva, como uma espécie de literatura narrativa, uma visão intelectual vazia, ainda que de nível elevado; serão, quando muito, uma teoria matemática da mente que nada tem a ver com as mentes naturais ou artificiais. Como cientistas, não devemos, a fim de construir uma ponte entre a ciência e as humanidades (como alguns psicólogos cognitivos já tentaram), cortar as nossas raízes das ciências naturais. Nenhuma ponte poderá, então, manter-se de pé.

Nos comentários que se seguem, tentarei descrever sucinta e individualmente o que vejo serem as opções futuras de uma ciência cognitiva empírica — o estudo do cérebro e dos computadores —, como se fossem áreas distintas da investigação e não se sobrepusessem (o que pode muito bem ser o caso). No entanto, antes de descrever a arquitetura das ciências cognitivas, seria útil explicar alguns conceitos que trarão alguma luz a essa descrição. O primeiro conceito é o significado das expressões "a partir de cima" e "a partir de baixo". Cientistas e filósofos estão sempre a usá-las. O segundo conceito centra-se na distinção entre "sinais" e "símbolos" ou entre "sintaxe" e "semântica".

As expressões "a partir de cima" e "a partir de baixo", tal como são usadas por cientistas e filósofos, referem-se à direção que se segue ao tentar resolver um problema. O "cimo", num sistema material, representa as suas características macroscópicas ou globais, a "base", as suas características microscópicas ou locais. Por exemplo, no caso do cérebro a interagir com o corpo e com o mundo o "cimo" representa o comportamento ou a cognição por parte do organismo, e a "base", os acontecimentos eletroquímicos que se passam no cérebro. Tanto o "cimo" como a

"base" podem exibir um comportamento regular, governado por regras. O problema está em encontrar uma relação entre os dois. Pode-se trabalhar como um psicólogo, "a partir de cima", ou como um cientista neurológico, "a partir de baixo", na tentativa de resolver este problema.

Estas expressões podem ser usadas num sentido diferente, embora relacionado, para designar a relação causal das partes com o todo, sendo as partes a "base" e o todo o "cimo". Normalmente, a relação é clara nas ciências naturais: o comportamento das partes determina o todo. É por isso que os cientistas naturais andam sempre à procura das leis microscópicas que regem o sistema que exploram — as leis dos átomos, para compreender a química, e a estrutura do ADN, para compreender a genética. As ciências naturais adotam a explicação "a partir de baixo".

Mas nas ciências cognitivas a situação é muitas vezes, se bem que nem sempre, invertida — a abordagem "a partir de cima", em que o todo determina as partes, parece ser a mais frutuosa. Por exemplo, os linguistas tentaram durante muitos anos abordar "a partir de baixo" o problema da explicação do discurso e da ação. A abordagem começava com as regras de construção das frases; as frases, por seu turno, determinavam a pragmática, e esta, por fim, determinava o discurso e a ação. Mas todas as tentativas para avançar nesta direção falhavam, porque as frases eram construídas pelo emissor com a intenção de preencher um contexto de significado completo — existia consciência de toda a situação por parte do emissor. Da próxima vez que o leitor disser qualquer coisa, mesmo que não passe de uma única frase, se refletir sobre tudo o que, à partida, assume como certo para que a frase tenha sentido — o sítio onde está, a sua posição social, o contexto que partilha com a pessoa a quem se dirige e tudo o resto —, verá até que ponto o significado das frases depende do contexto. Parece evidente que, de alguma maneira, começamos por compreender, na qualidade de emissores, a situação como um todo, e só depois construímos as frases — uma abordagem "a partir de cima". Uma teoria do discurso e cognição humanos que não leve isto em conta irá falhar por certo.

Uma perspetiva "a partir de cima" semelhante está bem patente nas descobertas de Roman Jakobson e dos seus colegas da escola de fonética de Praga. Descobriram que fonemas individuais — os "átomos" sonoros da fala — não têm significado individual; o significado surge da sua combinação. Mais uma vez, o contexto determina o significado.

Um segundo conceito que trará alguma luz às abordagens que as pessoas têm efetuado às ciências cognitivas é a distinção entre "sinais" e "símbolos" ou "sintaxe" e "semântica". Por "sinal" estou-me a referir a uma marca física — um risco numa folha de papel, uma unidade de fluxo magnético no disco de memória de um computador. Exemplos de sinais simples são o 0 e o 1 no código binário. Um sinal, por si próprio, não tem qualquer significado. Mas um conjunto de sinais diferentes pode ser manipulado (os sinais são objetos físicos) de acordo com regras preestabelecidas. Essas regras são a "sintaxe", a gramática, dos sinais. Os sinais são entendidos "a partir de baixo" — as regras de sintaxe dizem tudo o que há a saber sobre um sinal: *definem* o sinal.

Por vezes fica-se com a sensação de que um sinal "quer dizer alguma coisa" devido à forma como é manipulado; mas isso é só a nossa projeção do significado sobre um sinal. Por exemplo, se os sinais "2" e "3" forem manipulados da mesma forma que manipulamos os números dois e três, então torna-se fácil atribuir aos sinais o seu significado respetivo. Mas essa atribuição é da nossa responsabilidade.

Os "símbolos", pelo contrário, têm um significado que lhes atribuímos — têm um conteúdo "semântico". São, tal como os sinais, representados fisicamente, mas o seu significado não o é (pelo menos, não é imediatamente evidente como se representa fisicamente um significado; presume-se que o cérebro o faz de alguma maneira). Os símbolos dependem do contexto, o seu significado depende das situações em que surgem. Existem símbolos, tal como o sinal "2", aos quais atribuímos um significado elementar, e símbolos complexos, como uma bandeira nacional. Mas não temos aqui de nos preocupar com os diferentes tipos de símbolos. O importante é que os símbolos são reconhecidos "a partir de cima"; em primeiro lugar, apercebemo-nos do contexto total de um símbolo, e só depois vemos as suas "partes".

Os símbolos são aquilo a que Hilary Putnam, seguindo Wittgenstein, chamou "conceitos agregados". A imagem que se ajusta a um conceito agregado é a de uma corda, que, apesar de ser uma unidade, é, na realidade, constituída por muitas fibras, nenhuma das quais se estende ao longo de toda a corda. Da mesma maneira, os símbolos, designando o significado que representam, são unidades compostas e estão abertos a muitas interpretações. A letra "A", por exemplo, é um símbolo. Pode-se referir à primeira letra do alfabeto, ao artigo definido do singular feminino, a uma quantidade desconhecida numa equação algébrica ou ao pecado do adultério no livro *The Scarlet Letter*, de Hawthorne — um conteúdo rico em possíveis significados abertos. Devido a essa abertura, os símbolos não são facilmente definíveis — a sua definição depende do contexto — e não estão sujeitos a um conjunto simples de regras de manipulação. No seu livro *Metamagical Themas*, Douglas Hofstadter inclui uma discussão excelente e mais pormenorizada sobre aquilo a que chama símbolos passivos (sinais) e símbolos ativos (símbolos), que reforça a breve discussão e a distinção que aqui deixei.

Apesar da minha tentativa de realçar tanto quanto possível a distinção entre sinais e símbolos, não é muito certo que sinais e símbolos sejam, realmente, coisas distintas. Ao fim e ao cabo, somos nós que atribuímos o significado. Podemos, e fazemo-lo muitas vezes, atribuir significados a simples sinais, que se tornam então símbolos. Da mesma maneira, os símbolos podem não passar de representações muito complexas e abrangedoras de sinais. Talvez os símbolos obedeçam, *realmente*, a regras formais, mas estas regras sejam muito complicadas, tão complicadas que não as possamos expor facilmente. Se pudéssemos, de alguma maneira, obter os símbolos a partir dos sinais, a semântica a partir da sintaxe, a distinção que fizemos desapareceria. O problema que se põe para o conseguir é o da representação do conhecimento: como poderemos encontrar um sistema físico de sinais, regido por regras definidas, que incorpore o conteúdo e o significado? É evidente que o nosso cérebro o consegue. Ao nível neural, ele é uma rede de sinais. Contudo, ao nível comportamental, reage ao conteúdo e ao significado. Ninguém sabe como o faz.

Depois de assentes os conceitos de "a partir de cima" e "a partir de baixo", bem como as noções de "sinal" e de "símbolo", não é difícil dar uma visão geral simplificada das ciências cognitivas. Os cientistas cognitivos estudam duas entidades principais, nomeadamente, o cérebro-mente e os computadores.

Aqueles que estudam o cérebro-mente podem de igual maneira ser aproximadamente divididos em dois campos — os psicólogos cognitivos, que estudam o funcionamento do cérebro-mente numa perspetiva "a partir de cima", e os cientistas neurológicos, que estudam o cérebro "a partir de baixo". Regra geral, os psicólogos interessam-se pelo estudo dos fenómenos de duração superior a cerca de um milésimo de segundo, e os cientistas neurológicos, pelos fenómenos de duração inferior.

Os cientistas que se dedicam ao estudo dos computadores também podem ser grosseiramente divididos em dois campos — os computacionalistas, cujo lema poderá ser "os sinais são símbolos", e os conexionistas, cujo lema poderá ser "dos sinais aos símbolos". Os computacionalistas veem a essência da cognição como um programa que manipula símbolos. Dão como exemplo de inteligência artificial as máquinas que provam teoremas da lógica por manipulação de sinais — algo que os seres humanos têm dificuldade em fazer e que é, de certeza, um sinal de comportamento inteligente. A filosofia conexionista já foi descrita anteriormente, no capítulo "Conexionismo/Redes neurais". Os conexionistas acham que não se pode obter o "significado" muito facilmente a partir da manipulação de sinais num computador. Acham que a ideia que os computacionalistas fazem de significado é apenas a sua projeção de significado sobre aquilo que não passa de sinais. Os conexionistas vão buscar a sua inspiração à rede complexa do cérebro e procuram, em parte, imitá-la num computador (ou num conjunto de computadores paralelos). Para eles, o essencial da cognição é a capacidade de responder ao significado — a informação depende do contexto —, e isto tem menos a ver com programas e com computação do que com a maneira como a própria máquina é construída — com a sua rede de ligações.

Esta perspetiva simplificada das ciências cognitivas é desesperantemente inadequada se se considerar a natureza

interdisciplinar da ciência e os campos de interesse sobrepostos. Ninguém se senta simplesmente num campo ou noutro. No entanto, achei que poderia ser útil. Historicamente, o campo computacional, dos cientistas de computadores, e a psicologia cognitiva cresceram juntos durante as décadas de 50 e 60. Os desenvolvimentos mais recentes, durante as décadas de 70 e 80, são o campo conexionista e os novos progressos nas ciências neurológicas. A minha própria opinião é que muitas das ideias dos computacionalistas e dos primeiros psicólogos cognitivos não funcionaram — o programa intelectual inicial falhou no essencial. Esses nobres falhanços, contudo, inspiraram as novas abordagens dos conexionistas e dos cientistas neurológicos que agora progridem, apesar de ainda terem a sua promessa por cumprir. Também podem vir a falhar. A história das ciências cognitivas exemplifica, esperemos, o aforismo de Reinhold Niebuhr. "Por vezes, a verdade chega à história montada em cima do erro."

Há duas abordagens principais ao estudo do cérebro e das suas manifestações cognitivas e comportamentais — a abordagem "a partir de cima", dos psicólogos cognitivos e comportamentais, e a abordagem "a partir de baixo", dos cientistas neurológicos.

Na abordagem "a partir de cima", os psicólogos examinam a sistemática da cognição e do comportamento humano e animal, confiando, para isso, na observação direta ou em relatos humanos. Estas experiências rigorosas são muitas vezes ingénuas, fornecendo resultados definidos, e frequentemente surpreendentes a respeito da aprendizagem, da memória, da perceção visual e auditiva, da tomada de decisões e da linguagem.

Estes resultados impressionam-me sobretudo porque são surpreendentes. Nos meus tempos de estudante, ofereci-me como voluntário para algumas experiências de psicologia; aprende-se sempre alguma coisa. Lembro-me de ouvir uma vez uma fita magnética repetitiva — uma fita em ciclo que repetia vezes sem conta a mesma palavra inglesa nos meus auscultadores. Ao fim de um bocado, supunha-se que eu deixaria de ouvir essa palavra, começando a ouvir distorções — outras palavras inglesas —, apesar de continuar a ser repetida a mesma palavra. Disse para mim mesmo: "Bem, isso não se irá passar comigo; vou-me concentrar a sério." Mas a minha concentração não serviu de

nada, porque a aparência de distorções tem a ver com a forma como o cérebro trata a informação repetida. Para minha grande surpresa e satisfação, em breve ouvi outras palavras inglesas. A questão de saber a origem dessas palavras ainda hoje me intriga.

Alguns dos trabalhos experimentais mais interessantes realizados pelos psicólogos cognitivos situam-se na área das imagens invisuais internas. Nos primeiros anos setenta, Roger Shepard, um psicólogo da Universidade de Stanford, e os seus colegas mostraram a várias pessoas duas figuras geométricas dispostas em duas orientações diferentes e pediram-lhes que verificassem, o mais rapidamente possível, se as duas imagens eram realmente iguais. O tempo de resposta era diretamente proporcional ao ângulo de rotação entre as duas figuras. Era como se as pessoas tivessem formado uma imagem mental dos objetos e depois rodassem um deles para verificar a correspondência. Tal como para objetos reais, o tempo necessário para o fazer era proporcional ao ângulo de rotação.

Stephen Kosslyn conduziu o seu trabalho noutras direções. Numa experiência típica, mostrava aos seus pacientes um cenário de objetos familiares, pedindo-lhes que memorizassem a imagem. Pedia-lhes depois que recordassem a imagem nas suas mentes e que movessem um ponto negro imaginário de um objeto da imagem imaginada até outro. O tempo que demorava a realizar esta operação era, mais uma vez, proporcional à verdadeira distância dos objetos na imagem real — como se percorressem a imagem nas suas mentes. Kosslyn não se ficou por aqui e construiu modelos de computador deste processo.

Apesar de a maioria das pessoas ter poucas dificuldades em formar imagens mentais (um facto que é apoiado por este tipo de experiências), algumas pessoas não partilham a interpretação de que estas imagens são "imagens na mente". Dizem isto porque os computadores não usam imagens. Apesar de o trabalho de Shepard e Kosslyn vir em apoio da noção cognitivista de uma representação interna do conhecimento (a imagem) que pode ser estudada independentemente do cérebro, alguns fundamentalistas cognitivos acham que eles foram longe demais. Estes cognitivistas estritos, como Zenon Pylyshyn, pensam que as imagens não passam de um subproduto de um programa — um conjunto de

regras que incorpora desejos e crenças. Procuram uma representação computacional única e irredutível da cognição. Tal como os átomos são os blocos de construção da matéria, esta representação única será o bloco de construção de todos os acontecimentos mentais. A noção de que a mente tem uma multiplicidade de representações mentais distintas, como sejam proposições linguísticas, imagens visuais ou memórias acústicas, é por eles recebida com o mesmo entusiasmo que o monoteísta devota ao paganismo.

Na minha opinião pessoal, seria notável que a evolução (em sentido figurado), já que se deu ao trabalho de desenvolver o sistema visual, não lhe tivesse dado outros usos, como sejam a representação interna de imagens. O cérebro é constituído por diferentes partes, cada uma com diferentes funções, e estas podem, com certeza, representar a informação de diferentes maneiras. Dizer que só existe um único sistema de representação (que não seja a própria rede neural) é ultrapassar a evidência atualmente existente.

Os psicólogos cognitivos realizaram muitas experiências diferentes que revelaram aspetos do funcionamento mental. O que eu critico, por achar extremamente prematuro, é a tentativa de extrapolar esses conhecimentos experimentais para a construção de um programa do funcionamento do cérebro — um mapa invariante da mente. Talvez um dia se consiga; mas esse feito basear-se-á, como todos os mapas das ciências naturais, numa ordem material — neste caso, a ordem material do cérebro a interagir com o mundo.

Se se pretende compreender a função cognitiva dos seres humanos, aposto que os cientistas neurológicos, com a sua abordagem "a partir de baixo", têm maiores hipóteses de sucesso a longo prazo, na descoberta de como o cérebro produz o fenómeno biológico de uma mente — com a sua capacidade de consciência, crenças e emoções. É pena que não haja mais cientistas neurológicos a interessar-se pela mente e pelas representações mentais, mas talvez isso seja por acharem que "o primeiro milho é dos pardais". Muitos acham que a "mente" é um conceito bastante impreciso e evitam qualquer discussão a esse respeito. Mais do que a maioria das pessoas, os cientistas

neurológicos estão cientes da imensidão da sua ignorância sobre o funcionamento do *cérebro*. Em 1978, o neurobiólogo David Hubel escreveu: "O nosso conhecimento do cérebro está num estado muito primitivo. Embora em relação a algumas zonas tenhamos desenvolvido uma espécie de conceito funcional, outras zonas há, de dimensões comparáveis às do punho de um homem, acerca das quais se pode quase dizer que estão no mesmo estado de conhecimento em que estava o coração antes de nos apercebermos de que servia para bombear o sangue."

Se eu não estiver enganado a respeito da existência de mapas coerentes, universais e vulneráveis e de um território material correspondente a esses mapas, então a única esperança de descobrir uma tal teoria da mente humana é examinar a mente como algo apoiado num cérebro que interage com o mundo material. Não se sabe, sequer, se isto é possível, mas as tentativas de encontrar esses mapas teóricos que não se baseiem nas ciências neurológicas e na ordem material do mundo exterior estão, desde logo, condenadas ao fracasso. O trabalho experimental realizado pelos psicólogos cognitivos será essencial para este esforço de encontrar uma teoria científica da mente. Como duas equipas de escavação a cavar um túnel em sentidos opostos, juntando-se no meio da montanha, espero que os psicólogos cognitivos, com a sua abordagem "a partir de cima", avancem metade do caminho, para se encontrarem com os cientistas neurológicos e a sua abordagem "a partir de baixo", num terreno intermédio. Já surgiram alguns avanços, sobretudo na área de perceção sensorial.

Um exemplo numa outra disciplina científica em que a abordagem "a partir de cima" e a abordagem "a partir de baixo" se juntaram num terreno intermédio é a genética, como já referimos. A genética clássica adotou, como a psicologia cognitiva, uma abordagem "a partir de cima". A observação de regularidades nas características discretas dos organismos vivos, ao longo de uma sucessão de gerações, sugeriu a existência de uma ordem por trás da aparência — genes expressos no organismo. Aqui, o "cimo" são as características observadas das plantas e dos animais e a "base" são os genes postulados e as suas leis de combinação. Os biólogos moleculares desenvolveram uma abordagem "a partir de baixo", depois de a base material da

genética ter sido estabelecida. Os genes eram pedaços de ADN ou ARN portador de mensagens, que se codificavam para a síntese da proteína. As leis genéticas anteriormente descobertas podiam agora ser assentes numa base firme da interação molecular. A descoberta do ADN confirmou, portanto, aquilo de que outras pessoas já suspeitavam — as regularidades genéticas tinham uma base material; os biólogos moleculares descobriram o código. A abordagem molecular "a partir de baixo" e a abordagem da genética clássica "a partir de cima" juntaram-se ao nível do gene. O gene podia ter sido um conceito platónico, um artifício matemático; mas não foi. Tinha uma base material.

Neste caso, as abordagens "a partir de cima" e "a partir de baixo" complementaram-se, porque existe um "desacoplamento causal" entre as leis da química e a forma como as proteínas são sintetizadas — uma vez compreendido o modo como a fabricação de proteínas está codificada no ARN, podem-se esquecer as leis da química em que se baseia essa codificação. Existe, frequentemente, uma interrupção conceptual muito conveniente na cadeia reducionista causal que liga os níveis microscópico e macroscópico. Esta interrupção, ou "desacoplamento causal", pressupõe a perspetiva reducionista da natureza — o todo é igual à soma das suas partes. O desacoplamento limita-se a refletir o facto de que muitas vezes não necessitamos de conhecer todos os pormenores do mundo microscópico para aplicar as regras válidas para um mundo maior. Para compreender as regras da síntese de proteína é necessário compreender os pormenores químicos; mas pode-se esquecer a química quando se aplicam as regras.

Este "desacoplamento causal" ilustra uma característica importante dos mapas científicos — o fenómeno é muitas vezes observado "a partir de cima", mas acaba por ser compreendido "a partir de baixo". Mendel pôde deduzir corretamente as leis da genética sem o auxílio de um microscópio. Mas para se compreender por que se aplicam estas leis, e não outras, é necessária uma compreensão ao nível microscópico — ao nível do ARN e do ADN.

Será que este exemplo poderá servir de lição à psicologia cognitiva? Tal como os geneticistas clássicos, os psicólogos cognitivos postulam a existência de uma ordem, do tipo da ordem

genética, para além das aparências. Normalmente, esta ordem é colocada sob a forma de um modelo — como os numerosos modelos do modo como a memória humana é armazenada no organismo. Embora estes modelos não sejam inconsistentes com a noção geral de que existe uma base material para a memória humana, ninguém demonstrou ainda, exatamente, como é que a memória é representada no cérebro. É certo que o cérebro não faz como um computador — não realiza armazenamento local. Os modelos holográficos de memória — a noção de que a memória é armazenada globalmente, e não localmente — também têm os seus problemas. Nenhum dos modelos, por si só, é adequado (embora haja alguns desenvolvimentos interessantes sobre as propriedades coletivas das redes neurónicas e o conhecimento da anatomia neural do hipocampo, uma parte do cérebro que desempenha um papel chave na memória, se esteja a expandir). Então como é que o cérebro, com a sua centena de biliões de neurónios, faz? Ninguém sabe a resposta exata, nem mesmo para organismos mais simples, com muito menos neurónios que o nosso cérebro. Os psicólogos cognitivos não conseguiram ainda, apesar da enorme quantidade de dados disponíveis sobre a memória, a visão, a audição, a aprendizagem e tudo o resto, construir um mapa científico que explicasse todos esses dados. Pode haver várias explicações para esse insucesso.

A primeira explicação é a inexistência de semelhante teoria, exceto a própria rede neurónica — a hipótese de não existir nenhum estado intermédio nem nenhum "desacoplamento causal". A ser verdade, seria uma grande desilusão e implicaria a impossibilidade de uma teoria profunda da cognição. Uma segunda possibilidade é existir uma teoria simples que, entretanto, ainda não foi encontrada. Embora sendo certamente a hipótese mais desejável, surpreenderia que fosse verdade, em vista de todos os esforços já envidados no sentido de encontrar uma teoria simples. O mais provável é que uma teoria intermédia seja extraordinariamente complicada — que existam diferentes teorias para os diferentes tipos de memórias e de objetos e relações recordados. A existirem teorias da memória (exceto a rede cerebral), isso significaria com toda a probabilidade que existe, efetivamente, um "desacoplamento causal" da memória em relação aos pormenores do neurocórtex, idêntico ao "desacoplamento causal" da síntese da proteína em relação às leis

da química. A minha conjetura é que, se existir um nível intermédio, a sua descoberta surgirá a partir da cooperação entre as ciências neurológicas e a psicologia — nunca de uma só.

Bem ou mal, as ciências cognitivas inspiraram-se no computador eletrónico. Ao contrário do cérebro, que foi concebido pelo demiurgo e é, em grande parte, desconhecido, os computadores foram concebidos por engenheiros e são totalmente conhecidos. Mas alguns cientistas cognitivos não se interessam especialmente pelo *hardware*, pela arquitetura ou pela conceção do computador; interessam-se por aquilo que se pode *fazer* com os computadores. Aquilo que se pode fazer com os computadores não só em teoria, mas também na prática, é determinado, em primeiro lugar, pela sua própria conceção e, em segundo lugar, pelo programa — e suas instruções. E aquilo que se pode fazer com os computadores digitais correntes é computar — nem mais, nem menos.

Por tradição, os cognitivistas só prestavam atenção ao programa, não à máquina em si mesma, nem às suas capacidades. Adotaram a orientação da escola formalista da matemática, em lugar da intuicionista. Imaginavam os computadores, se é que se davam ao trabalho sequer de pensar neles, como computadores de "*Gedanken*" — máquinas especificadas matematicamente, mas fictícias. Tudo o que fosse formalmente computável (por definição, essencialmente) podia ser computado num computador de "*Gedanken*' bastante simples, a máquina de Turing universal.

Normalmente, imaginamos as máquinas de Turing a fazer cálculos matemáticos, a provar teoremas e a fazer manipulações de sinais. Estas máquinas mecanizaram as matemáticas e forneceram uma definição simples e clara de "computável" — um problema calculável por uma máquina de Turing. Em princípio, contudo, pode-se imaginar uma máquina de Turing a processar os sinais que usamos na linguagem corrente — o alfabeto. O alfabeto pode ser traduzido para código binário e, desta forma, introduzido numa máquina de Turing. De acordo com os cognitivistas, qualquer entrada de informação arbitrária, desde que coerente — como por exemplo a frase "Então como vai?" —, pode, pela operação de um conjunto de regras (o programa), ser

transformada por um destes computadores numa saída de dados como "Vou bem, obrigado!" O programa podia, em resumo, simular a inteligência; pelo menos, é esse o nome que lhe daríamos se surgisse num ser humano. Mas não passaria de uma pequena máquina de Turing a executar as suas instruções à manivela.

Não pretendo, nesta altura, envolver-me numa polémica sobre se um tal sistema formal de regras para a manipulação de sinais — o programa — pode ou não, em princípio, simular uma conversa "humana" de modo a podermos atribuir inteligência ao computador programado. Mas é claro que, na prática, esta simulação não pode ser efetuada em qualquer computador existente, devido às limitações do *hardware* e do *software*. A perspetiva intuicionista da matemática, ao contrário da perspetiva formalista, exige que se construa, realmente, o programa. Uma perspetiva ainda mais forte — a que chamei a "perspetiva construtivista" — exige que se construa, ou pelo menos se conceba, também o computador. Ainda não foi feito. Há alguns obstáculos de ordem prática. Em primeiro lugar, a troca de palavras, acima enunciada, deverá ter lugar dentro do tempo de vida do universo; mesmo que soubéssemos programá-los, os computadores mais rápidos da atualidade não poderiam simular uma conversa "humana" durante muito tempo. Em segundo lugar, os computadores reais estão sujeitos a erros aleatórios durante a sua operação; embora os erros possam ser minimizados aumentando a redundância dos componentes do computador, o número de componentes aumentaria de tal maneira que, para correr sem erros um programa formal do tipo considerado, seria necessário um computador com uma massa superior à do universo. Estes são, como é evidente, limites especulativos, mas mostram bem que, se os cientistas cognitivos e os investigadores da inteligência artificial estiverem interessados em usar o computador como o paradigma conceptual, deverão falar de programas e de computadores verdadeiros, e não de computadores de "*Gedanken*". Felizmente, muitos já o fazem, e os que o fazem estão, como poucos, cientes dos problemas enormes que se lhes deparam para atingir uma verdadeira inteligência artificial.

As pessoas gostam de estabelecer uma comparação entre o cérebro e os computadores, umas vezes por divertimento, outras vezes a sério. Essas comparações são uma reedição das comparações entre a mecânica e o funcionamento do corpo humano, que tiveram tanta influência em França, na sequência dos trabalhos de Descartes. A medicina cartesiana dizia que o organismo era uma espécie de autómato, em que os ossos faziam de vigas, os músculos, de molas elásticas, e os tendões, de cabos. Julien Offroy de La Mettrie, um fisiologista cartesiano, escreveu no seu livro *L'Homme machine*: "O corpo humano é uma máquina que dá corda às suas próprias molas." É evidente que o corpo humano tem uma mecânica, e, algumas das suas partes são muito bem descritas por princípios da engenharia mecânica. Mas escapam a esta abordagem os pormenores importantes que, mais tarde, foram descobertos — a organização celular e molecular dos ossos, dos músculos e dos órgãos, ou seja, a engenharia biológica do corpo humano. E, como sempre, Deus reside nos pormenores.

Muitos cientistas responsáveis fogem à comparação entre o cérebro e os computadores. Herbert Simon, cujo livro *The Sciences of the Artificial* ajudou bastante a promover a perspetiva computacional e o desenvolvimento da inteligência artificial (IA), comentou: "Não creio que a neurofisiologia tenha feito muito em prol da IA, e não creio que a IA tenha feito muito em prol da neurofisiologia." No campo oposto, Vernon Mountcastle, um neurofisiologista distinto, concorda: "Nenhuma descoberta fundamental há-de vir do computador. Poderão vir ideias estimulantes e hipóteses verificáveis, mas não se pode descobrir nada." A geração mais jovem, no entanto, é mais interdisciplinar e desloca-se livremente do estudo do cérebro para o estudo dos computadores.

Quando, no século XIX, chegou a altura de melhoramentos radicais nos sistemas de transportes humanos, as pessoas não construíram veículos com pernas mecânicas (estes só agora estão a ser construídos — e os problemas são consideráveis), construíram comboios com rodas, mais tarde apareceram os automóveis e, por fim, os transportes aéreos. Estes meios de transporte artificiais transformaram a vida humana. Da mesma maneira, o aperfeiçoamento dos computadores irá fazer avançar a construção de verdadeiras inteligências artificiais. Mas estas serão

tão parecidas com a inteligência humana como as rodas com as pernas de um homem. Acho que isso é uma vantagem interessante. A inteligência artificial, por exemplo, não será limitada pela evolução ao processamento de informação espacial em apenas três dimensões, será capaz de processar num número arbitrário de dimensões. E nunca se fatigará.

A perspetiva conexionista dos computadores emergiu, em parte, como uma reação à visão computacional estrita e, em parte, também como resposta ao advento de um novo tipo de computador — os computadores dedicados a fins especializados, construídos manualmente a partir de *microships*. Este novo desenvolvimento permite aos conexionistas experimentar diretamente as suas próprias ideias de redes, em lugar de terem de recorrer a computadores centrais de grande porte. Os conexionistas vão buscar muita da sua inspiração aos cientistas neurológicos e à arquitetura do cérebro, que procuram muitas vezes emular nas suas conceções de computadores. A sua ambição é construir redes neurais que "vejam", "ouçam", "leiam" e "aprendam", compreendendo. Estão empenhados na ideia de que uma rede de ligações eletrónicas é mais importante para a simulação de inteligência do que um programa interno. É evidente que, em princípio, um programa complexo pode sempre simular uma rede eletrónica, mas, em termos práticos, fá-lo de uma maneira excessivamente lenta. Ainda não é certo se as ideias conexionistas são suficientes para se construírem tais máquinas. Só o tempo o dirá.

Na minha opinião, os programas internos que os cognitivistas procuram na mente não existem, pura e simplesmente, a menos que se possa mostrar diretamente que são suportados materialmente por uma função neurológica definida. Qualquer teoria profunda da cognição que pretenda manter-se tem de prever algum tipo de "desacoplamento causal" entre as representações do conhecimento e o seu suporte material; mas esse "desacoplamento causal" tem que ser demonstrado, não basta ser postulado. Nesse sentido, então, a possibilidade de existência de uma ciência cognitiva dependerá, de forma crítica, do que for descoberto pelas ciências neurológicas. No fim, tanto os componentes da ciência cognitiva que sobreviveram como as ciências neurológicas se tornarão parte das ciências da

complexidade que agora emergem — a nova fronteira inexplorada das ciências naturais e a visão integrada do cosmo que elas implicam.

Mesmo que exista alguma espécie de programa interno que descreva a mente, como os cientistas cognitivos esperam, a teoria profunda desse programa terá de ser baseada nas ciências neurológicas, tal como a química se baseou na teoria quântica. A complexidade deste empreendimento é enorme e desdobrar-se-á no futuro. As pessoas que se opõem a esta perspetiva reducionista apontam o facto de que possuímos crenças, temos uma mente e uma consciência — essas categorias da vida psicológica são, para eles, irredutíveis a funções biológicas. No entanto, eu contradigo essas opiniões, dizendo que os termos "consciência" e "mente", usados de maneira vaga, como nós fazemos, não se referem a nada que possamos estudar cientificamente. Acredito que no futuro, com o avanço das ciências cognitivas e neurológicas, esses termos serão substituídos por outras categorias mais exatas de pensamento para descrever as nossas experiências mentais, categorias essas que poderão também entrar na linguagem popular. Até lá, teremos de nos remediar com estes conceitos vagos, mas nem por isso menos importantes. A nossa descendência intelectual perdoar-nos-á.

Vale a pena recordarmos, neste contexto, que muitos cientistas eminentes, no século XIX, pensavam que a vida dependia de uma "força vital" e que sem essa força os organismos seriam matéria morta. Para esses vitalistas era impensável que a vida pudesse existir sem uma força vital. Se se pudessem mostrar as descobertas da bioquímica moderna a esses vitalistas, a sua reação, provavelmente, seria: "Mas então onde é que entra a força vital?" Da mesma maneira, se se pudessem confrontar alguns filósofos com uma ciência neurológica futura, eles poderiam reagir, perguntando: "Mas então onde é que entra a consciência?" O que eu quero dizer é que alguns problemas filosóficos não se resolvem. Em vez disso, o enquadramento das categorias de pensamento acerca dos problemas é alterado tão drasticamente pela ciência que as questões deixam de fazer sentido.

Por vezes ponho-me a contemplar, maravilhado, o edifício que a ciência construiu. Não foi todo construído de uma vez só. Algumas partes estão em ruínas. Foram cometidos muitos erros. Isso pode parecer uma pena, mas não é. Enquanto as ciências, incluindo as ciências cognitivas, se mantiverem vulneráveis ao erro e à ruína, podem provar que estão certas e aguentar-se durante muito, muito tempo.

Uma grande ciência procede tal como no Antigo e no Novo Testamento. Primeiro, surge uma sucessão de profetas: Isaías, Jeremias, Ezequiel e Oseias. Estes profetas alertaram o povo de Israel; são os intérpretes de Deus. Mas estes profetas são limitados, e só detêm uma parte da verdade. Além disso, existem profetas falsos e profetas verdadeiros, sendo, na altura, difícil distingui-los. Quando Isaías previu a derrota frente a uma nação arrogante, estava a chamar os Israelitas à atenção de que estavam no mau caminho. Decerto que eles não concordaram que estavam no mau caminho, troçaram dele, e pensaram vencer a guerra então iminente. Não há dúvida de que os falsos profetas da altura disseram aos Israelitas aquilo que eles queriam ouvir. O que define o "verdadeiro" profeta é que a sequência dos acontecimentos acaba por lhe dar razão. Os falsos profetas são esquecidos, e os verdadeiros profetas ficam na Bíblia. O sistema profético é, como a evolução, um sistema seletivo. O que está "certo" e concorda com o ambiente sobrevive.

Ainda não sabemos se os profetas da "revolução cognitiva" são verdadeiros ou falsos. Ainda não podemos saber se os mapas que, segundo eles, descrevem a mente existem mesmo. Só o tempo o dirá.

Por vezes os verdadeiros profetas falam da chegada de um messias — um indivíduo com inspiração divina, que tem acesso direto ao espírito de Deus e que revela toda a verdade e não apenas uma parte. Nas ciências naturais — a física e a biologia — assistimos a uma sucessão de profetas e fomos também privilegiados com alguns messias — um Isaac Newton, um Albert Einstein, um Charles Darwin —, os gigantes que estabeleceram um calendário de investigação para os próximos séculos.

Ainda me lembro daquelas pessoas à espera da chegada dos extraterrestres, na costa sul de Big Sur. Aguardavam uma revelação — talvez um messias que ainda não tivesse chegado. Da mesma maneira, as ciências psicológicas e sociais aguardam a chegada do seu messias. Ainda podem ter de esperar muito tempo. E essa espera agrava-se quando nos apercebemos de que, tal como os profetas, os messias também podem ser falsos.

[1] O autor faz aqui um pequeno jogo de palavras, pois se a parte física do computador é conhecida por *hardware* (*hard* = duro), ele acha que a parte física do cérebro deve ser conhecida por *wetware* (*wet* = molhado). (*N. do T.*)

CAPÍTULO 10

– O HOMEM QUE CONFUNDIU O SEU CÉREBRO COM A SUA MENTE –

"Sem dúvida que faremos tudo para que seja como dizes", respondeu, "mas como havemos de te enterrar?"

"Como melhor vos aprouver"', disse Sócrates, "se me conseguirem apanhar, e eu não vos fugir."

PLATÃO,

Fédon

Sou verdadeiramente distinto do meu corpo e... posso viver sem ele.

RENÉ DESCARTES,

Sexta Meditação

Durante o Verão, costumo começar o meu dia com uma corrida no Henry Cowell State Redwood Park, no distrito de Santa Cruz, uma floresta amena coberta com pau-brasil californiano, de segundo crescimento. As árvores gigantescas são das poucas árvores de grande porte que podem florescer num solo tão fortemente ácido (que elas próprias produzem) como este e encontraram aqui o seu lar definitivo. A terra está coberta de arbustos e fetos; por vezes, vejo grandes lesmas-da-banana, movendo-se lentamente na humidade, deixando um muco viscoso no seu rasto. Uma grande parte do pau-brasil original foi cortada depois do terramoto de San Francisco, tendo sido usada na reconstrução da cidade. Tocos com dois e três metros de diâmetro, chamuscados e degradados, lembram a presença destes gigantes. É uma corrida agradável, através das árvores gigantes e do ar limpo, ao longo de um carreiro, junto a um fio de água que desagua no rio San Lorenzo e, por fim, no Oceano Pacífico, alguns dez quilómetros mais à frente.

Quando acabo o percurso, costumo encontrar o meu vizinho "Cowbou Bill", que vem dar de comer ao seu garanhão árabe, num estábulo próximo da sua casa. Bill é um conhecedor de cavalos.

Nasceu na Califórnia, trabalhou na região em torno do vale de Livermore e tem agora mais de noventa anos. Já não mostra a mesma firmeza e o mesmo espírito de há alguns anos: é uma mente velha num/corpo velho. Mas é uma máquina do tempo viva que pode recordar uma Era já desaparecida. Recorda-se do terramoto de San Francisco de 1906; era ele uma criança e o seu pai, caminhando entre as ruínas, retirou-o do interior do hospital de San Francisco.

Tinha andado a ler alguma história local e pensei que seria giro experimentá-la com o Bill. Há um ribeiro, aqui próximo, chamado Love Creek[1], e tinha alguma curiosidade em conhecer a origem do nome. Vim a saber que se chamava assim em homenagem a uma personagem verdadeira, o jurista Harry Love, "o Cavaleiro Negro do Zayante", que vivera ali próximo no século passado. Love morreu em 1868, num duelo com um homem que ele achava estar a prestar demasiada atenção à Sr.ª Love. Já era famoso por ter defrontado Abraham Lincoln na guerra do Falcão Negro, servindo na Tropa Montada do Texas, e por ter morto Joaquin Murieta. Murieta, um bandido notável, de ascendência espanhola, começou como fazendeiro, mas um grupo de gringos[2] violou e assassinou a sua jovem esposa. Murieta tornou-se então um bandido, pilhando, roubando e assassinando muitas pessoas. Era o chefe de um bando — um herói popular para uns, um assassino terrível para outros. Em 1853 a Assembleia Estadual da Califórnia fez de Love capitão e autorizou-o, em conjunto com uma companhia de polícia montada, a limpar os bandidos do Estado. O capitão Love e os seus homens decidiram apanhar Murieta. Houve um tiroteio no condado de Tulare e, quando o pó assentou, Love regressou com as cabeças de Murieta e do seu homem de confiança, Joãozinho Três-Dedos, que mostrou ao governador a fim de receber a recompensa de cinco mil dólares. A cabeça, preservada num frasco com álcool, foi exposta ao público.

O velho Bill escutou, sem denotar qualquer emoção, a história que eu tinha aprendido. Quando acabei, disse: "Quando era pequeno, o meu pai conheceu Joaquin Murieta. Costumava alugar cavalos a ele e ao seu bando. Ele viu essa cabeça, e não era a cabeça de Joaquin Murieta." Depois fixou os meus olhos, confrontando a sua experiência com a minha simples aprendizagem, e disse: "E era uma vez essa história!"

Na defensiva, rejeitei a resposta de Bill, dizendo a mim mesmo que ela não passava de uma velha história de *cowboys*. Esqueci-me dela. Seis meses depois da nossa conversa, foi publicado um novo livro: *Early California Bandits*, do historiador Frank Latta. Latta tinha entrevistado os descendentes de Murieta, na década de 30. De acordo com Latta, o Cowboy Bill estava certo: Love nunca o tinha apanhado. Murieta foi ferido mortalmente num tiroteio com um bando rival, conseguiu regressar a sua casa em Niles Canyon Road e ali morreu. A família enterrou-o, em segredo, na sua própria casa. (Em 1986, no entanto, tentou-se encontrar o seu corpo, sem quaisquer resultados.)

Quando estou em forma, faço a minha corrida matinal pela floresta quase sem esforço. Entrego o meu corpo a um dos meus parceiros silenciosos e, liberto de sensação de grande esforço (não puxo muito), fico livre para pensar. O meu corpo e a minha mente, movendo-se juntos, em harmonia, pelo mundo, formam uma parelha estranha, mas necessária. Tenho andado a refletir sobre esse par e o problema que ele representa, o problema do corpo-mente. Como pode uma mente imaterial estar ligada a um corpo material?

É um problema filosófico antigo, e digo desde já que não proponho uma solução simples. Mas julgo saber como poderá, e não poderá, ser resolvido. O que se segue são as minhas reflexões sobre este paradoxo — uma "corrida" pelo problema do corpo-mente. Não será tão simples como uma corrida nos bosques da Califórnia; é fácil tropeçar e uma pessoa cansa-se depressa. Sinto, contudo, que qualquer pessoa refletida deve, mais tarde ou mais cedo, chegar a uma conclusão sobre o paradoxo do corpo-mente; é uma prova dos nove das disposições filosóficas, ou mesmo metafísicas, de uma pessoa. O facto de ser um teste tão difícil pode ser uma das razões por que tão poucas pessoas estão dispostas a submeter-se-lhe.

Lembro-me, como se fosse hoje, de quando, ainda criança, me apercebi, pela primeira vez, da independência da minha mente em relação ao mundo e às mentes das outras pessoas. Apercebi-me disso quando compreendi que podia esconder informações aos meus pais e às outras pessoas. A minha mente era um mundo

privado, ao qual só eu tinha acesso (mais tarde descobriria que esse acesso era limitado), e competia-me a mim decidir se os outros deviam partilhar o meu território mental. Esta descoberta, apesar de implicar a separação e possivelmente a solidão, estimulou a minha crescente autonomia.

Fiquei impressionado com o poder e a capacidade da linguagem: com uma simples troca de palavras podia entrar diretamente na mente de outra pessoa, ou outra pessoa podia entrar na minha. Assim, apesar de a minha mente ser privada, estava ligada, por símbolos visíveis e invisíveis, a uma comunidade de outras mentes, que se estendia desde o passado distante até ao futuro. Havia uma certa liberdade na atividade da minha mente — podia imaginar muito mais do que podia ver ou fazer, fantasias que pouco tinham a ver com este mundo. O meu corpo, pelo contrário, estava sujeito às leis da biologia e da física — as leis materiais deste mundo. A imagem que adquiri de mim próprio era a de um robô molecular magnífico com "um fantasma dentro da máquina". O dualismo, que a cultura incentivava, entre o mundo livre da minha experiência subjetiva, por um lado, e o carácter objetivo de um mundo que eu não controlava, por outro, teve um grande impacto no meu pensamento, especialmente durante a adolescência.

A adolescência é muitas vezes vista como o período da vida que coincide com o despertar sexual do organismo e com as mudanças familiares e sociais que esse despertar provoca. Mas é mais do que isso. E é mais porque quando o organismo atinge a sua maturidade sexual apercebe-se também de que a morte faz parte do processo biológico. O sexo e a morte são duas faces da mesma moeda biológica. Para além disso, como seres humanos sujeitos aos processos da vida neste planeta, não temos propriamente direito de escolha. Esta circunstância agrava a distinção entre o nosso corpo limitado e a nossa mente autónoma, aparentemente ilimitada. Da tensão provocada pela perceção do nosso ser biológico emerge a noção de uma alma imortal. Não constitui assim surpresa que para muitos jovens a adolescência termine com o confronto com o eu mais profundo e com uma necessidade de posicionamento metafísico. O resultado desta confrontação pode alterar o rumo de uma pessoa.

Tradicionalmente existe um grande número de reações diferentes à distinção aparente entre o mundo da mente e o mundo material, incluindo o corpo humano. Tanto a religião como a lei, quer explícita quer implicitamente, tomam posição relativamente a este assunto, porque na verdade os valores humanos e culturais são profundamente influenciados pela nossa posição perante ele. Algumas culturas veem os mundos da mente e da matéria como coisas diferentes. O mundo da matéria é totalmente determinado; trata-se de um mundo do qual o indivíduo não se pode libertar, a não ser pela iluminação. A vida mental de uma pessoa é vista como algo determinado por uma cadeia de acontecimentos interminável. Na nossa cultura ocidental, pelo contrário, acreditamos que somos mentalmente livres. Damos valor à liberdade de pensar e agir como pretendemos, e somos, portanto, responsáveis pelos nossos atos e pensamentos. Mas, se a mente humana não é, realmente, independente do corpo e dos processos biológicos que o regulam, que é que então resta da nossa liberdade?

Embora as respostas à distinção do corpo-mente sejam variadas, existem duas tendências principais — o monismo, que mantém que a distinção entre a mente e a matéria é só aparente, e o dualismo, que mantém que essa distinção é real e essencial. Irei discutir cada uma destas duas tendências. Mas, em primeiro lugar, gostaria de chamar a atenção para a distinção entre a "perspetiva da primeira pessoa" e a "perspetiva da terceira pessoa", uma distinção que considero importantíssima e que ajudará a clarificar a discussão seguinte.

A perspetiva da primeira pessoa é aquela que eu, como indivíduo pensador e com sentimentos, tenho do mundo. A minha própria história passada, as minhas crenças, opiniões e emoções influenciam esta perspetiva que, em toda a sua complexidade, me é própria. Trata-se da perspetiva da minha consciência como só eu próprio a posso ver; a voz dentro de cada um de nós que grita para o universo: "Porquê eu?" Esta é a perspetiva celebrada por filósofos existenciais como Kierkegaard, que via a fé como a paixão mais alta da subjetividade humana, ou Martin Heidegger, que via a essência da subjetividade humana como "*Dasein*" — estar no mundo. A filosofia de *Dasein* de Heidegger, o seu modelo do ego, faz-me lembrar as descrições do antigo templo de

Jerusalém. O exterior do templo era muito ornamentado, mas à medida que se penetrava no interior os ornamentos desapareciam, até que por fim, no compartimento mais interior, o santo dos santos, a sala estava completamente vazia. Da mesma maneira, a essência do *Dasein* é o nada, um facto que se tenta ocultar com os ornamentos da existência.

A perspetiva da primeira pessoa é o ponto de partida para muitos grandes filósofos; é o sítio onde me encontro quando penso. E não posso negar que penso, porque o próprio ato da negação afirma que penso. Este desenvolvimento, estendido logicamente, conduz à filosofia transcendental — uma ciência pura do ego, examinado introspetivamente, uma visão filosófica levada à sua formulação mais alta por Edmund Husserl. Esta visão transcendental contrasta radicalmente com a orientação extrospetiva das ciências naturais.

A posição da minha consciência quando adoto a "perspetiva da primeira pessoa" consiste em considerar que os meus pensamentos e proposições são verdadeiros para mim. O sinal lógico da perspetiva da primeira pessoa é que as proposições podem ser precedidas por "Eu penso ou sinto que..." Não pretendo sugerir que a perspetiva da primeira pessoa é caprichosa, arbitrária ou "meramente subjetiva". Não o é necessariamente. Toda a matemática, a estrutura lógica dos juízos, podem ser vistas como um exemplo de uma perspetiva de primeira pessoa. O leitor e eu concordamos, portanto, em muitas coisas. Mas a nossa experiência dessa concordância é forçosamente distinta.

O facto de as pessoas poderem estar de acordo sobre o mundo conduz à possibilidade de uma nova perspetiva — a perspetiva da terceira pessoa. Ninguém, como é evidente, pode ter, verdadeiramente, a consciência de toda a gente ou mesmo de um grupo (exceto em fantasia), devido à natureza singular e particular da nossa consciência. Contudo, a minha consciência pode tomar a posição de que as suas proposições são verdadeiras não só para mim, mas para toda a gente. Esta perspetiva da terceira pessoa é adotada não só na vida de todos os dias, mas, com um rigor maior, nas ciências naturais. As proposições da terceira pessoa podem ser verificadas por qualquer pessoa competente, independentemente das suas ideias sociais, religiosas

ou políticas; destinam-se, na sua conceção, a ser verdadeiras para qualquer pessoa. O sinal lógico da perspetiva da terceira pessoa é que as proposições podem ser precedidas por: "Nós pensamos que..."

Todos nós nascemos com a perspetiva da primeira pessoa. A perspetiva da terceira pessoa é uma conquista. Esta última perspetiva reconhece explicitamente a independência do mundo material e matemático dos acidentes e peculiaridades da consciência individual que conhece o mundo. A perspetiva da terceira pessoa é imperfeita, mas pública; as respetivas proposições podem ser falsificadas, ao contrário do que acontece na perspetiva da primeira pessoa. Contudo, o facto de ser de todo possível implica que a ciência é também possível.

Os monistas da mente acreditam que a distinção entre a mente e o mundo é uma ilusão, sendo consequência da impossibilidade de uma reflexão profunda sobre a realidade. Argumentam que tudo o que poderei alguma vez conhecer aparece como conteúdo da minha mente; mesmo o mundo exterior é parte desse conteúdo. Aquilo que se vê "lá fora" — o mundo material — *é* a mente.

Uma história de três monges Zen serve para ilustrar esta perspetiva. Os três monges veem a bandeira de um templo a agitar-se. O primeiro monge diz: "A bandeira está a mover-se." O segundo monge diz: "Não, o vento é que se está a mover." O terceiro monge diz: "A mente é que se move."

Podemos ver, segundo esta perspetiva, que não existe "exterior" ou "interior"; tudo faz parte da consciência, mesmo o mundo material. Os monistas atingiram uma espécie de união com a existência; todo o universo se transforma numa trama rica e complexa de representações mentais. O mundo material é único e muito peculiar, contendo um grande número dessas representações mentais. Vou dar uma ilustração elementar, se bem que algo bizarra, que também transmite a ideia do monismo mental.

Uma vez dois engenheiros queriam construir um modelo computacional de um processo físico que tinha a ver com um

problema aerodinâmico. Decidiram construir um computador simples, especialmente concebido para modelar computacionalmente esses processos físicos. Quando estavam a planear o computador, surgiu um amigo. Este afirmou-lhes que estavam a perder o seu tempo. Disse-lhes que, em vez de construírem um computador pequeno para um fim específico, deviam antes modelar esse computador num supercomputador mais poderoso que já existia. Podiam depois correr o seu computador original "dentro" do supercomputador. Dito e feito. O interessante é que o dispositivo de *hardware* se tornou *software* dentro do computador maior. Talvez (e penso que os monistas da mente iriam concordar) todo o *hardware* que observamos à nossa volta — o mundo material — seja como o computador pequeno dentro do supercomputador: nada mais, realmente, do que *software*, uma representação de informação. Tudo é mente. Podia-se, como é evidente, dizer com igual convicção (como o fariam os monomaterialistas) que tudo é, realmente, matéria, incluindo a própria consciência.

A maioria dos cientistas naturais têm tendência a ser monomaterialistas e não monistas da mente. Acreditam que tudo pode ser explicado por uma descrição materialista e que nada mais é necessário. No exemplo anterior, dos engenheiros e dos seus computadores, os monomaterialistas salientariam que tudo não passa de *hardware*, incluindo o computador pequeno "dentro" do computador grande. Chamariam a atenção para o facto de o computador pequeno, que na realidade não passa de um programa de *software*, possuir uma representação material dentro do computador grande — o armazenamento de informação em fitas e memórias magnéticas, etc. Aquilo que se pensa ser processamento de *software* corresponde, na verdade, a processos materiais que ocorrem no *hardware*.

Quando se chega ao problema do corpo-mente, chama-se aos monomaterialistas "teóricos da identidade" — eles acreditam que os estados da mente são idênticos aos estados do cérebro. Dito de maneira simples, a mente é idêntica ao cérebro e às suas funções. A dificuldade com a teoria da identidade não é tanto a questão de saber se está certa ou errada, mas mais a de conhecer o seu significado. A mente é um conceito um tanto "difuso". "Estado cerebral" é um conceito igualmente difuso, especialmente quando

se ensaia uma definição operacional — dizer como vai ser determinado o estado do cérebro. Se examinarmos de perto a posição de alguns teóricos da identidade, descobriremos que o estado da mente e o estado do cérebro são, por *definição*, idênticos. Essa conclusão não nos serve de nada.

Alguns filósofos avançam com a teoria da identidade, insistindo dogmaticamente em que esta é a única visão razoável e desenvolvendo uma fantasia materialista para apoiar a sua pretensão. Trata-se de um monomaterialismo que se torna verdadeiro por definição. Como cientista natural, concordo que a teoria da identidade — com a sua pretensão de que a consciência é um fenómeno biológico e pode ser estudada como tal — está *em princípio* correta. Mas discordo daqueles que afirmam que a teoria da identidade é um facto ou um facto a ser estabelecido por uma previsível investigação futura. Penso que o problema do corpo-mente apresenta, *na prática*, mais desafios, como irei descrever a seguir.

A posição monista (pelo menos em algumas das suas versões) é irrefutável. Não é possível pôr em causa esta perspetiva por meio de argumentações filosóficas ou demonstrações empíricas. Pode-se discutir indefinidamente se é verdadeira ou falsa, sem nunca se chegar a qualquer conclusão.

Penso que a posição monista, porque é irrefutável, é um beco sem saída. Se uma ideia sobre a natureza da realidade não se "move" ou aprofunda ao longo do tempo, deve tratar-se de uma ideia terminal — um beco sem saída. Não é aqui possível nenhum programa de investigação. Como um sem-número de espécies animais, que, apesar da sua magnificência, se extinguem quando o ambiente muda, as posições filosóficas também se extinguem quando não se conseguem modificar. O monismo, ao afirmar o colapso dos mundos mental e material num só mundo, privou-se a si mesmo de um desafio interno que lhe poderia ter dado uma maior vida filosófica. O dualismo, pelo contrário, mantém uma tensão entre o mental e o material, apresentando desta forma uma motivação de transformação e mudança.

Um dos insucessos do monismo radical foi o não ter conseguido reconhecer a distinção lógica entre as perspetivas da

primeira e da terceira pessoa e ter feito cair essa distinção numa ou noutra categoria. A totalidade da existência torna-se ou uma representação na minha mente (uma mente universal) ou um processo material, que inclui a própria *consciência*. Embora isto possa ser efetuado, trata-se de um processo regressivo: a capacidade de estabelecer distinções não deve ser esquecida numa busca de unidade e totalidade da existência. A unidade da existência limita-se a *estar ali*; tomará conta de si mesma. O nosso papel, como seres pensadores com sentimentos, é compreender como se atinge essa unidade, e para o conseguir é necessário realizar distinções categóricas apoiadas pela experiência. E o dualismo realiza essa distinção.

O filósofo francês do século XVII René Descartes é o fundador moderno do dualismo. Em 1637 publicou o seu *Discurso do Método*, e, pouco depois, quando vivia numa quinta da Baviera, escreveu as suas *Meditações* (publicadas em 1641). Estas duas obras, pela sua simplicidade e poder conceptual, alteraram a perspetiva filosófica do Ocidente, influenciando todo o rumo futuro da filosofia. Escrevendo na primeira pessoa, só admitia no seu raciocínio "ideias claras e distintas". Conceitos matemáticos, como os objetos da geometria de Euclides — pontos, linhas, triângulos —, eram um paradigma dessas "ideias claras e distintas". Usando o método de duvidar sistematicamente da existência de tudo, tanto no mundo físico como no mental, concluiu, com toda a certeza, que a única coisa de cuja existência não podia duvidar era o facto de pensar. Descartes, na mais alta tradição do racionalismo, colocou a essência do ser no pensamento.

Aplicando o seu método filosófico de dúvida sistemática, Descartes dividiu a existência em dois mundos: o mundo material dos objetos extensos, que podiam ser examinados pelas ciências naturais, e o mundo conceptual dos objetos mentais — pensamentos, sentimentos, crenças. A distinção categórica entre mente e matéria tornou-se uma constante da filosofia ocidental desde então. Não conheço ninguém que se sinta inteiramente bem com esta distinção, pois o universo é necessariamente um ser e não dois. Contudo, ele existe, apesar de tudo.

Descartes via o organismo como um autómato complexo, uma máquina, e a mente, como uma entidade imaterial independente,

com as suas próprias regras. Estava ciente da dificuldade de encontrar uma solução para o problema do corpo-mente — como pode a mente imaterial interagir com o corpo material? Embora tenha avançado algumas sugestões no seu último livro, *Paixões da Alma*, nenhuma delas teve muito sucesso. A sua abordagem do problema do corpo-mente era interdisciplinar, baseando-se no seu conhecimento polimático de medicina, óptica, geometria e linguagem. Mas nunca conseguiu resolver o problema.

Apesar destas dificuldades, o ponto de vista de Descartes da existência (o cartesianismo) influenciou profundamente o modo de pensar no seu tempo e apoiou filosoficamente a revolução científica então emergente, que os seus contemporâneos Johannes Kepler e Galileu haviam começado. Mais do que as descobertas científicas pontuais que Descartes realizou, com especial realce para a relação entre a álgebra e a geometria, foi o seu estilo de pensamento, a visão geral da realidade expressa nos seus escritos filosóficos, que mais vincadamente marcou a sua Era e que fez dele um autor fundamental. No centro dessa visão geral estava a imagem cartesiana do universo e do organismo como uma máquina complexa gigantesca.

O rápido progresso das ciências naturais nas décadas que se seguiram à morte de Descartes arredou de vez o escolasticismo e o humanismo anteriores. A exigência de "ideias claras e distintas" foi satisfeita pelas ciências e pelas matemáticas, tendo diminuído o papel, até então respeitado, das humanidades — literatura, justiça, história, arte —, para as quais pareciam faltar "ideias claras e distintas". Com os sucessos da mecânica de Newton na explicação da dinâmica do sistema solar, a visão mecanicista geral promovida pelos seguidores de Descartes parecia triunfar. A reação ao cartesianismo, contudo, não se fez esperar.

A reação mais convincente partiu, poucas décadas depois da morte de Descartes, de Giambattista Vico, filósofo e historiador napolitano. Vico defendia a integridade da tradição humanística. Embora aceitasse o dualismo cartesiano, insistia em que o cartesianismo estava totalmente invertido. Não era o mundo natural que a mente humana podia esperar compreender intimamente; ao fim e ao cabo, o mundo natural tinha sido criado pela vontade inescrutável de Deus. Eram antes as próprias

criações da mente humana — a literatura, a justiça, a história, a arte, os próprios objetos do estudo humanístico — que se poderiam vir a compreender inteiramente, com claridade e exatidão, visto serem criações nossas. Numa famosa passagem bem ilustrativa, Vico explicava:

> Na noite de espessa escuridão que envolve a antiguidade primitiva, tão distante de nós próprios, brilha a luz eterna e infalível da verdade para além de qualquer dúvida: o mundo da sociedade civil foi, por certo, criado por homens e os seus princípios podem, por isso mesmo, ser encontrados dentro das modificações da mente humana. Quem quer que reflita sobre isto não pode deixar de se surpreender por os filósofos terem desviado todas as suas energias para o estudo do mundo natural, o qual, havendo sido criado por Deus, só pode ser conhecido por Ele; e por, com isto, terem negligenciado o estudo do mundo das nações, ou mundo civil, o qual, tendo sido criado pelos homens, estes podem esperar vir a conhecer.

Vico colocou, desta forma, as ciências no seu lugar — as ciências são o estudo do mundo material extenso, um mundo estranho para a nossa humanidade. As humanidades, pelo contrário, examinam a complexa rede da sociedade civil, um mundo que conhecemos porque nos conhecemos a nós mesmos; este é o domínio da mente, no qual os nossos pensamentos, sentimentos, afetos, opiniões, esperanças e terrores são a matéria da existência. O que podemos verdadeiramente conhecer são os atos da nossa mente, as mentes das outras pessoas e o mundo social, nunca o mundo natural.

A fenda entre as "duas culturas" — as humanidades e as ciências — é um produto do dualismo cartesiano de há mais de três séculos atrás. É uma fenda que nunca foi tapada, porque é uma fenda na estrutura da própria existência humana.

Aceitando o dualismo categórico entre a mente e a matéria como uma divisão inerente da existência, surge um problema fundamental — o problema do corpo-mente —, que foi reconhecido por Descartes. Embora a mente imaterial e o mundo material sejam distintos, não são independentes um do outro; é claro que cada um interage com o outro e influencia-o. Como pode uma entidade imaterial — a mente — influenciar o mundo material?

Para dar mais ênfase a este paradoxo, imaginemos que se disseca um organismo humano — que faz parte do mundo dos objetos extensos —, para se descobrir onde é que a mente imaterial tem o seu ponto de influência. É evidente que o tronco, os membros e os órgãos internos, à exceção do cérebro, podem ser excluídos. (Curiosamente, os embalsamadores egípcios não concordavam com isto: preservavam cuidadosamente o coração, o fígado e os pulmões, mas deitavam fora o cérebro, que consideravam refugo. Foi Galen, um fisiólogo romano, quem primeiro demonstrou, no século II, que a mente estava assente no cérebro.) Surge então a questão: onde, no cérebro, é que "eu" resido? Algumas partes do cérebro podem ainda ser eliminadas. (Descartes pensava que a alma residia na glândula pineal, na base do cérebro.) Acabam por restar os centros de linguagem, componentes do córtex cerebral, como candidatos para eu "me" albergar. É possível imaginar que se se tentasse ir mais longe nesta localização alguma propriedade geral do cérebro seria perdida — juntamente com o ego. Todavia, a questão mantém-se — como é que este pedaço de massa cinzenta produz os sentidos de autoconsciência e atenção e como é que, faltando este pedaço, não passamos de autómatos complexos? Descartes perante o facto de os animais não poderem produzir uma linguagem, pensou que lhes faltava o pedaço crucial — *eram* autómatos e não tinham almas imortais.

A ideia de dissecar o organismo e o cérebro para chegar à mente parece bizarra, idiota até. Como se pode, mesmo em princípio, chegar à estrutura da vontade e da consciência pura através do estudo de um objeto material extenso — o cérebro?

Os filósofos e os cientistas tomaram várias posições diferentes, todas dentro do mesmo enquadramento do dualismo, em relação a este paradoxo — chamarei a essas posições "dualismo categórico", "dualismo de substância", "dualismo de propriedades" e "dualismo epistémico". Já é uma boa quantidade de dualismos. Mas estas distinções ajudar-nos-ão a desenredar os vários pontos de vista do problema do corpo-mente. A minha própria avaliação destes pontos de vista não é imparcial, atendendo ao meu desejo de ver o problema do corpo-mente como um problema investigável, com lugar marcado no calendário da ciência empírica.

A posição do dualismo categórico é muito simples. O corpo e a mente referem-se a entidades que são categoricamente distintas; trata-se de tipos lógicos diferentes. Comparar a mente ao corpo é o mesmo que comparar, por exemplo, justiça com carne. Uma das entidades está no domínio dos conceitos; a outra, no domínio dos objetos materiais. O problema corpo-mente, portanto, surge simplesmente devido a uma confusão de tipos lógicos.

Esta posição é defensável (no sentido de poder ser mantida consistentemente), mas não é investigável. Se a mente e o corpo pertencem a tipos lógicos diferentes, a sua relação não pode ser investigada. Algumas pessoas, não satisfeitas com o "truque lógico" do dualismo categórico, insistem em que nos apercebemos do corpo e da mente como pertencentes ao mesmo tipo lógico. Sendo o cérebro uma entidade material, se a mente é do mesmo tipo lógico, também tem de ter alguma espécie de existência substancial. Esta abordagem leva-nos, pois, à posição do "dualismo substancial".

A perspetiva do dualismo substancial afirma que a mente existe independentemente do corpo, mas interage com ele. Vários filósofos, incluindo Karl Popper, bem como neurologistas, incluindo John C. Eccles, são desta opinião. A sua perspetiva, um tanto ou quanto simplificada, consiste em que a mente existe num espaço mental, exterior ao espaço e ao tempo, e o cérebro não passa de um órgão complexo que atua como um "recetor de rádio" da mente, traduzindo os seus pensamentos em movimentos corporais do organismo. Como é evidente, se se interferir com o cérebro, como pode acontecer num acidente cerebral ou durante uma neurocirurgia, as transmissões podem ser alteradas. Mas não se deverá concluir desta alteração que a mente é produzida pelo cérebro, tal como não se deveria concluir que a música de uma orquestra sinfónica é produzida por um rádio se, quando se retirasse um componente do rádio, a música parasse. Tantos aspetos da nossa experiência mental corrente — o sonhar, o sonhar acordado, a imaginação — parecem não ter qualquer suporte material que faça supor que a mente pode existir sem o cérebro. Esta conclusão é partilhada por outros dualistas de substância, incluindo Descartes.

De facto, se examinarmos a ideia de uma mente "substancial" sem suporte material, do ponto de vista da ciência moderna, vemos que ela não é defensável. A ser alguma coisa, a mente representa informação e implica que a memória exista. O facto de a informação ser transformada pela minha mente é autoevidente de cada vez que tento recordar o dia dos meus anos, ou a cara de um amigo. De acordo com a física, qualquer transferência de informação ou sinalização requer uma alteração de energia. Para além disso, não há nenhuma maneira de provocar uma alteração de energia ou de matéria que não seja por uma mudança de espécie — uma cadeia infindável de acontecimentos materiais. Esta circunstância é tão válida para a mecânica quântica quanto para a física clássica anterior — nenhuma informação pode ser transmitida sem haver uma transmissão de energia. Qualquer característica da nossa vida mental que implique processamento de informação tem de ter um suporte material.

Allen Newell e Herbert Simon, dois dos fundadores da ciência cognitiva, pensam que esta ideia — de que tudo o que transmite informação ou manipula sinais tem de ser suportado materialmente — é de tal maneira importante que até lhe dão um nome — "a hipótese do sistema físico de símbolos". (Na verdade, deveria chamar-se "a hipótese do sistema físico de *sinais*", de acordo com a distinção entre sinais e símbolos de que falámos no capítulo anterior.) Newell e Simon conjeturam que esta hipótese desempenhará o mesmo papel nas ciências cognitivas que a hipótese de existência de átomos e células desempenhou nas ciências da vida. Não existe nenhuma forma de manipular símbolos que não seja acompanhada por um processo físico. Mas as noções de que os átomos e as células existem, apesar de terem sido outrora meras hipóteses, são agora factos aceites — os átomos e as células podem ser vistos e manipulados. Assim sendo, que existe de "hipotético" na hipótese do símbolo físico?

Newell e Simon são mais cautelosos do que eu quando chamam à noção de um sistema de símbolos físicos "uma hipótese". As leis da física, como hoje as compreendemos, não permitem opções. Eu adotaria uma posição mais forte, como fez Newton quando disse: "*hypotheses non fingo*" — não faço hipóteses. Se ter uma mente implica que a mente pode transformar a informação — o que o pensamento, decerto, implica

—, então uma tal mente não pode existir sem um suporte material. O dualismo de substância está em conflito com as leis da física, pelo menos na forma em que nós hoje as conhecemos.

Visto que o dualismo de substância não funciona, os dualistas adotaram ainda mais uma abordagem, esta mais subtil — o dualismo de propriedades. A filósofa Patricia Smith Churchland descreve-o na sua recente revisão (e refutação) do dualismo de propriedades: "Ao contrário dos dualistas de substância, os dualistas de propriedades não acreditam na existência de uma substância não física na qual as experiências repousem. Em vez disso, afirmam que as experiências subjetivas são produzidas pelo cérebro e podem, por seu turno, afetar o cérebro, mas não são, elas próprias, identificáveis com quaisquer propriedades físicas do cérebro. Segundo esta perspetiva, não podemos, por exemplo, dizer que estar triste é uma configuração neurónica deste ou daquele conjunto neurónico." Como é, de todo, possível que as nossas experiências subjetivas não sejam "identificáveis com nenhumas propriedades físicas do cérebro"? Esse é o ponto fulcral da discussão do dualismo de propriedades.

Os dualistas de propriedades afirmam que a mente e as nossas experiências são uma propriedade "emergente" do cérebro material. De acordo com este ponto de vista, os elementos materiais, quando agrupados de uma forma especial, podem adquirir novas propriedades "emergentes" que não são explicáveis com base nesses elementos materiais individuais. O todo é maior do que a soma das suas partes. Reunindo, por exemplo, os nucleótidos na forma de uma molécula de ADN, descobrimos que o ADN possui uma nova propriedade emergente que mais nenhuma molécula possui — pode-se replicar a si próprio. Além disso, essa propriedade do ADN não pode ser identificada com nenhumas das propriedades físicas dos nucleótidos, os elementos que a constituem. Da mesma maneira, a mente é uma propriedade emergente do cérebro, não podendo ser reduzida a ele.

Este argumento é completamente falso. Vamos ver porquê. Uma propriedade emergente ou é do mesmo tipo lógico que os elementos dos quais emerge, ou não é. Se não é do mesmo tipo lógico, estamos de volta à posição do dualismo categórico: a

mente "emergente" é categoricamente distinta do cérebro. Se, por outro lado, é do mesmo tipo lógico que os elementos dos quais emerge, abrem-se duas possibilidades. Ou a teoria da propriedade emergente pode ser reduzida à teoria dos elementos dos quais emerge (reducionismo), ou não pode. Se a teoria não pode ser reduzida, estamos de volta à posição do dualismo de substância — a propriedade emergente da mente tem alguma nova propriedade *substancial* que não pode ser explicada com base nos seus elementos no cérebro, a perspetiva que vai para além das leis da natureza, como nós hoje as conhecemos. Se, por outro lado, a teoria da propriedade emergente é, em princípio, completamente redutível à teoria dos elementos dos quais emerge, então temos o reducionismo comum da ciência moderna e a posição da teoria da identidade, que afirma que os estados mentais e os estados do cérebro são idênticos. Perante esta perspetiva, que é mantida pela maioria dos cientistas naturais, uma propriedade emergente *pressupõe* a redução na explicação teórica. O todo é igual à soma das suas partes.

Concluímos que um defensor consistente do dualismo de propriedades é forçado a optar entre a teoria da identidade (que era o que se pretendia evitar), o dualismo categórico (que não é investigável) e o dualismo de substância (que entra em conflito com as leis conhecidas da física). A posição destes dualistas não é, portanto, muito feliz. Onde reside então o apelo do dualismo? As pessoas talvez estivessem mais inclinadas a aceitar a noção da mente como uma função do cérebro, se esta noção não entrasse em conflito tão direto com a sua própria experiência de consciência. Quando penso, não me apercebo de quaisquer processos físicos que estejam a ocorrer. Para mim, a minha mente parece ser independente do mundo físico. Para o salientar, os dualistas, que afirmam que o fosso entre o corpo e a mente é uma questão de princípio, usam o paradoxo da vontade própria e do determinismo como suporte das suas afirmações. Em que consiste esse paradoxo?

Da minha perspetiva da primeira pessoa, sou, em grande medida, livre de atuar como quero — posso escolher a posição do meu corpo e decidir para onde ele vai; pondero o que digo. Nada me parece mais evidente do que a liberdade nas minhas ações. Atribuo também aos outros a mesma liberdade. Com base nesta

liberdade, eu e os outros tornamo-nos agentes morais — somos responsáveis pelas nossas ações.

O nosso sentido de vontade própria está intimamente associado à nossa capacidade de perceção do rumo futuro das nossas ações. Ao contrário dos animais (tanto quanto sei), podemos imaginar o futuro distante e podemos tomar decisões que afetem esse futuro. Somos, por isso, responsabilizados moralmente por alguns aspetos da nossa condição, o que já não acontece com os animais. Algumas pessoas poderão argumentar que o condicionamento comportamental, tanto positivo como negativo, desempenha um papel nas nossas escolhas, e não há dúvida de que têm razão. Poderia parecer que isso nos restringiria a liberdade. Contudo, a partir do momento em que nos apercebamos desse condicionamento, como muitas vezes nos apercebemos e podemos aperceber, a teimosia humana manifesta-se, e o rumo das nossas ações futuras torna-se, de novo, imprevisível. Impressiona-me a capacidade de certos indivíduos que exibem comportamentos compulsivos, como o vício do álcool ou das drogas, de alterar o rumo do seu comportamento autodestrutivo, através da sua força de vontade ou do recurso a um poder transcendente que lhes apoie essa força de vontade. Nenhum animal consegue fazer o mesmo. A dignidade da humanidade repousa na evidência da nossa livre força de vontade.

Contudo, apesar da experiência imediata de que a nossa vontade é livre, segundo a perspetiva da terceira pessoa, que é a da ciência, aquilo que eu faço surge de uma maneira totalmente diferente. O meu corpo e o meu cérebro não passam de um sistema eletroquímico muito complexo. Os eletrões e as substâncias químicas do meu cérebro movem-se de acordo com as leis da física — dirigem-se para onde se devem dirigir. Talvez o seu movimento tenha uma aleatoriedade intrínseca, como exige a teoria quântica. Mas isso é irrelevante para este argumento, pois a minha mente não pode influenciar a forma como os eletrões e as substâncias químicas se distribuem (se pudesse, seria uma espécie de telecinese — a mente atuaria sobre a matéria do seu próprio cérebro). Segundo esta perspetiva da terceira pessoa, não passo de um autómato regido pelas leis da mecânica quântica. Parece não haver espaço para a minha vontade própria atuar sobre este autómato sem violar as leis da física.

Talvez, então, a nossa vontade própria não passe de uma ilusão. Mas como é isso possível, quando nos parece tão evidente que podemos fazer isto ou aquilo, a qualquer momento? Este é o paradoxo da vontade própria e do determinismo: como conciliar a nossa clara liberdade de fazer o que queremos com a perspetiva científica segundo a qual somos autómatos quânticos e complexos? Os dualistas categóricos afirmariam que a nossa vontade própria *não* é uma ilusão. A mente é livre. Mas então tem de haver algo de errado ou incompleto nas leis da física e da biologia. O paradoxo da vontade própria e do determinismo, tal como o problema do corpo-mente, com o qual está intimamente relacionado, é uma prova dos nove da posição metafísica de uma pessoa.

Este paradoxo já não é novo. Antes da ascensão da ciência moderna, as pessoas com sentido religioso, que acreditavam na existência de um deus omnisciente capaz de ver para além do futuro como se se tratasse da projeção de um filme, tinham de se confrontar com o problema de que todas as suas ações, boas ou más, já eram do conhecimento de Deus. O rumo das suas vidas, aos olhos de Deus, já estava traçado.

Em criança, o poeta inglês Lord Byron tinha uma governanta que era uma cristã determinista — uma calvinista. Esta costumava incitá-lo a dedicar-se à salvação da sua alma. Byron aceitou o determinismo calvinista, mas tirou a conclusão oposta; visto que, de qualquer das maneiras, a sua vida estava inteiramente predeterminada, podia fazer (e fez mesmo) tudo aquilo que bem lhe apetecesse sem nunca ser responsabilizado por isso. A posição que se toma — vontade própria ou determinismo — pode ter consequências morais. Certas pessoas poderão tentar libertar-se da responsabilidade dos seus crimes argumentando que não atuaram de livre vontade — são alienadas, completamente determinadas pela vontade de Deus, vítimas do seu ambiente, compulsivas, estavam sob a influência de drogas e de outros determinantes inanimados das suas ações.

O facto de a nossa discussão do problema do corpo-mente incluir agora uma dimensão moral e ética não nos deve surpreender. Na nossa vida prática de todos os dias, supomos que as pessoas são agentes morais livres, e a nossa sociedade e as

nossas leis reconhecem esse facto. A fim de conciliar a liberdade humana com o determinismo exigido pela ciência reducionista, Kant propôs um outro dualismo — o dualismo epistémico —, que creio descrever corretamente as circunstâncias da nossa existência, para além de ser apoiado pela razão científica.

Kant reconheceu que, ao analisarmos a realidade, empregamos, pelo menos, dois tipos de razão diferentes: a "razão teórica", do cientista, e a "razão prática", do advogado, do homem de negócios ou de qualquer outra pessoa. O raciocínio teórico do cientista vê o mundo de acordo com teorias naturais. Em *princípio*, de acordo com a razão teórica, o mundo é uno, e a sua explicação pode ser reduzida às propriedades dos elementos primários da existência material. Este também é o ponto de vista do teórico da identidade — a mente e a consciência são um processo biológico-material explicável pelas leis naturais. Os estados da mente são, em *princípio*, irredutíveis aos estados do cérebro.

Na *prática*, como qualquer cientista será o primeiro a admitir, uma tal redução não pode ser atingida em pormenor. Daí a necessidade da razão prática, que vê a mente como autónoma e a pessoa como um agente moral livre, um agente que, para quase todos os efeitos práticos, é independente do cérebro. Este é o raciocínio seguido pela maioria das pessoas ao lidar com os problemas da vida. Quando uma pessoa se porta mal, dizemos que fez algo de errado, e não que o seu cérebro não funciona.

A razão teórica, a maneira de ser da ciência, vê o problema do corpo-mente segundo a perspetiva da terceira pessoa; a razão prática vê este problema segundo a perspetiva da primeira pessoa. O dualismo epistémico de Kant aceita explicitamente que vejamos o problema do corpo-mente de maneiras diferentes, dependendo do facto de o estarmos a ver segundo aquilo que, em *princípio*, é verdade ou segundo aquilo que, *na prática*, podemos atingir. E, creio eu, é assim que deve ser.

O dualismo epistémico dá razão tanto à abordagem reducionista da ciência como às dimensões éticas da vida humana. Ao contrário dos dualismos anteriores, trata-se de um dualismo de método, ou de intenção, e não de um dualismo lógico ou materialista. Além disso, promove um programa de investigação,

pois a fronteira entre o que "em princípio deve ser verdadeiro" e o que "na prática pode ser atingido" está sujeita à investigação científica. Podemos vir a compreender muitas das características da nossa experiência mental através de avanços nas ciências neurológicas. Mas duvido de que a ambição radical dos teóricos da identidade — uma correspondência precisa entre a nossa experiência e as funções neurológicas — jamais venha a ser realizada na prática. Vamos examinar algumas das considerações que podem estabelecer o contorno de linhas de fronteira entre o "em princípio" e o "na prática".

Para simplificar, vamos primeiro examinar o contorno desta linha de fronteira em alguns sistemas já examinados pelas ciências naturais e que, ao contrário do cérebro, são razoavelmente bem compreendidos. É importante ter em conta que são as *teorias* que podem, ou não, ser redutíveis umas às outras, não as estruturas materiais do mundo (embora por vezes falemos, em termos gerais, como se fossem). Duas noções chaves que ajudem a suportar o dualismo epistémico, e que são exemplificadas pelos sistemas físicos, são: em primeiro lugar, a noção de que existe um "desacoplamento causal" entre os níveis materiais, o que torna o reducionismo físico radical e a teoria da identidade quase impraticáveis; em segundo lugar, a noção de "barreira de complexidade", que concede à mente a sua liberdade prática, apesar de o seu suporte material, o cérebro, ser inteiramente governado por leis químicas e biológicas. Vou discutir cada uma destas ideias.

Já descrevi a noção de "desacoplamento causal" entre os níveis da cadeia reducionista que vai do macrocosmo ao microcosmo, para o caso do gene. Apesar de a genética se apoiar numa estrutura material — o ADN — e ser, no fim de contas, regida pelas leis da química, uma vez conhecidas as regras da combinação genética, podemos "esquecer" os pormenores das leis químicas. A genética torna-se "desacoplada causalmente" das leis da química.

Da mesma maneira, a um nível mais microscópico, as leis da química dependem da existência e das propriedades do núcleo atómico que repousa no centro dos átomos. Mas as leis pormenorizadas da física nuclear — as leis dos *quarks* e dos

gluões que asseguram a união do núcleo — não são indispensáveis para a compreensão das leis da química-física. Este "desacoplamento causal" entre os níveis do mundo implica que para *compreender* a base material de certas regras temos de seguir até ao nível imediatamente abaixo; mas as regras podem ser *aplicadas* fiavelmente sem qualquer referência ao nível mais fundamental. Curiosamente, a divisão das ciências naturais reflete este desacoplamento causal. A física nuclear, a física atómica, a química, a biologia molecular, a bioquímica e a genética são todas disciplinas independentes, válidas por direito próprio — uma consequência do desacoplamento causal entre elas.

Uma outra característica que o desacoplamento causal implica à medida que subimos a cadeia material do ser, desde o pequeno até ao grande, é a emergência de novas propriedades qualitativas da matéria. Os físicos estão familiarizados com a forma como de fenómenos físicos coerentes emergem novas propriedades. Existe um ramo da física que se dedica única e simplesmente ao estudo dos "fenómenos coletivos" — a emergência de novas características coletivas qualitativamente novas num conjunto de moléculas, átomos, ou eletrões individuais. Talvez o exemplo mais simples de um fenómeno coletivo seja uma onda na água. Cada molécula de água executa um movimento oscilatório vertical simples. No entanto, quando uma grande quantidade de moléculas de água realiza esse movimento em conjunto, com uma sincronização correta, o resultado é uma onda de água gigante. A onda move-se na água, podendo transportar energia ao longo de grandes distâncias, mas a água, em si mesma, está relativamente imóvel. Entre as maiores ondas que existem estão os "*greybeards*", monstros com mais de trinta metros de altura, que circulam pelo continente da Antártida durante meses e que vão buscar a sua energia à força do vento. Os eletrões nos metais, as redes ordenadas de átomos, e muitos outros sistemas físicos, podem exibir fenómenos coletivos complexos. É característico destas propriedades coletivas serem compreendidas com base em leis microfísicas, de modo que o todo é igual à soma das partes. Embora as propriedades do sistema, como um todo, possam ser deduzidas a partir das propriedades das partes, esse sistema, na globalidade, apresenta propriedades que as suas partes individuais não têm — emergem novas características qualitativas a partir da coerência coletiva.

Da mesma maneira, também na biologia se encontram exemplos da emergência de novas características qualitativas. O ADN é uma molécula notável. Ao contrário de qualquer outra molécula, pode autorreproduzir-se — criar uma cópia exata de si mesma, a partir de outras moléculas vizinhas, que servem como blocos de construção. Ao combinar outras moléculas para produzir uma molécula de ADN, é criada uma nova característica material — a reprodução molecular. Esta característica qualitativa torna-se então a base material da genética. Os biólogos moleculares, em vez de se referirem a ligações moleculares e a interações químicas, começam a usar uma nova linguagem de transferência de informação, de replicação, de codificação e de síntese da proteína, uma linguagem que reflete a existência de novas propriedades que não estavam presentes nas suas partes individuais.

É curioso observar que em certas junções, que representam o "desacoplamento causal", os cientistas mudam a maneira como falam das coisas que estão a estudar. Um exemplo flagrante é a junção entre os mundos material e imaterial. Em vez de falarem da matéria e das suas interações — as proteínas, o sistema nervoso, etc. —, os cientistas começarão a falar de sinais e de transferência de informação. A mudança é subtil, mas é importante. A certa altura atravessam a linha que separa a matéria e as suas interações do mundo não material da informação organizada. Este passo importante não tem nada de misterioso, pois vemos que, ao falarem de informação, os cientistas se limitaram a extrair a componente interessante e essencial do que são, de facto, interações materiais complexas. Mas estão agora a falar de informação "imaterial" e não de matéria.

À medida, por exemplo, que subimos a cadeia reducionista ao nível biológico das células, do sistema nervoso e do cérebro, os cientistas começam a falar de sinais, de transferências e de processamentos de informação. Embora a verdadeira estrutura material — o cérebro e os seus axónios, as dendrites, as junções sinápticas e todas essas conexões — determine as regras pormenorizadas (até agora desconhecidas) do modo como a informação é transferida e processada no cérebro, podemos, se conhecermos as regras, começar a falar de sinais em vez de

processos materiais. Embora isso possa ser efetuado para organismos simples ou para partes do cérebro, já quando vamos examinar a situação mais realista que corresponde à experiência humana, devido à nossa ignorância, saímos do domínio do conhecimento e caímos na especulação.

A informação do nosso cérebro é processada e, possivelmente, "empacotada" — aglomerada em pedaços relevantes. Talvez existam efeitos coletivos no processamento de informação no cérebro, que conduzam a novos "desacoplamentos causais". Poderão existir subsistemas dentro dos supersistemas — uma verdadeira hierarquia de informação e comando, só comparável à própria sociedade humana. Segundo esta imagem, o neurónio no cérebro assemelha-se a um indivíduo na sociedade. Aquilo que experimentamos como consciência é a "consciência social" da nossa rede neurónica.

Esta ideia foi desenvolvida em pormenor pelo neurocientista Michael Gazzaniga, no seu livro *The Social Brain*. Gazzaniga vê o cérebro organizado modularmente, com os diferentes módulos envolvidos numa disputa pela dominância, como os parceiros silenciosos, que mencionei anteriormente, a disputarem a atenção. Um meu colega da Universidade de Rockefeller, o neurocientista Jonathan Winson, defende um ponto de vista ligeiramente diferente, no seu livro *Brain and Psyche*. Não vê os componentes do cérebro envolvidos numa competição, mas sim numa cooperação, sob a égide de uma autoridade executiva — o ego. Mas é justo dizer-se que ninguém ainda sabe como é que o cérebro é regulado. Como Francis Crick observou: "A surgir um avanço no estudo do cérebro, parece provável que seja ao nível da regulação geral do sistema. Se o sistema fosse tão caótico como por vezes parece ser, não nos permitiria desempenhar satisfatoriamente nem sequer as tarefas mais simples."

Finalmente, podemos descobrir que a linguagem da informação não é suficientemente eficiente para descrever as funções cerebrais mais elevadas e recorrer a termos como "representações mentais", "conceitos", etc. Uma tal série de "desacoplamentos causais" pode ser extraordinariamente complexa, mais intricada do que tudo o que possamos imaginar. Contudo, aquilo que podemos acabar por atingir é uma teoria da

mente e da consciência — uma mente tão desacoplada dos seus sistemas de suporte material que parece não depender deles — e "esquecer" como é que lá chegámos. De acordo com a razão teórica, o fenómeno biológico de uma consciência que se autorreflete é simplesmente o último de uma longa e complexa lista de "desacoplamentos causais" do mundo da matéria.

A noção de que a consciência está "causalmente desacoplada" do cérebro é, evidentemente, uma conjetura — não está provada. Como conjetura, mantém-se uma fantasia, o tipo de fantasia que critico quando provém de filósofos e de outros. É necessário fornecer, realmente, conceções pormenorizadas, ou construir verdadeiramente o dispositivo, o órgão, ou o sistema material que põe em prática a nossa conjetura; não basta especular. Esta conjuntura, no entanto, estabelece um calendário de investigação, que irá ocupar os cientistas ainda durante um longo período.

Para além do "desacoplamento causal", uma outra característica que ajuda a suportar o dualismo epistémico é a existência de uma "barreira de complexidade". O cérebro é o pedaço de matéria mais complexo do universo conhecido. E a sua complexidade é, provavelmente, uma característica essencial do seu funcionamento. Ainda não fazemos bem ideia da complexidade da rede neural do cérebro, mas ela excede tudo o que já alguma vez vimos. Para dar uma pequena ideia desta complexidade, basta dizer que o cérebro tem de refletir, em parte, a complexidade do mundo à nossa volta, incluindo o ambiente natural, linguístico e social, o armazenamento do nosso conhecimento e memória e um vasto reportório de capacidades motoras e sensoriais.

Embora possamos falar de complexidade em geral, é possível ser mais preciso. Os matemáticos têm um novo campo de estudo a que chamam "teoria da complexidade", que eu descrevi no capítulo anterior: "Ordem, Complexidade e Caos." Existem, pelo menos, dois tipos diferentes de complexidade material, designados por complexidade "simulável" e "insimulável". Para ilustrar a diferença entre estes dois tipos de complexidade física, imaginem-se dois sistemas físicos, o sistema solar e o tempo meteorológico.

Em primeiro lugar, vamos considerar o sistema solar e o movimento de todos os planetas do céu noturno. Vistos da Terra, os movimentos dos planetas parecem ser bastante complicados; alguns chegam a exibir movimentos retrógrados — param, movem-se para trás e arrancam de novo em frente. Do ponto de vista heliocêntrico, no entanto, os movimentos dos planetas são elipses simples, com o Sol como um dos focos. Usando as leis de Newton, podemos construir um modelo matemático dos movimentos planetários. De acordo com este modelo, se conhecermos as posições dos planetas num dado instante — as chamadas "condições iniciais" —, podemos prever as suas posições futuras ao longo dos próximos milénios. Os movimentos planetários são um exemplo de complexidade "simulável". Uma vez que posso construir um modelo matemático baseado em leis físicas conhecidas e, o que é muito importante, posso resolver as respetivas equações, quer à mão, quer, mais rapidamente, com um computador, consigo encontrar uma simulação matemática eficaz dos movimentos planetários e determinar o futuro do sistema.

O sistema físico que vamos considerar a seguir é o tempo meteorológico do nosso planeta, que é um exemplo de um sistema "insimulável". O tempo é extremamente complicado e caprichoso — têm-se superfícies frontais frias, tempestades, secas, monções e Eras glaciais, para só mencionar algumas características. Contudo, apercebemo-nos desde tempos remotos de que o tempo exibe alguns padrões regulares. Modernamente, conhecemos as leis que regem o tempo, da mesma maneira que conhecemos as leis que regem os planetas. Por que não podemos, então, prever o tempo que vai fazer de forma tão exata como prevemos as órbitas dos planetas?

Para se poder prever o tempo, é necessário conhecer os valores da temperatura, da pressão e de outras quantidades físicas em todos os pontos da atmosfera e da superfície terrestre, num determinado instante — as condições iniciais. Como é evidente, não podemos ter estes valores exatos, mas podemos introduzir nos nossos computadores informações meteorológicas aproximadas, a fim de tentar prever o desenvolvimento futuro do tempo. Existe, contudo, uma diferença crucial entre as equações que descrevem o tempo e as que descrevem a órbita dos

planetas. Se as condições iniciais do movimento dos planetas forem apenas aproximadas, então, de acordo com as leis que regem o movimento desses planetas, essa inexatidão resultará numa incerteza relativamente pequena no conhecimento da órbita futura dos planetas. O mesmo não se passa com as equações que regem a meteorologia, como foi descoberto por Edward Lorenz (ver o capítulo "A vida pode ser bastante ilinear"). Uma gaivota que bate as suas asas numa praia em Cape Cod pode gerar uma flutuação na pressão atmosférica que cresça até se transformar numa tempestade violenta do outro lado da Terra, um mês mais tarde. Por esta razão, os meteorologistas não podem fazer mais do que calcular probabilidades de evolução do tempo. À medida que aumentar o conhecimento pormenorizado das condições meteorológicas num dado instante, aumentará também a capacidade de prever o tempo. Será possível efetuar previsões para vários dias, ou mesmo uma semana. Mas, sendo a meteorologia um exemplo de complexidade insimulável, não podemos ter esperanças de modelar matematicamente o seu comportamento pormenorizado a longo prazo.

Existe, como é evidente, um computador que pode simular o tempo com exatidão — o sistema meteorológico terrestre é um computador analógico *perfeito* do seu próprio desenvolvimento. Se pudéssemos acelerá-lo, de alguma forma, poderíamos efetuar previsões meteorológicas exatas. Este exemplo bastante trivial (todas as coisas são o computador analógico de si mesmas) ilustra uma importante questão de princípio — os sistemas insimuláveis não podem ser modelados matematicamente, de forma eficiente, por nenhum sistema que seja menos complexo do que eles próprios.

O génio matemático John von Neumann comentou, nos anos quarenta, que dois importantes problemas científicos eram a previsão do tempo e o funcionamento do cérebro. Hoje em dia entendemos muito melhor a complexidade meteorológica — compreendemos as equações principais e sabemos que se trata de um sistema insimulável. O cérebro, no entanto, permanece um enigma. Os cientistas tentaram encontrar um conjunto matemático de equações que descrevesse bem as características essenciais das ligações neurónicas e a sua operação. Eu, contudo, conjeturo que, ainda que essas equações sejam encontradas, se

virá a descobrir que a complexidade do cérebro constitui um outro exemplo de complexidade insimulável. A ser assim, apesar do facto de no futuro as leis biofísicas do cérebro poderem vir a ser conhecidas exatamente, o sistema mais simples que simulará a operação do cérebro será o próprio cérebro. Se estas ideias estiverem corretas, existe uma "barreira de complexidade" entre o nosso conhecimento instantâneo do estado da rede neurónica e o nosso conhecimento do seu desenvolvimento futuro. O cérebro, tal como, portanto, a mente, é um exemplo de um sistema insimulável.

Esta "barreira de complexidade" não implica que não possamos, de todo, prever os estados futuros do cérebro; implica somente que não os possamos prever a muito longo prazo. Ben Libet, um neurocientista da Universidade da Califórnia, em San Francisco, que colaborou com John Eccles, concebeu uma experiência engenhosa para demonstrar que o cérebro é ativado para executar um ato cerca de meio segundo antes de a pessoa se aperceber de que decidiu fazê-lo. A "execução" precede a "perceção". Curiosamente, *nós* sabemos o que a pessoa vai decidir ligeiramente antes da própria pessoa, pois na experiência vemos que o córtex motor foi ativado. Este facto sugere que a previsão a curto prazo pode ser possível. Mas, para todos os efeitos práticos, a previsibilidade pormenorizada, a longo prazo, não é realizável.

Creio que possa ainda haver uma barreira de complexidade, de um tipo diferente, envolvida na descrição do cérebro. Normalmente, os cientistas partem do princípio de que, uma vez definido o microestado de um sistema físico num dado instante, sabem tudo o que se pode saber acerca do sistema naquele instante. Por exemplo, se os cientistas pudessem (o que de facto não podem) conhecer um microestado meteorológico num grande volume da atmosfera — conhecendo a posição e a velocidade de cada átomo —, poderiam analisar esses dados, extraindo a média ao longo de certas regiões, e concluir qual seria o macroestado do tempo — se estaria a chover ou faria sol, etc. Em princípio, é relativamente fácil usar a informação sobre o microestado para deduzir o macroestado. Vale a pena notar que, no caso da meteorologia e de outros sistemas físicos, pequenos erros na especificação do microestado se traduzem em pequenos erros na especificação do macroestado. Ao fim e ao cabo, como pode um

erro na posição de um átomo ou dois alterar a descrição do tempo meteorológico?

No entanto, estou em crer que, mesmo que se conhecesse o microestado do cérebro — o estado de cada neurónio, de cada vesícula sináptica —, seria impossível descobrir o estado da consciência e concluir, por exemplo, que a pessoa estava a sonhar. A justificação é que um pequeno erro na especificação do microestado resultaria num grande erro na determinação do macroestado.

Von Neumann, que refletiu muito sobre o modo de funcionamento do cérebro, insinuou este tipo de barreira de complexidade quando comentou que o modelo mais simples de um neurónio pode ser o próprio neurónio. Qualquer tentativa de simplificar o neurónio e de ignorar os pormenores do seu microestado não levaria em conta alguma característica importante do seu papel na produção de consciência. Espero, sinceramente, que isto não seja verdade; quereria dizer que o tipo de "desacoplamento causal" que descrevi anteriormente não funcionaria. Seria necessário conhecer cada pormenor do cérebro — o microestado completo e preciso — para se saber o respetivo macroestado. Se for assim, então os mapas invariantes da mente, que alguns cientistas procuram, não existem.

Descrevi o "desacoplamento causal" e a "barreira da complexidade" para fornecer alguns conhecimentos básicos para a tese do "dualismo epistémico" — a ideia de que, embora em princípio a mente não passe de uma função do cérebro, na prática esta redução é impossível. O "desacoplamento causal" indica que a consciência, apesar de parecer ser independente da matéria, se apoia inteiramente em processos materiais. A "barreira da complexidade" explica por que razão o desenvolvimento futuro da consciência não pode ser predeterminado (apesar do facto de ser inteiramente regido por leis naturais). Não pretendo afirmar ter provado que o "desacoplamento causal" e a "barreira da complexidade" se aplicam, de facto, ao cérebro. Mas acho isso muito plausível. Essa prova, no problema em causa, terá de aguardar por um maior conhecimento do funcionamento do cérebro.

Muitas pessoas sentem-se desconfortáveis com estas ideias e questionam-se sobre a possibilidade de construir um verdadeiro cérebro artificial que produzisse uma mente consciente. Como é que isso poderá ser feito, usando apenas matéria organizada? Estas pessoas pretendem (e merecem-na) uma demonstração, uma verdadeira construção, de uma encarnação da mente. Muitas das discussões atuais acerca de encarnações da mente invocam aquilo que vou chamar de "máquinas intencionais" e "analíticas" e a relação entre essas duas máquinas.

A "máquina analítica" foi o projeto ao qual Charles Babbage, um cientista e inventor inglês, cuja carreira se estendeu ao longo da primeira metade do século XIX, dedicou toda a sua vida. A máquina analítica era uma máquina com rodas e volantes, capaz de computar, executar aritmética e realizar outros cálculos — uma versão mecânica do moderno computador eletrónico. Babbage construiu uma máquina analítica simples, começou uma segunda versão e, antes de a terminar, concebeu uma versão muito mais ambiciosa (e demasiado cara) que nunca chegou a ser construída. Babbage chegou mesmo a usar cartões perfurados para a entrada de informação (uma ideia que retirou dos teares automáticos) e anteviu a utilização de programas. Infelizmente, a sua imaginação excedeu a tecnologia mecânica do seu tempo; as suas ideias tiveram de aguardar o advento da tecnologia eletrónica. Mas não há dúvida de que Babbage antecipou o computador moderno. As suas máquinas, como os modernos computadores, incorporam um conjunto de regras definidas para a manipulação de informação. Poderiam também ser chamadas máquinas sintáticas, pois tudo o que fazem é obedecer a regras formais — o significado, o conteúdo semântico da informação, não desempenha qualquer papel. A máquina analítica não passava de uma máquina — não podia fazer mais do que aquilo que as instruções lhe mandavam fazer. Dada uma certa entrada, a saída era sempre igual. Os computadores modernos, no essencial, apesar de a sua velocidade e sofisticação serem muito superiores a tudo aquilo que Babbage podia imaginar, não fazem mais do que isso.

O cérebro humano a interagir com o mundo é uma "máquina intencional". As máquinas intencionais têm a propriedade única de possuírem intencionalidade — têm crenças, emoções, exercem a

vontade própria. Em suma, têm consciência e podem representar o significado — são máquinas semânticas.

Serão estes dois tipos de máquinas distintos? Da maneira que as escrevi, não há dúvida de que parecem ser diferentes. Mas teremos nós a certeza de que, construindo uma máquina analítica suficientemente complexa — juntando várias máquinas simples —, não poderemos construir uma máquina intencional? Indo ainda mais longe, poderemos desmontar uma máquina intencional e descobrir que é constituída por várias máquinas analíticas? Não conheço a resposta para estas questões; elas são debatidas calorosamente pelos filósofos e pelos cientistas cognitivos. Alguns insistem em que é impossível — em que nunca se conseguirá obter a intencionalidade a partir de um sistema simbólico físico, regido por determinadas regras. Para apoiar este argumento, há quem lembre que a semântica nunca pode ser conseguida a partir da sintaxe.

Não compreendo todos esses argumentos. Mas há uma coisa que sei. Já existe um conjunto bastante completo de máquinas — desde as máquinas analíticas simples às máquinas intencionais mais complexas — que, caso fossem compreendidas, responderiam às nossas questões e poriam termo ao debate. O problema é que essas máquinas foram construídas pelo demiurgo, e não por nós, e não sabemos como é que ele as fez. A série de máquinas de que estou a falar é a hierarquia da vida na Terra, desde os fagócitos mais simples — que atuam como robôs microscópicos, cujas partes conhecemos — até aos seres humanos, as verdadeiras máquinas intencionais, cujo funcionamento é, em grande parte, desconhecido. Os fagócitos mais simples regem-se pelas leis da biologia molecular e da química. Em organismos mais complexos, com sistemas nervosos elementares, podemos ver que a informação é processada de acordo com regras "desacopladas causalmente" da química. Embora seja discutível se há ou não alguma computação ou manipulação de sinais, ou se algum programa está a ser executado, tal como num computador, sabemos, sem qualquer sombra de dúvida, que existe informação a ser processada e que as regras da neurobiologia estão a ser obedecidas. Subindo pela árvore da vida, o mesmo padrão vai-se repetindo. Se soubéssemos como é que o demiurgo conseguiu realizar a sua

obra (infelizmente, a evolução é muito mais inteligente do que nós), não estaríamos decerto a colocar questões acerca da vontade própria e do determinismo, nem a ficar intrigados com o problema do corpo-mente. Observando, por exemplo, a série de organismos vivos, desde os fagócitos mais simples até aos seres humanos, a partir de que ponto é que deveremos atribuir consciência e intencionalidade a um organismo? Serão conscientes espécies como os gorilas, os cães e os esquilos? E as tartarugas e os lagartos? E os insetos? Será que o mosquito me *quer* morder, da mesma forma que eu *quero* comer? Os dualistas categóricos respondem a estas questões dizendo que só os seres humanos são verdadeiramente conscientes. Os dualistas epistémicos, por outro lado, confrontam-se com um problema a investigar.

Surge a mesma questão com a inteligência artificial. A partir de que ponto é que podemos atribuir intencionalidade a um computador (não confundir com a pessoa que o concebeu)? Para ajudar a encontrar uma resposta, gostaria de contar uma pequena história.

Em 1986, ofereci um computador para jogar xadrez aos meus amigos Peter e Anne McClinton, que vivem numa estância nas margens do Nilo Azul dezassete quilómetros ao sul de Juba, no sul do Sudão. Esse casal tem vindo a trabalhar, há mais de uma década, na implantação de vários parques nacionais, alguns deles maiores do que o Serengeti, para salvar as últimas grandes concentrações de grande fauna. Para além das incríveis dificuldades logísticas que envolvem a manutenção do equipamento, o seu trabalho é ainda dificultado por uma guerra civil regional. Estava eu à espera de notícias sobre o impacto que teria tido a chegada da primeira inteligência artificial ao sul do Sudão quando, logo no dia seguinte, fui recompensado com uma carta de Anne. Dizia assim:

> Está uma bela manhã cinzenta, de sábado; as temperaturas estão próximas dos 40º, a humidade não deve andar muito longe dos 100, o gerador emite um zumbido constante, os frigoríficos, um silvo agudo, os cães ressonam, os pássaros chilreiam, as moscas pairam no ar e, a uma distância confortavelmente distante, ouvimos o ribombar de um morteiro alternado com o som de disparos de metralhadora. Por outras palavras, Deus está no Céu (não que eu o esperasse encontrar em qualquer outro lugar) e tudo está tão em paz quanto seria possível, atendendo às circunstâncias. O Peter foi

a Juba ouvir os últimos boatos, o que me deixa uma oportunidade para te escrever.

Antes de continuar, queria aproveitar para te agradecer o maravilhoso computador para jogar xadrez que nos enviaste. Chegou intacto no último correio proveniente do Reino Unido. Decidimos chamar-lhe Kasimir. Tornou-se rapidamente um membro precioso, ainda que controverso, da nossa família. Como é que soubemos que era um computador macho? Bem, outra coisa não poderia ser, com aqueles quadrados geometricamente perfeitos e com o esquema de cores (das luzes) prateado-preto-vermelho. Os computadores fêmeas, como toda a gente sabe, têm quadrados arredondados e são em tons rosa e branco.

O Kasimir foi o nosso primeiro computador a sério. O outro computador com que tínhamos contatado foi uma pequena calculadora de bolso. Demorámos um certo tempo a compreendê-lo. De facto, durante as primeiras 24 horas de estada do Kasimir sucederam-se algumas discussões acaloradas na nossa família. [...] Não tardou que eu me apaixonasse pelo Kasimir. Comecei a tomar atitudes loucas, como abrir com Cg1-f3, ou coisas no género. Sacrificava a rainha, as torres, os cavalos, os bispos, e nem sequer me apercebia de que o estava a fazer. O Kasimir ganhou cada um dos jogos que disputámos e isso fazia-me feliz. Agora explica-me uma coisa, por favor, por que é que eu nunca fico assim tão feliz quando perco com um adversário humano? Se isto não é amor, então não sei o que seja.

Depois, um dia, o Peter foi mais esperto que o Kasimir. Sacrificou uma peça para chegar com um peão ao fundo do tabuleiro, transformou-o numa rainha e fez um mate em três jogadas. Em seguida, sorriu perversamente por ter derrotado o Kasimir. Isso fez-me perder as estribeiras. Assim, quando o Peter estava a olhar para outro lado, alterei a dificuldade para o nível mais elevado. Vamos lá a ver se ele ainda o consegue bater. Até agora, ainda estou para ver.

Como esta carta indica, é fácil, talvez mesmo apropriado, atribuir intencionalidade a um computador. Que interessa o modo como o computador faz — provavelmente com um programa de busca eletrónica, rápida e seletiva, que procura a melhor jogada? Podemos sempre tomar aquilo a que o filósofo Dan Dennett chama uma "atitude intencional" e executar as nossas jogadas como se o computador fosse um ser racional, motivado. Faríamos o mesmo com pessoas ou animais.

Considero a noção de "atitude intencional" um conceito precioso, uma vez que descreve algo da minha própria experiência. Como exemplo de várias atitudes intencionais diferentes, vejam-se as diferenças entre o modo como um amigo devotado dos gatos vê o seu gatinho de estimação e a forma como um psicólogo comportamental ou um biólogo estudam esse animal. O amigo dos gatos atribui uma consciência, uma motivação, crenças, no quadro quase de uma harmonia espiritual, ao seu bichano, enquanto o cientista não vê mais do que um autómato cartesiano, um robô orgânico. O mesmo se passará com os computadores inteligentes, quando eles chegarem. Se se pretender estudar o computador, dever-se-á adotar a atitude intencional de um cientista de computadores. Mas, se se pretender que o computador desempenhe alguma tarefa, talvez seja melhor tratá-lo como se fosse um ser inteligente, com as suas próprias estratégias e motivações — uma criatura de Deus. Mais uma vez, a diferença de atitudes entre a razão teórica e a razão prática salta à vista, quer na nossa abordagem dos gatos, quer na dos computadores.

Não conheço nenhuma resposta definitiva para o problema do corpo-mente. Sei, contudo, que, se se adotar a posição de dualismo epistémico, ou uma que lhe esteja próxima, a solução é investigável. É possível que já tenhamos alguns pedaços da resposta. Além disso, esta posição não só é cientificamente plausível, como é também eticamente responsável.

Uma grande parte desta discussão do problema do corpo-mente foi efetuada na perspetiva da terceira pessoa — o ponto de vista da razão teórica. Agora, que já temos este cenário montado, gostaria de voltar ao paradoxo da vontade própria e do determinismo. E para ilustrar esse paradoxo vou confrontar diretamente as perspetivas da primeira e da terceira pessoas. Vou realizar este confronto no contexto de uma fantasia filosófica — o homem que confundiu o seu cérebro com a sua mente.

Gosto de me deixar prender por esta fantasia, pois é ao mesmo tempo o cumprimento de um desejo e o suporte de um preconceito. O desejo é o de observar o funcionamento do meu cérebro da mesma maneira que observo as operações mecânicas da minha própria mão. O preconceito é que, se pudéssemos ao

menos observar a operação física do nosso cérebro, mesmo quando estivéssemos envolvidos num pensamento silencioso ou numa meditação, a ilusão da distinção entre corpo e mente depressa se desvaneceria. Ao contrário dos movimentos da nossa mão, que podemos observar, não podemos observar os movimentos do nosso cérebro, embora estejamos cientes deles na nossa mente. Se um avanço tecnológico (como o que é descrito na fantasia seguinte) nos permitisse observar o funcionamento pormenorizado do nosso cérebro, no momento exato em que nos ocorrem os pensamentos, esta nova perceção iria alterar radicalmente a nossa perspetiva do problema corpo-mente.

A história passa-se no futuro, e os engenheiros médicos acabam de inventar o SMC — o sensor magnético cerebral, uma versão avançada dos aparelhos de TAC (tomografia axial computadorizada) e de IRMN (imagiologia por ressonância magnética nuclear), muito em voga no século anterior. O paciente usa um "capacete" especial capaz de detetar atividade elétrica em todo o seu cérebro, medindo para isso campos magnéticos muito pequenos. A sua resolução é tão elevada que pode detetar o disparo de neurónios individuais. Colocado em frente do paciente, está um grande modelo transparente de um cérebro, construído numa escala aproximada de cem para um. Este modelo é constituído por cem biliões de luzinhas coloridas segundo um certo código, representando cada uma um neurónio diferente do cérebro do paciente. Sempre que um neurónio é disparado no cérebro, acende-se a luz correspondente nesse modelo. Diferentes percursos neurais correspondem a diferentes cores — tudo está concebido de forma a permitir um máximo de clareza e possibilidade de visualização. Os investigadores médicos costumam usar o SMC para o estudo de danos cerebrais ou para examinar a evolução de tecidos cerebrais transplantados. Desta vez, no entanto, um filósofo, a quem foi recentemente atribuído um subsídio que lhe permitiu ter o SMC à sua disposição durante várias centenas de horas, vai experimentar o sensor consigo mesmo. Os engenheiros médicos advertiram-no para os perigos que daí lhe poderiam advir. Se o paciente estiver, por exemplo, a observar o córtex visual do modelo, pode-se aperceber de luzes a cintilar periodicamente. O que se passa é que um ciclo de realimentação (feedback) foi ativado, tal como acontece quando se coloca um microfone perto de um altifalante e se começa a

ouvir um silvo agudo. A fim de evitar uma saturação do córtex visual — avisam-no os engenheiros —, deverá fechar os olhos rapidamente, pois isso interromperá o ciclo de realimentação.

Nos dias que se seguem, o filósofo começa-se a familiarizar com os padrões de luz que observa no cérebro — no seu próprio cérebro — diante dele. Descobre, com surpresa, que grande parte do cérebro está escura, só uma pequena parte, ou partes (cerca de 10%), está verdadeiramente acesa. Todas as partes do cérebro, no entanto, são postas em ação uma vez ou outra. Explora o córtex motor, movendo os dedos das mãos e dos pés, contraindo os lábios, etc. Ativa o seu hipocampo de cada vez que pretende recordar-se de alguém ou de qualquer coisa com a qual teve contato há alguns meses. Mas as memórias anteriores a cerca de três anos — as recordações da infância — estão armazenadas, de uma forma complexa, no neocórtex, e não no hipocampo. Em breve se familiariza com as várias partes do seu cérebro. Mais tarde, começa a exploração do seu "pensamento silencioso" — realiza cálculos de cabeça, imagina unicórnios e tem fantasias eróticas — e descobre os pontos ativos do seu cérebro, correspondentes a estes pensamentos. Por vezes, os pensamentos não são representados por nenhuma atividade local das luzes, mas formam um padrão que se espalha por todo o cérebro. Apercebe-se também de que, embora possa ativar um padrão específico, pensando num dado assunto — mantendo, por exemplo, a noção do número nove na sua mente —, se passam muitas mais coisas no modelo cerebral. Surgem padrões que não reconhece e que, presumivelmente, correspondem a processos ocorridos muito abaixo do seu nível de apreensão, o inconsciente.

Uma característica especialmente instrutiva do SMC é a possibilidade de "repetição em câmara lenta". A maioria dos padrões cerebrais aparecem e desaparecem com brevidade demasiada para que o filósofo os possa observar em tempo real. Mas pode repeti-los tão lentamente quanto queira. Os padrões cerebrais em câmara lenta revelam uma estrutura inteiramente nova de complexidade pormenorizada, que acontece demasiadamente depressa para ser observada em tempo real. Uma coisa de que o filósofo se apercebe ao observar a repetição em câmara lenta é que, por aquilo que lhe é dado observar, os neurónios disparam deterministicamente — se um dado neurónio

dispara, então outros cinco neurónios específicos disparam logo a seguir. Estes, por seu turno, fazem com que outros neurónios específicos sejam disparados ou inibidos. Observado a esta microescala temporal, o cérebro aparenta ser uma vasta máquina determinística.

O filósofo fica extremamente impressionado com este dispositivo e, em breve, consegue um domínio razoável do sistema. Em tempo real, aprende a gerar padrões específicos, fazendo um simples apelo a certos pensamentos. Em contraste com o determinismo que observou na microescala de tempo, tem agora uma sensação de liberdade total, consegue observar as luzes, a fazerem o que ele quer através de simples pensamentos. De facto, começa-se a achar uma espécie de "artista de conceitos", criando bonitos efeitos de padrões de luz em movimento, limitando-se a seguir sucessivamente uma linha de pensamentos. Sente-se intrigado perante o paradoxo de o cérebro ser tão determinístico à microescala de tempo e, ao mesmo empo, parecer sujeito à sua vontade própria quando observado em tempo real. Acaba por concluir que o velho paradoxo da vontade própria e do determinismo seria resolvido se existisse uma "barreira de complexidade" entre a microescala de tempo, em que tudo é determinado, e a escala de tempo real, em que tudo é livre.

Um dia, um amigo biólogo resolve visitá-lo e ele mostra-lhe aquilo de que é capaz. O biólogo não fica muito impressionado pela resolução do paradoxo da vontade própria e do determinismo e diz-lhe que continua a pensar que o problema permanece em aberto. Sugeriu ao filósofo que, em primeiro lugar, montasse alguns dispositivos eletrónicos de medição do tempo, a fim de examinar o problema do corpo-mente. "Ao fim e ao cabo", diz o biólogo, "com esta máquina, o problema pode ser resolvido experimentalmente. Se os pensamentos surgirem primeiro do que os disparos dos neurónios, é porque a tua mente é distinta do teu cérebro — o teu cérebro faz apenas aquilo que a tua mente lhe dita. Se, por outro lado, os padrões neurónicos surgirem primeiro, e só depois tu tomares consciência do pensamento correspondente, o teu cérebro estará simplesmente a funcionar, e tu, conduzido por ele, estarás necessariamente a segui-lo. Temos de ser muito cuidadosos com esta experiência, pois a diferença de

tempo, em qualquer dos casos, será, provavelmente, muito pequena."

Para horror do filósofo, e em conflito total com o sentimento de liberdade que sentira ao criar os padrões cerebrais, os resultados da experiência mostram que os padrões e as regiões dos cérebros eram ativados cerca de meio segundo antes do momento em que se apercebia deles. A sua consciência, mesmo o próprio facto de se aperceber da sua liberdade, são uma consequência do cérebro, e não o contrário.

O filósofo não está disposto a aceitar esse facto sem discussão. Tenta pensar mais depressa do que a reação do modelo; muda muitas vezes de ideias e com extrema rapidez. Mas, como se estivesse a tentar ser mais rápido do que a sua imagem no espelho, os seus esforços são em vão. Cada uma das suas tentativas de "pensar antes" do modelo cerebral redunda em fracasso. Não faz mais do que seguir os padrões. É um escravo total dos sinais neurónicos preexistentes no seu cérebro. Cai num desespero depressivo, (também precedido em cerca de meio segundo pelo modelo cerebral) quando se apercebe de que a sua vontade própria não passa de uma ilusão; tudo se reduz a um grupo de acontecimentos neurónicos ativadores e inibitórios.

"Anima-te", diz-lhe o amigo biólogo, "que diferença te faz se o cérebro for ativado antes de 'tu' te aperceberes do pensamento? O teu cérebro só faz alguma coisa se tu quiseres. Talvez esse 'tu' seja apenas mais um padrão complexo do cérebro, e que interessa se não responder a informações vindas de outras partes do cérebro antes de elas surgirem no modelo? Não te esqueças de que essas decisões não serão sequer executadas a não ser que tu o decidas." À medida que vai escutando o seu amigo, o filósofo observa a reação do modelo a esta nova informação; algo se mexe no cérebro do filósofo.

"Já compreendi", diz o filósofo, "não me tenho estado a identificar com o modelo cerebral amplificado que ali está, mas aquele, na realidade, sou eu, ou, pelo menos, trata-se de uma representação fiel da minha mente, tal como uma imagem no espelho é uma representação fiel do meu corpo. Talvez seja uma melhor expressão do eu verdadeiro do que, digamos, a minha

cara, as minhas mãos ou o meu corpo. Sinto, todavia, que esta descoberta — de que o modelo cerebral 'antecipa' o meu pensamento — é semelhante à descoberta de que a imagem do outro lado do espelho é o 'verdadeiro' eu, e não apenas uma imagem. Mas tens razão; não faz diferença nenhuma. O filósofo Hannah Arendt comentou uma vez que o mal da psicologia do comportamento (*behaviourism*) não era tanto o facto de ser verdadeira, mas mais a possibilidade de o vir a ser. Muitas culturas caíram nessa rotina.

Durante as últimas semanas tenho andado a brincar com este sensor cerebral que me dá acesso a uma parte do meu organismo que não poderia observar de outra forma — o meu cérebro em funcionamento. Posso finalmente *observar* o meu pensamento da mesma forma que, quando quero, observo a minha mão a mexer-se. Aquilo que o meu cérebro faz é tão imprevisível como o tempo meteorológico — de facto, até é mais, porque o cérebro é capaz de gerar padrões muito mais complexos do que o tempo. Surgem montes de padrões e escolhas possíveis num órgão tão complexo, e aquilo que 'eu' sou é um padrão complexo que representa a execução de decisões conscientes. Todas essas escolhas e a execução de decisões estão inteiramente de acordo com as leis naturais. Isso é claro na repetição em câmara lenta — a microvisão. Mas o conhecimento dessas leis naturais não ajuda em nada a determinação da escolha que 'eu' vou, de facto, fazer, que padrões irão emergir — o cérebro é insimulável. E, por via disso, posso aceitar a realidade da minha liberdade mental. Compreendo agora o que deverão ter sentido os povos primitivos quando pela primeira vez contemplaram os seus rostos numa fotografia e pensaram que as suas almas lhes tinham sido roubadas. Mas, como é evidente, elas não o tinham sido."

O biólogo, no entanto, não está disposto a deixar o seu amigo acabar tão facilmente e pergunta: "Sabes por que te custou tanto ver o sensor mental como a tua mente — a identificares-te com o modelo? Conjeturo que, no fundo, tu não quiseste ver a tua mente inteiramente sustentada pelo teu corpo. Pois, se a tua mente for inteiramente sustentada pelo teu corpo, terás de morrer com esse corpo. A crença numa alma imortal não é fácil de abandonar!"

"Estás errado", diz o filósofo. "Aceito a minha mortalidade pessoal. Mas aqueles padrões incríveis que no meu cérebro representam ideias de números, de linguagens, de música, de sentimentos profundos e de Deus, aqueles padrões podem surgir noutros cérebros, noutros organismos, naturais ou artificiais. Karl Popper falou da existência de três mundos — o mundo material das coisas, o mundo mental dos nossos pensamentos, sentimentos e emoções e um terceiro mundo constituído por conceitos eternos, partilhados por todas as mentes, como sejam os conceitos transcendentais da matemática pura. O terceiro mundo de Popper era simplesmente a noção de 'mente absoluta' da filosofia idealista do século XIX, encoberta por uma indumentária do século XX. Estes conceitos transcendentais são representados por uma rede complexa de padrões neurónicos. E a coerência, profundidade e beleza desses padrões são imortais, uma possibilidade eterna, coexistente com o nosso universo. Aquilo que *eu sou*, essencialmente, é já eterno. O resto morre com o meu corpo.

A minha mente faz parte da natureza, da ordem eterna do universo, e é um erro pensar de outra forma. Alguns poderão querer dizer que isto não passa de um retrocesso — a natureza não passa de uma ideia mantida pela minha mente. Mas, de facto, como eu agora me apercebo, não há qualquer inconsistência entre estas ideias."

"Continuo a achar que andas a enganar-te a ti próprio", diz o biólogo, sorrindo.

Acaba por prevalecer uma sensação de paz e compreensão, e tanto o biólogo como o filósofo se calam. O modelo gigante do cérebro repousa, não exibindo mais do que uma cintilação eventual ou uns tantos movimentos periódicos.

Em resumo: o monismo, embora possa oferecer um sentido espiritual de consistência ou de simplicidade materialista, não resolve o problema do corpo-mente: ignora-o. Ao ignorar uma distinção, perde uma oportunidade de aprendizagem. Além disso, o monismo pode perder de vista a dimensão ética da vida humana. O dualismo (a perspetiva de Descartes) caracteriza a posição em que nós, seres pensadores e com sentimentos, nos

encontramos. Mas diversas formas de dualismo — o categórico, o de substância e o de propriedades — ou estão erradas ou são becos sem saída. O dualismo epistémico (a perspetiva de Kant) não é um dualismo da mente e do corpo, mas dos processos de raciocínio de que nos servimos para examinar o mundo — uma cisão entre a razão teórica, que vê aquilo que em princípio deve ser verdade, e a razão prática, que vê aquilo que na prática é possível. Defendi esta posição não só porque ela está de acordo com a nossa experiência, mas também porque coloca nas primeiras páginas do calendário de investigação das novas ciências da complexidade os limites do que, tanto em princípio como na prática, é possível conhecer no problema do corpo-mente. E é aí que eu acho que ela deve ficar.

Antes de terminar este capítulo, gostaria de contar ainda mais uma história.

Em 1984, o décimo quarto dalai-lama do Tibete, Tenzin Gyatso, visitou os Estados Unidos. Na minha qualidade de director executivo da Academia de Ciências de Nova York, recebi uma carta do encarregado de negócios do Tibete em Nova York, dizendo que o dalai-lama estaria interessado em ter uma discussão com cientistas ocidentais sobre temas como a física moderna, a cosmologia, a psicologia e a biologia — um intercâmbio transcultural. Consegui que alguns dos meus colegas da Academia de Nova York e da Universidade de Rockefeller e mais alguns de Harvard e de Yale, num total de onze eminentes cientistas, viessem encontrar-se, uma tarde, com o dalai-lama.

Estava um tanto ou quanto preocupado com a possibilidade de o dalai-lama, que se poderia fechar na dignidade formal do seu alto cargo, e os meus colegas cientistas, habituados à troca informal de ideias, não conseguirem uma comunicação eficaz. Mas os meus receios não tinham qualquer fundamento, como me apercebi logo que o dalai-lama chegou — ele tinha um sentido da vida muito rico; tratava-se de uma personalidade calorosa, aberta e bem-humorada; desenvolvia uma paixão e um interesse nos seus interlocutores.

A discussão, que teve lugar na biblioteca em estilo Tudor da Academia de Nova York, incidiu sobre temas ligados à

problemática do corpo-mente. O dalai-lama, assente na tradição ancestral do seu povo, bem como na sua própria experiência, defendia que a essência da mente era uma realidade independente, embora alguns dos seus aspetos eventuais, tais como a personalidade, os gostos e os valores, estivessem ligados ao corpo, ao mundo físico e a circunstâncias históricas. Como muitos religiosos orientais, os Tibetanos mantêm uma crença na reencarnação — a perspetiva de que a essência do ser humano sobrevive à morte física e é reincorporada num novo corpo.

O dalai-lama tinha bons conhecimentos da ciência ocidental (tinha, sem dúvida, melhores conhecimentos do que os cientistas tinham de religião, filosofia e psicologia tibetanas) e estava bastante interessado em aprofundá-los. Impressionou-me a sua grande abertura. Era para mim evidente que a aprendizagem dos sábios tibetanos, a sua investigação da mente humana e a riqueza de conhecimentos psicológicos tinham muito a oferecer ao Ocidente, embora a tradução para uma base conceitual comum se pudesse revelar muito difícil. Na verdade, suponho que um dos motivos da sua visita era o de revelar aos Ocidentais, e aos cientistas em particular, a complexidade e a profundidade dos estudos tibetanos. Os comunistas chineses, que devastaram a cultura religiosa tibetana a seguir à sua conquista do Tibete, admiravam o Ocidente pela sua ciência e tecnologia. Talvez se os dirigentes comunistas chineses se apercebessem de que a cultura tibetana é tão apreciada pelos materialistas ocidentais começassem também a apreciá-la.

As diversas pessoas não revelaram uma grande convergência de ideias a respeito do problema do corpo-mente. Os cientistas, embora eu desconfie de que algum deles partilhasse dos pontos de vista do dalai-lama, não estavam de acordo com eles próprios. Foi um encontro muito animado, com uma boa troca de ideias. Sendo eu o moderador da discussão, não seria de bom tom que participasse ativamente. Contudo, já perto do fim, não pude resistir à tentação de pôr uma questão ao dalai-lama acerca da sua perspetiva da reencarnação.

Disse-lhe que uma das grandes ambições da ciência e da filosofia ocidentais era a construção de uma inteligência artificial — um dispositivo, construído unicamente a partir de componentes

eletrónicos, que pudesse mostrar um comportamento inteligente. Poderia falar como uma pessoa. O dalai-lama referiu que conhecia o programa da inteligência artificial.

Disse-lhe então que este aparelho seria construído (ou instruído) de forma a ser possível manter uma conversa profunda com ele, como se se estivesse a falar com um outro grande lama sobre a filosofia tibetana. Poderia, por exemplo, discutir, com sentido, as diversas etapas do *Bardo-Thol* (o livro tibetano dos mortos) ou aspetos da meditação profunda. Pus então a minha questão: "Vossa Santidade diria que esta inteligência artificial era um ser reencarnado?"

Ao ver que lhe estava a tentar pregar uma rasteira, atirou a cabeça para trás e riu-se da piada. Depois, tomando uma atitude séria e com um sentido do presente material que tinha caracterizado toda a sua discussão, apontou para o espaço em frente da cadeira (que estava vazio) e disse: "Ali, ali! Quando dispuserem de uma máquina dessas e ma puserem ali, na minha frente, voltaremos a discutir este assunto!" Por outras palavras, ponham-me isso na frente, ou então calem-se. Senti, contudo, uma satisfação interior por ele partilhar o meu ponto de vista do construtivismo estrito — é necessário conceber e construir, não basta falar de fantasias filosóficas. E, com esta nota de bom-humor, o encontro terminou.

[1] Em português: "Ribeiro do Amor". (*N. do T.*)
[2] Nome por que são conhecidos os norte-americanos na América Latina. (*N. do T.*)

CAPÍTULO 11

– O CORPO NUNCA MENTE –

What but the wolf's tooth whittled so fine

The fleet limbs of the antelope?

What but fear winged the birds, and hunger

Jeweled with such eyes the great goshawk's head?

Violence has been the sire of all the world's values.

ROBINSON JEFFERS

The Bloody Sire

Traduzido para português fica qualquer coisa como:

O quê se não os dentes do lobo aguçou tão bem

As patas ligeiras do antílope?

O quê se não o medo deu asas aos pássaros,

[como a fome

Brindou com tais olhos a grandiosa cabeça do açor?

A violência tem sido a mãe de todos os valores

[do mundo.

Um colega meu queixava-se da sua dificuldade em ensinar os conceitos elementares da mecânica quântica aos estudantes dos cursos não científicos, numa grande universidade. Dizia ele que os estudantes eram espertos, mas estavam apáticos; pura e simplesmente, não se mostravam impressionados com os conceitos notáveis da física quântica. Não consegui compreender por que motivo ele estaria a sentir estas dificuldades, e tentei avançar com algumas sugestões: "Mostra-lhes como os eletrões podem ultrapassar uma barreira, como se nela existisse um túnel — é a mesma coisa que atravessar uma parede. Isso é quase mágico: não tem nenhuma correspondência no mundo da nossa experiência corrente. Ou fala-lhes do conceito de campo quântico

— como tudo o que existe no universo é representado por campos que impregnam o espaço e se movem no tempo e que especificam a probabilidade de encontrar partículas quânticas. Não há dúvida de que essa é uma maneira estranha, ainda que correta, de ver o nosso universo."

Mas este meu amigo apressou-se logo a dizer que já tinha experimentado isso tudo, sem quaisquer resultados. O motivo por que não conseguia interessar os estudantes resumia-se a que eles não viam nada de especial na teoria quântica. Tendo crescido num ambiente de televisão, livros e revistas cientificamente irresponsáveis, os estudantes acreditavam em perceção extrassensorial, discos voadores, viagens mentais a outros mundos, além de todos os géneros de fenómenos psíquicos. Em comparação, a mecânica quântica parecia insípida, até mesmo antiquada. De acordo com alguns inquéritos, cerca de 70% dos alunos de licenciatura das universidades norte-americanas acreditam em algum tipo de forças psíquicas ou sobrenaturais que caem fora do âmbito das ciências naturais. Infelizmente, a ciência empírica não tem hipóteses de competir lado a lado com o entusiasmo oferecido pelas ciências ocultas. Sempre que haja um concurso entre a razão e a emoção, a emoção tem a vitória assegurada, pelo menos a curto prazo.

Adoro passear pelas livrarias de livros ocultos, quando mais não seja para renovar o meu empenho pela ciência. É uma literatura sem qualquer tipo de humor. Mas lá que os autores têm uma grande imaginação, isso têm! Embora a sua imaginação espontânea e os seus sentimentos não possam mentir, a interpretação que deles fazem pode ser profundamente enganadora, servindo os seus próprios interesses. Como consequência, o conteúdo factual destes livros é quase inteiramente fraudulento. O que, no entanto, não é fraudulento nestes livros é a grande necessidade humana de uma ligação espiritual às forças que eles revelam. Com o sentir dessa ligação, surge uma sensação de poder e de estima que falta normalmente às pessoas que leem estes livros. Aqui, essas pessoas podem encontrar uma aceitação que não se baseia no seu valor social.

A literatura oculta fala da necessidade de liberdade individual e de evasão do mundo material terreno. Contudo, encontram-se

menções de hierarquias em toda a literatura oculta — os poderes espirituais superiores e inferiores, os níveis de conhecimento e de consciência, os seres maiores e os seres menores, os iluminados e os não iluminados, os mestres e os iniciados, e por aí adiante, hierarquias estas que refletem as hierarquias verdadeiras em que vivemos. E as pessoas que se tornam obcecadas por estas coisas estão normalmente a tentar posicionar-se numa destas hierarquias espirituais, esperando atingir um maior nível de consciência, submetendo-se muitas vezes a uma personagem autoritária ou a uma certa disciplina. O resultado pode ser uma forma de escravatura mental, uma forma terminal de desenvolvimento consciente que é promovida como "a iluminação". Nenhum bem moral pode acabar por vir do que não é verdadeiro. Um bom antídoto contra a literatura de ocultismo é a revista *The Skeptical Inquirer*[1], que relata e examina, de forma crítica, os fenómenos paranormais.

Embora as descobertas da teoria quântica pareçam insípidas, quando comparadas com as "descobertas" dos ocultistas, têm, pelo menos, a característica de serem verdadeiras, quer se acredite nelas, quer não. A teoria quântica, surgida no final dos anos vinte, alterou completamente a forma como os físicos imaginavam o mundo físico. As ideias deterministas e causais da física newtoniana, que se tinham mantido inalteradas durante vários séculos, modificaram-se radicalmente quando foi necessário encontrar uma descrição matemática do átomo quântico. Já não era possível manter por mais tempo uma imagem mecânica, visualizável, do mundo atómico — o tipo de imagens a que os físicos newtonianos estavam habituados. A teoria quântica forçou os físicos, contra as suas tendências intelectuais conservadoras, a tirar conclusões inteiramente novas acerca da natureza da realidade, conclusões essas que transformaram o mundo em que vivemos.

A ciência empírica, da qual faz parte a teoria quântica, funciona, desenvolve-se e amadurece. É frequente os cientistas descobrirem novos territórios da realidade e as pessoas de espírito prático transformarem essas descobertas em novos processos, produtos e por vezes grandes feitos — vacinas que erradicam doenças, medicamentos e operações que avaliam o sofrimento e prolongam a vida útil, sistemas eletrónicos de comunicação que

abrangem todo o planeta, viagens à Lua e a outros planetas —, feitos espantosos e maravilhosos que tornaram a civilização moderna possível. Ninguém tem sérias dúvidas de que a ciência funcione. Mas por que é que funciona? Que fazem os cientistas para que a sua empresa seja tão extraordinariamente bem-sucedida? Neste capítulo, vou-me esforçar por responder a estas questões. É crença comum que a resposta está naquilo a que vulgarmente se dá o nome de "método científico".

Existe uma vasta bibliografia filosófica dedicada ao método científico — são tentativas para averiguar a razão por que a ciência funciona e descobrir o que fazem os cientistas. A maioria desses livros não tem o mínimo valor. São muitas vezes escritos por filósofos que nunca examinaram a verdadeira conduta de um inquérito, tal como os cientistas o praticam, e que nunca efetuaram nenhuma investigação científica. O método da ciência torna-se, então, não naquilo que é, mas naquilo que deveria ser. Toma proporções obscuras, desliga-se da prática e torna-se praticamente irreconhecível, especialmente para os cientistas.

É evidente que também há alguns cientistas que escrevem sobre os métodos da ciência (especialmente à medida que vão ficando velhos), e estes têm a vantagem de "saber de que é que estão a falar". Não fazem, por isso, os mesmos erros que os filósofos. Mas não são, por seu turno, sensíveis por vezes aos problemas filosóficos do método — sabem aquilo que "funciona", mas não *por que é que* um método conduz a um conhecimento rigoroso que distingue a ciência da pseudociência. Eu próprio simpatizo mais (o que não é surpreendente) com os cientistas praticantes, pessoas como o biólogo Claude Bernard, o físico Albert Einstein ou o fisiologista Peter Medawar, que escreveram sobre o método científico.

Os métodos dos cientistas já foram descritos de formas tão diversas como um procedimento lógico e preciso ou como uma completa anarquia. Irei descrever, a seguir, algumas das ideias principais. Mas antes de o fazer irei descrever a minha própria perspetiva, para que o leitor possa saber aonde quero chegar.

Penso que é errado descrever a conduta da investigação científica como um "método", uma receita que prescreve um

conjunto de regras. Pura e simplesmente, não existe um "método científico" formal, pois as descobertas científicas são demasiadamente complexas, de uma complexidade que reflete a complexidade do próprio mundo material. É por causa dessa complexidade que os elementos irracionais e intuitivos são uma parte indispensável do processo de descoberta.

Os cientistas não são educados ou treinados para seguir nenhum método científico, nem, de facto, seguem mais regras do que, digamos, um homem de negócios ou um advogado Não existe nenhum "sistema parcial" de investigação científica, embora algumas das qualidades que lhe seriam necessárias possam ser formalizadas. Os cientistas, ao realizarem o seu trabalho, possuem um "conhecimento tácito" — um conhecimento intuitivo semelhante ao saber guiar uma bicicleta, que pode ser experimentado e, sendo experimentado, também pode ser descrito, mas que não pode ser devidamente formalizado sob a forma de um conjunto de regras úteis. O método científico dos livros (que existe) ensina-nos tanto sobre o modo como se faz ciência como um guia de bicicletas nos poderia, eventualmente, ensinar a andar de bicicleta. É todavia possível traçar um esboço daquilo que os cientistas fazem; penso que o "sistema hipotético-dedutivo" é uma boa aproximação. Basicamente, o "sistema hipotético-dedutivo" consiste em fazer uma conjetura esclarecida, uma hipótese científica, seguida de rigorosa verificação e crítica dessa hipótese. Este não é o único método utilizado pelos cientistas, mas já transmite a ideia principal — o método científico é uma mistura doseada de inspiração e rigor. A marca que distingue um grande cientista consiste em encontrar as "doses adequadas".

Uma coisa é *descrever* o método científico, outra coisa é dizer *por que é que* ele funciona. A ciência funciona porque estuda um mundo ordenado que pode ser conhecido por uma mente ordenada. Ninguém sabe por que o mundo é ordenado. Mas não se pode negar que o é. Para dizer a verdade, *aquilo que* sabemos desse mundo ordenado e a forma como o vemos são determinados, em parte, pelas nossas próprias cultura e história. Estamos restringidos pelas limitações impostas pelos nossos instrumentos e técnicas e pelas limitações cognitivas que se refletem nas teorias que inventamos. Contudo, apesar da

influência destes fatores externos, a razão por que pode existir conhecimento científico reside, em última análise, na natureza do mundo — a existência de um código cósmico —, uma razão que não pode ser rejeitada sem se rejeitar também mais de um milhar de anos de investigação científica e descobertas.

Os átomos, as galáxias, as bactérias, as células e os vírus já foram todos, em tempos, desconhecidos, mas vieram depois a fazer parte do reportório da realidade. A ciência explora eficazmente a realidade. Porquê? Suponho que a ciência é eficaz por ser um "sistema seletivo", semelhante ao processo evolutivo e à economia de mercado. Um sistema seletivo discrimina e seleciona elementos específicos de um dado conjunto — um reportório de objetos ou conceitos bem definidos —, com base em alguma característica ou propriedade. No caso da investigação científica, são selecionadas hipóteses definidas, conjeturas cuidadas que fundamentam uma teoria. A pressão competitiva, o mecanismo de seleção, têm origem num ambiente de experiências, revisões e comentários fortemente críticos que seleciona um pequeno número, normalmente apenas uma, das hipóteses contidas no reportório.

Mas as teorias científicas que incorporam essas hipóteses não são verdadeiras apenas porque sobrevivem à competição, da mesma maneira que uma espécie não é "verdadeira" pelo simples facto de sobreviver. Uma teoria científica não pode estar absolutamente correta da mesma forma que um dado teorema matemático é verdadeiro. Uma teoria poderia ser falsa e, ainda assim, ter consequências verdadeiras. Mas o facto de não existir uma certeza absoluta no que respeita às teorias científicas também implica que, ao contrário de um teorema matemático, elas permaneçam abertas e vulneráveis à mudança. E é graças a essa capacidade de mudança que as teorias podem evoluir. Por vezes acontece que uma teoria científica persiste durante muito tempo num ambiente de verificação e crítica. É então que, tal como as baratas, que também persistiram durante muito tempo, adquire um sentido de existência "permanente". De facto, é possível que, algures no futuro, as baratas sejam suprimidas por uma outra espécie. Da mesma maneira, as teorias científicas podem vir a extinguir-se. Se, contudo, elas se mantiverem, como as baratas, então tornam-se parte do nosso reportório da

realidade, ao lado dos átomos, do ADN, ou mesmo dos quarks, simplesmente porque existem e tiveram tanto sucesso durante tanto tempo. A ciência empírica é um sistema seletivo para encontrar o código de construção do demiurgo.

E isto resume o meu ponto de vista. Gostaria agora de voltar a algumas das ideias acerca do método científico que as pessoas propuseram no passado.

Os cientistas e os filósofos da ciência descrevem a conduta do inquérito científico em duas grandes correntes — "o método indutivo" e "o sistema hipotético-dedutivo". Para quem desejar consultar uma abordagem contemporânea bem escrita, recomendo vivamente os dois ensaios de Peter Medawar: "Induction and intuítion in scientific thought" e "Hipothesis and imagination". Embora Medawar ignore quase inteiramente os filósofos e cientistas europeus, esses ensaios são excelentes.

Regra geral, indução significa a discussão desde as circunstâncias particulares até às gerais; a dedução significa a discussão no sentido inverso. Embora possa, à partida, parecer que dedução e indução são igualmente válidas e rigorosas, visto que "sobem e descem a mesma escada", elas não o são. Só o raciocínio dedutivo pode ser desenvolvido de maneira rigorosa. (Os matemáticos têm um tipo de demonstração chamado "método da indução", mas este é um uso especial da palavra *indução* e não se aplica à nossa discussão.) Hoje em dia já praticamente ninguém acredita que o método indutivo seja rigoroso ou descreva o método científico. Contudo, os cientistas, quando escrevem artigos ou dão conferências, atuam muitas vezes como se nele tivessem alguma confiança. De acordo com o cenário indutivo, primeiro surgem os factos e depois, como faria um grande detetive trabalhando com as suas pistas, os cientistas arquitetam uma grande teoria. Como uma paróquia que tivesse abandonado a sua fé, alguns membros da comunidade científica continuam a representar o método indutivo como se de uma cerimónia religiosa vazia de significado se tratasse, na esperança de inspirar um sentimento de piedade. E então a dedução?

Os únicos exemplos de provas dedutivas podem ser encontrados na matemática e na lógica. Começa-se com um

conjunto de axiomas e definições gerais, como os axiomas de Euclides da geometria plana. Fazendo apenas uso desses axiomas e das regras da lógica — que também podem ser axiomatizadas — , os matemáticos deduzem os teoremas. Esses teoremas são afirmações sobre os objetos matemáticos, como a afirmação de que dois ângulos interiores de um triângulo isósceles são iguais. A prova matemática é tão rigorosa que pode ser reduzida a um procedimento mecânico — os computadores podem despejar mecanicamente demonstrações de teoremas. Mas a lição a tirar desses sistemas dedutivos é que *nunca* se consegue tirar de lá mais do que o que se lá pôs de início — os axiomas e definições gerais. Embora os resultados possam ser surpreendentes, mesmo espetaculares, limitam-se todos a decorrer dos axiomas e definições judiciosamente escolhidos.

Os cientistas empíricos, no entanto, não observam no laboratório nada que se assemelhe a um axioma geral. Em vez disso, observam e descobrem novos factos naturais. Como chegam eles ao ponto de formular princípios gerais da natureza a partir simplesmente de um rol de factos sobre o mundo que nos rodeia?

Uma resposta possível para a ciência contemporânea levar-nos-ia a Francis Bacon, uma ovelha negra da Universidade de Oxford, que no século XVII popularizou a noção de que para atingir os segredos da natureza não basta realizar observações passivas, sendo antes necessário efetuar experiências. Também adotou o método indutivo de avanços lógicos, partindo do particular para atingir o geral.

Aplicamos o método indutivo na nossa vida todos os dias. Por exemplo, uma pessoa bebe um copo de leite numa terça-feira e numa quinta-feira e, refletindo sobre o assunto, lembra-se de que andou mal do estômago precisamente nesses dias. No sábado, esta mesma pessoa realiza uma experiência, bebendo um copo de leite, e realmente sente-se mal do estômago. A partir desta sequência de acontecimentos específicos, conclui então que o leite lhe perturba sempre o estômago. Da mesma forma, um físico experimental pode manter um dispositivo delicado para efetuar medições de energias iniciais e finais de um processo complexo de colisão de partículas quânticas. De cada vez que o processo tem

lugar, a energia final é igual à energia inicial, dentro dos limites do erro experimental. O cientista verifica o processo com outros exemplos e formula então o princípio geral da conservação da energia — mais uma vez, uma argumentação em que se vai do particular para o geral. Será isto o que os cientistas fazem — reunir os factos e formular depois conclusões gerais?

A resposta é um não definitivo — não na prática e não em princípio. Os cientistas, ao dedicarem-se a uma experiência, têm já algo em mente, um pensamento enquadrado, um conjunto de opções previstas do resultado futuro. Tal como a pessoa que, um dia, decidiu verificar a sua reação ao leite, os cientistas já têm hipóteses formuladas quando se empenham na recolha de dados. E com isto arrumamos a prática do método indutivo. Que acontece ao princípio da indução científica?

O filósofo político e social inglês do século XIX John Stuart Mill foi o grande proponente da aplicação do método indutivo à ciência, nos seus livros *A System of Logic*, *Problems of Life and Mind* e *Philosophy of Scientific Method*. A filosofia social de Mill manteve-se preponderante enquanto os interesses das classes mercantis, em ascensão na altura, concordavam com os interesses dos trabalhadores; contudo, nos finais do século, os seus pontos de vista perderam influência. Mill ignorou muitos dos desenvolvimentos científicos do seu tempo, como a teoria da evolução, a mecânica estatística e, ainda mais importante para o seu programa, a invenção da lógica formal por Augustus De Morgan e George Boole. Ernest Nagel, o filósofo de ciência na Universidade de Columbia, comentou a respeito de Mill: "O seu ódio ao obscurantismo, o seu amor pela clareza e a sua devoção apaixonada pela análise cuidadosamente fundamentada ganharam-lhe admiradores e emuladores, mesmo entre aqueles que rejeitam muitas das suas conjeturas e conclusões específicas." A sua força residia na sua clareza de pensamento e no seu empenhamento pela justiça.

A ambição de Mill era tornar o método indutivo logicamente rigoroso. Descreveu-o nos seguintes termos: "A indução é um processo de inferência; dirige-se do que é conhecido para aquilo que o não é; e qualquer operação que não envolva inferência, qualquer processo no qual a conclusão aparente não seja mais

geral do que as premissas iniciais, não cai dentro do significado do termo." Está tudo muito bem. Mas Mill prossegue: "A função da lógica indutiva é fornecer regras e modelos (que correspondem ao silogismo e às suas regras, no caso do raciocínio dedutivo) tais que, se e só se os argumentos indutivos a eles se conformarem, os mesmos se possam considerar conclusivos." O problema deste raciocínio é que a indução nunca é conclusiva.

Mill, no entanto, pensava que a indução funcionava e podia ser tornada rigorosa, uma vez que a natureza é inerentemente uniforme (elevou esta suposição de uniformidade ao nível de um "princípio fundamental" ou "axioma geral"). Há uma imagem que, na minha opinião, ilustra claramente a diferença entre indução e dedução e o problema envolvido no princípio de Mill da uniformidade da natureza.

Imaginem-se dois pontos num plano geométrico. Estes pontos são uma metáfora dos dados científicos reunidos no laboratório. O problema consiste em desenhar uma linha, uma metáfora de uma teoria, que passe por aqueles dois pontos. Se, seguindo Mill, apelássemos ao princípio da uniformidade da natureza, poderíamos supor que uma linha reta unindo os dois pontos seria a mais "uniforme". Era assim que Mill supunha poder-se deduzir uma teoria (a linha) a partir de algumas porções de dados (os pontos). Mas os mesmos dois pontos também podem ser unidos por um círculo, que não deixa de ser uma linha "uniforme", ou, de facto, por uma infinidade de outras curvas "uniformes". Mesmo havendo mais de dois pontos, continua a existir um número infinito de linhas que os podem unir. É impossível construir uma teoria única a partir de um número limitado de observações. A indução não é rigorosa.

Esta imagem também serve para sublinhar a diferença que há entre a dedução e a indução. Na dedução, começa-se pela teoria ou pelo axioma geral, representada por uma dada linha no plano geométrico. Depois, por simples observação, deduz-se quais são os pontos que caem sobre a linha — quais devem ser as observações, de acordo com a teoria. Mas, como já vimos, não é possível seguir em sentido inverso — de dados particulares para uma teoria única —, como pretende a indução.

Mill esperava que, tornando a indução rigorosa, o mesmo método que tinha demonstrado ser tão eficaz nas ciências naturais pudesse ser utilizado em prol da sociedade, ajudando a fazer avançar as ciências sociais então recentes. Mill estava profundamente enganado nesta sua pretensão. Em primeiro lugar, porque o sucesso das ciências sociais não tinha tanto a ver com o método que utilizavam; tinha mais a ver com o facto de a ordem material da natureza admitir leis normativas. Em segundo lugar (como foi salientado pelos principais críticos de Mill, os filósofos C. S. Pierce e John Venn), não existe nenhum método indutivo rigoroso — é impossível provar uma lei geral a partir de casos particulares; não é possível retirar de um sistema lógico mais do que aquilo que lá se pôs de início e esperar, depois, continuar a manter o rigor. Só a dedução é rigorosa.

Apesar destes grandes fracassos, o prestígio de Mill e os seus talentos de expositor eram tão grandes que os seus escritos deram voz à visão metodológica de uma grande parte, se não mesmo da maior parte, dos cientistas do seu tempo (embora duvide de que ele os tenha influenciado diretamente). A maioria dos cientistas, em especial nos países anglo-saxónicos, a ser metodologicamente refletida identificava-se com Bacon — acreditava no método indutivo. Num esboço autobiográfico, Charles Darwin, uma lenda viva no seu tempo, dizia que "trabalhava com base em princípios verdadeiramente baconianos e, sem qualquer teoria, recolhia os factos por atacado". Era, contudo, muito mais sincero nas suas cartas aos amigos, nas quais afirmava não ver nenhum interesse em recolher factos, a não ser que eles apoiassem alguma teoria. É evidente que Darwin já possuía a ideia central da evolução antes de conhecer a lei de Malthus — de que as populações crescem mesmo que excedam a capacidade das suas reservas alimentares. Darwin sabia, intuitivamente, aonde queria chegar. Mas até hoje os cientistas, como Darwin, prestam homenagem à indução baconiana, mesmo quando, na prática, usam um método completamente diferente. Também na filosofia a indução teve o seu papel. Hans Reichenbach escreveu: "O princípio da indução é aceite sem reservas pela totalidade das ciências e ninguém pode sequer duvidar seriamente desse princípio na sua vida quotidiana."

A defesa articulada do pensamento indutivo que Mill levou a cabo não surgiu desprovida de qualquer fundamento. Com efeito, Mill viu claramente que se o pensamento indutivo, no sentido mais lato em que o usava, *não* era rigoroso, nada restaria do conhecimento científico. A sua fundação vigorosa estaria perdida e as grandes teorias da ciência não passariam de conjeturas inspiradas. Mill queria provas, e não hipóteses sem qualquer base. Desconfiava da intuição e da imaginação humanas, uma deformação da educação utilitária que o seu pai lhe tinha conferido.

O adversário filosófico de Mill, no debate acerca do método científico, foi William Whewell, catedrático do Trinity College (em Cambridge), que tinha um conhecimento muito diversificado das ciências e que, nos anos quarenta do século passado, publicou o livro *The Philosophy of the Inductive Sciences*. A atualidade da visão de Whewell é evidente. É ele, sem dúvida, um dos pais do sistema hipotético-dedutivo. É certo que a sua experiência como cientista (foi ele quem introduziu o termo na língua inglesa) lhe foi muito útil para poder distinguir aquilo que os cientistas fazem dos mitos em redor do seu trabalho. Escreveu muito sobre diversos assuntos e, o que mais aqui nos interessa, reconheceu que os cientistas, ao recolherem os dados, impõem um elemento imaginativo da sua própria mente. Em pensamentos que faziam lembrar o filósofo Kant, escreveu: "Uma máscara de teoria cobre toda a face da natureza."

Whewell, ao contrário de Mill, compreendeu que os cientistas começam por avançar uma hipótese imaginativa, uma conjetura esclarecida. "Uma facilidade em formular hipóteses", dizia Whewell, "em lugar de constituir um defeito no carácter intelectual do descobridor, é, portanto, uma qualidade indispensável ao desempenho da sua tarefa. Formular hipóteses e depois desperdiçar muito trabalho e talento a refutá-las quando elas não vingam é prática comum das mentes inventivas. [...] Uma vez que o investigador tem constantemente de avançar no seu trabalho por meio de hipóteses, falsas e verdadeiras, é muito importante que disponha de talento e meios para *verificar* rapidamente cada hipótese, à medida que ela se apresenta." Esta descrição do processo de descoberta não é a de um investigador inocente que recolhe factos como quem apanha conchas na praia para mais

tarde as separar. Mas é, de facto, uma descrição do verdadeiro procedimento que os cientistas costumam usar: primeiro é formulada a hipótese, depois o aparelho crítico e rigoroso da experiência e da lógica surge em cena.

Whewell antecipou em mais de um século o sistema hipotético-dedutivo, que foi levado à sua formulação mais forte pelo filósofo Karl Popper. Whewell chegou mesmo a reconhecer a importância da falsificação — que as hipóteses nunca podem vir a ser provadas como verdadeiras; só se pode mostrar que são falsas. Do outro lado do canal da Mancha, o seu contemporâneo Claude Bernard, um grande biólogo, concordaria: "Uma hipótese é [...] o ponto de partida obrigatório de todo o raciocínio experimental. Sem ela não há investigação possível, nunca se aprenderia nada. Não se poderia fazer mais do que um amontoado de observações estéreis. Experimentar sem qualquer ideia preconcebida é pairar sem direção certa. [...] Aqueles que condenaram o uso de hipóteses e ideias preconcebidas no método experimental fizeram o erro de confundir a conceção da experiência com a confirmação do seu resultado." Para pessoas como Whewell e Bernard, os atos de descobrir e provar eram inteiramente distintos. A descoberta faz parte dos processos irracionais, intuitivos, da mente, enquanto a demonstração é um procedimento lógico rigoroso ou mesmo mecânico.

Por vezes, as descobertas são inteiramente acidentais, como a descoberta de Sidney Ringer da influência do cálcio na contração muscular. Por volta de 1900, Ringer estudava corações de rãs embebidos numa solução salina de água da torneira duplamente destilada. Um dia, o técnico encarregado da preparação da água adoeceu. Ringer preparou, ele mesmo, a solução e obteve resultados inteiramente diferentes dos anteriores. Mais tarde, ao interrogar o técnico, Ringer descobriu que ele não tinha destilado a água (retirando-lhe, assim, o cálcio), pois pensava que a água de Londres era suficientemente pura. Ringer aproveitou esta pista e descobriu o papel do cálcio na contração muscular. Muitas histórias como estas mostram que muitas grandes descobertas surgiram por acaso. Mas, uma vez efetuada a descoberta acidental, o investigador avança uma conjetura, uma hipótese que suporte a descoberta acidental, e prossegue verificando-a rigorosamente.

A maneira de pensar de Whewell perturbou grandemente Mill, que queria ver a luz da razão em tudo o que há de mais sublime nos grandes feitos humanos. Do ponto de vista de Whewell, a origem das hipóteses científicas não era explicada — elas surgiam das trevas para a ribalta da razão, impelidas apenas pela imaginação do cientista e, talvez, por uma descoberta acidental. Não passavam de conjeturas. O trabalho de Mill sobre a lógica da indução, no qual tentou torná-la rigorosa, era, em parte, uma reação ao livro de Whewell (que mais tarde respondeu a Mill num outro livro, *The Philosophy of Discovery*, publicado em 1860). Criticou Whewell por atacar a lógica do silogismo (o que de facto não era o caso). Mill era rigoroso, mas irrelevante. A maioria dos cientistas hoje em dia tomaria o partido do espírito, se não mesmo dos pormenores, da argumentação de Whewell, enquanto que a lógica de Mill é uma peça de museu vitoriano.

A discussão entre Mill e Whewell (que também envolveu outros, embora estas tenham sido as duas personagens principais na Grã-Bretanha) marca, na sua raiz, a diferença entre aqueles que pretendem estabelecer a certeza nas teorias da ciência empírica, uma certeza como a que surge nos teoremas da lógica e da matemática, e aqueles que se aperceberam de que tal certeza não é acessível. Os que tomam consciência da impossibilidade de um dia atingir a certeza não renunciam ao rigor lógico; limitam antes a sua aplicação aos pontos em que ele é apropriado — a *dedução* lógica das consequências verificáveis de uma hipótese geral e a determinação da coerência lógica de experiências e observações. Mas, como o método da descoberta envolve imaginação, sorte, aleatoriedade e conjeturas, a hipótese que está na base da descoberta terá também de ser uma conjetura inteligente, um salto em frente no desconhecido que é dado pela imaginação. Esse salto em frente é o que distingue os grandes cientistas dos outros.

A mesma dialética, entre os que buscavam a certeza nas ciências empíricas e os que tinham consciência da impossibilidade de alcançar esse objetivo, caracterizou também as discussões sobre o método científico no continente europeu. Kant, que colocou a filosofia da ciência no seu rumo atual e, ao fazê-lo, deu origem ao cisma entre a ciência e a filosofia da ciência, tinha uma visão muito moderna da natureza da hipótese científica —

apercebeu-se do seu carácter provisório. Nas notas das suas aulas, compiladas por um dos seus alunos e publicadas sob o título de *Einführung zur Logik*[2], comenta que, qualquer que seja a hipótese, é necessário ter por *certo* que ela possa possivelmente ser verdade. Kant via as hipóteses como conceitos nos quais podíamos acreditar como sendo certos, mas que, no fundo da nossa mente, saberíamos não passarem de "suposições... cuja certeza absoluta nunca atingiríamos".

A controvérsia em torno da natureza das hipóteses científicas atingiu a sua expressão máxima no final do século XIX, quando surgiu um debate sobre a verdade da existência dos átomos. Este debate pode ser muito instrutivo, quando examinado na nossa perspetiva de tentar compreender os métodos científicos. Das conferências científicas na altura, pode-se ver que físicos e químicos estavam quase equitativamente divididos em torno da questão. Debatia-se se os átomos realmente existiam ou se não passavam de meras "hipóteses" convenientes. Não havendo, na altura, nenhuma prova direta da existência dos átomos (essa prova só surgiu em 1905, com o artigo de Einstein sobre movimentos brownianos e as medições subsequentes de Perrin, baseadas na teoria einsteiniana), a controvérsia obrigava as pessoas a optarem entre as duas correntes de opinião acerca da natureza das hipóteses. Quais eram, então, as questões envolvidas?

A teoria atómica — a noção de que a matéria era divisível até se obterem algumas partículas discretas, e não mais do que isso — vem já desde tempos ancestrais, mas a versão moderna partiu das leis químicas descobertas por John Dalton em 1808 e por outros no princípio do século XIX. Em 1809, Joseph Louis Gay-Lussac anunciou os seus resultados que mostravam que os gases se combinavam segundo proporções inteiras, resultados esses que apoiavam as teses de Dalton. A hipótese atómica mais notável foi formulada em 1811 por Amedeo Avogadro, que afirmou que dois volumes iguais de dois gases diferentes, com as mesmas condições de pressão e temperatura, continham igual número de moléculas gasosas. Mais tarde, ainda no mesmo século, foram efetuadas várias tentativas para calcular o número de Avogadro para um volume fixo de gás. William Prout, um físico e químico amador (foi ele quem primeiro descobriu o ácido clorídrico no

estômago), formulou, em 1815, a lei de que os pesos atómicos dos elementos eram múltiplos inteiros do peso do hidrogénio, uma lei que, apesar de não estar absolutamente correta, conferiu mais alguma credibilidade à hipótese atómica. Curiosamente, o próprio Prout não a considerou uma prova em abono da existência de átomos. A essência destes e de outros desenvolvimentos foi que os cientistas compreendiam que as substâncias químicas se combinavam como se fossem formadas por átomos discretos. A química fornecia muitas provas indiretas da existência de átomos, mas nenhuma prova direta havia sido encontrada até então. Ninguém tinha ainda visto um átomo ou uma molécula.

Uma prova independente, mas ainda indireta, da existência dos átomos partiu dos físicos quando estes começaram a examinar os gases. Descobriram que, partindo do princípio de que os gases, tal como o ar à nossa volta, eram constituídos por uma enorme quantidade de átomos e moléculas, movendo-se em todas as direções até colidirem com um outro átomo, molécula ou qualquer outro objeto, podiam explicar as leis termodinâmicas dos gases já então conhecidas. Várias propriedades termodinâmicas dos gases, como a pressão e a temperatura, podiam ser facilmente explicadas pelo movimento molecular, de acordo com o que veio a ser conhecido por teoria cinética dos gases. Nos anos sessenta e setenta do século passado os físicos procuraram calcular os diâmetros das moléculas de ar. Apesar do sucesso da teoria cinética dos gases, a ideia de que os gases, e na verdade toda a matéria, eram constituídos por átomos não passava de uma mera hipótese.

O físico-filósofo Ernst Mach era um dos cientistas mais influentes da sua época, o fim do século XIX. Mach não acreditava na existência de átomos. Foram muitas as contribuições que deu à física (o número de Mach, que exprime a velocidade de um objeto em múltiplos da velocidade do som, é assim chamado em sua homenagem), tendo formulado muitas questões profundas e penetrantes a respeito da mecânica de Newton. Mas Mach interessava-se também pela filosofia da ciência. Tal como Mill, Mach não via com bons olhos o uso de uma imaginação especulativa que fosse além dos factos e hipóteses experimentais garantidos pela observação. Mach achava que as teorias físicas — as descrições matemáticas da natureza — se deveriam manter

próximas das observações experimentais. Segundo ele, equações contendo quantidades não diretamente mensuráveis e que não podiam ser referidas a observáveis físicos do laboratório não tinham qualquer significado. Desta perspetiva, não é difícil ver por que é que Mach questionava a teoria cinética dos gases, uma teoria que punha a hipótese da existência de átomos invisíveis e cujas equações matemáticas referiam explicitamente o movimento desses átomos. Mach via os átomos como um artifício heurístico. "Não seria ciência física", escreveu, "ver em ferramentas operacionais, mutáveis e criadas pelos físicos — os átomos e as moléculas — realidades por trás dos fenómenos. [...] O átomo não deve deixar de ser uma ferramenta... tal como uma função matemática." Em última análise, as teorias físicas deveriam referir apenas quantidades *mensuráveis*, nunca quantidades referentes a entidades invisíveis e desconhecidas.

Mach defendeu a sua posição com grande integridade. Mas estava enganado a respeito da existência de átomos e dos méritos da teoria cinética dos gases. A estrada do progresso da física tomou um outro rumo. Os átomos tornaram-se parte integrante do reportório da realidade. Para além disso, as equações que descrevem o mundo material, conforme se tornou evidente com o advento da teoria quântica durante a década de 20, tornaram-se, por seu turno, muito abstratas, contendo muitas variáveis sem qualquer correspondência a quantidades observáveis. Contudo, estas equações abstratas eram, realmente, a linguagem da natureza, e aplicando-as era possível deduzir quantidades observáveis, medidas no laboratório.

Einstein aderiu, no início da sua carreira, à forma geral da filosofia de Mach (embora, ao contrário de Mach, acreditasse na existência de átomos; na verdade, foi ele quem mostrou como se poderia provar a sua existência). Nas suas *Notas Autobiográficas*, presta a seguinte homenagem a Mach: "Vejo a grandeza de Mach no seu ceticismo incorruptível e na sua independência; na minha juventude, no entanto, também a posição epistemológica de Mach me influenciou grandemente. Essa posição parece-me ser hoje, no seu essencial, impraticável. Isto porque Mach não analisou sob uma óptica correta a natureza essencialmente construtiva e especulativa do pensamento, sobretudo a do pensamento científico; como consequência, condenou a teoria precisamente

naqueles pontos em que o seu carácter construtivo-especulativo vem, indisfarçadamente, ao de cima, como se passa, por exemplo, na teoria cinética dos átomos."

Os primeiros trabalhos de Einstein sobre a relatividade restrita eram um exemplo da insistência de Mach em manter somente quantidades mensuráveis. Einstein, por exemplo, passou por cima de séculos de "bagagem metafísica" contida nos conceitos de espaço e de tempo, quando afirmou que "espaço" era aquilo que se media com uma vara métrica e "tempo" era aquilo que se media com um relógio. Mais simples que isto não é possível. Contudo, quando se dedicou à formulação da teoria geral da relatividade, a "obra-prima" da sua carreira, abandonou o caminho trilhado por Mach. A teoria geral da relatividade fazia uso da matemática dos espaços riemanninanos quadridimensionais curvos e de princípios abstratos de invariância. Depois de inventar a teoria geral da relatividade, Einstein descreveu o método que utilizou para lá chegar, numa carta dirigida a um seu amigo, o filósofo Maurice Solovine. Curiosamente, o que descreve na sua carta é, essencialmente, o sistema hipotético-dedutivo.

De acordo com a carta que enviou a Solovine, Einstein começou com o mundo da sua própria experiência e o conhecimento da física e da experimentação. Depois, com base neste conhecimento, fez uso da sua inspiração para formular uma conjetura, "um salto intuitivo" que o levou a um "postulado absoluto" — a hipótese. Este postulado não poderia, de maneira nenhuma, ter sido deduzido unicamente a partir da experiência; ia para além da experiência, embora fosse consistente com ela. O postulado absoluto do trabalho de Einstein era a ideia de que o espaço físico era um espaço riemanniano curvo, em que a curvatura é especificada pelas equações do campo gravitacional. O postulado absoluto não podia ser diretamente verificado. Mas, sendo o postulado um conceito logicamente preciso, era possível deduzir consequências empíricas a partir dele. No caso de Einstein, foram os três famosos testes da relatividade geral — uma pequena variação na órbita do planeta Mercúrio, a deflexão da luz ao passar próximo do Sol e o atraso dos relógios num campo gravitacional quando comparados com relógios colocados numa zona livre de campos.

Caso um dos testes falhasse, estando os resultados empíricos logicamente ligados ao postulado absoluto, este teria também forçosamente de falhar, sendo então necessária uma modificação ou mesmo uma rejeição. Consequentemente, o postulado absoluto é falsificável; é uma hipótese "científica". Caso, no entanto, os testes resultassem (como realmente aconteceu com a relatividade geral), não se poderia por aí concluir que o postulado absoluto se verifica. Teorias "falsas" podem produzir resultados corretos. Além disso, outros postulados poderiam ter conduzido às mesmas previsões — algo que a lógica não pode pôr de parte. Nunca será possível verificar um postulado científico com absoluta certeza. Contudo, à medida que um número crescente de testes se transforma com o postulado, a confiança na sua aplicabilidade vai aumentando. É claro por esta carta (e pela exposição mais completa da suas implicações por Gerald Holton) que Einstein compreendeu inteiramente aquilo que ficou conhecido por sistema hipotético-dedutivo.

Embora cientistas no ativo, como Einstein, compreendessem o papel da imaginação guiada, no trabalho científico, e se apercebessem de que o conhecimento científico era algo de efémero, prosseguiu a busca da certeza por parte dos filósofos da ciência. O círculo de Viena, liderado pelo filósofo Rudolf Carnap, envolveu-se num vasto programa de "empirismo lógico" ou "positivismo lógico", que procurou separar o conhecimento científico dos outros tipos de conhecimento, entre os quais a metafísica, a teologia e a literatura, conhecimentos a que muitas vezes "não atribuíam qualquer significado". Influenciados por desenvolvimentos então recentes da lógica formal e da filosofia da linguagem, os empiristas lógicos atribuíam aos filósofos da ciência o papel de examinar a lógica das leis científicas, o conjunto das afirmações sobre a realidade natural. A ciência era, para eles, um sistema de proposições lógicas. Comparavam a sua empresa ao trabalho rigoroso dos lógicos formais, com a única diferença de que, em lugar do conteúdo lógico de provas e teoremas matemáticos, examinavam as proposições da ciência empírica. Grande parte do seu pensamento girava em torno da noção de "verificabilidade" — as proposições científicas, ao contrário das proposições não científicas, deveriam ser verificáveis. Os filósofos do círculo de Viena lançaram-se numa separação furiosa daquilo que era verificável e tinha significado do que não passava de

disparates sem sentido. A filosofia, que fora, em tempos, uma serva da teologia, transformara-se numa meretriz da ciência.

O empirismo lógico era, na verdade, um programa radicalmente idealista, promovendo o perfecionismo dentro do conhecimento científico. E, como qualquer coisa "perfeita", não dispunha da flexibilidade e da adaptabilidade necessárias à sobrevivência. Enquanto verdade, não era relevante, e enquanto relevante, não era, muitas vezes, verdade.

A principal dificuldade do programa empirista lógico residia na noção de "verificabilidade". Carnap e os seus colaboradores consideraram, de início, o critério da verificabilidade como algo que possibilitasse uma clara demarcação entre as afirmações "com significado" e as "sem significado". Uma observação mais cuidadosa, no entanto, revelou que a ideia que tinham de verificabilidade não podia ser mantida. Como já disse atrás, as leis físicas podem ser falsas e, ainda assim, ter consequências verdadeiras; podiam ser falsas e continuar a ser "verificáveis". Isto não era, com certeza, o que Carnap pretendia. Numa idade mais avançada, recuou em relação ao seu programa verificacionista estrito e passou a usar o termo mais flexível de "confirmação". Escreveu, então: "Se a verificação é vista como um estabelecimento completo e definitivo da verdade, então nunca será possível verificar uma proposição universal, como seja aquilo que é conhecido por leis físicas e biológicas. Este facto tem sido frequentemente notado. [...] Podemos então, em lugar de verificação, falar antes em aumentar gradualmente a *confirmação* da lei." Mas mesmo a própria noção de graus de confirmação trazia algumas dificuldades.

Possivelmente mais do que qualquer outro filósofo, Karl Popper influenciou a reflexão em torno da ciência. No início da sua vida, esteve ligado ao círculo de Viena, tendo as ideias deste, especialmente o sentido do formalismo da filosofia da ciência, influenciado todo o seu trabalho subsequente. Mas foi Popper, inteiramente sintonizado com as ideias de Whewell, Einstein e outros anti-indutivistas, quem cortou com a filosofia verificacionista da ciência e quem levou o método hipotético-dedutivo à sua formulação mais alta.

O seu trabalho embrionário, *The Logic of Scientific Discovery*, começa com uma sessão de críticas ao indutivismo: "Este princípio de indução não pode ser uma verdade puramente lógica como uma tautologia ou uma proposição analítica." Prossegue os seus ataques com críticas ao critério verificacionista de verdade e propõe a noção de falsificabilidade não como um critério de verdade das proposições científicas, mas como um princípio de demarcação entre aquilo que é, e aquilo que não é, método científico. Nas suas palavras: "Estas considerações sugerem que não é a *verificabilidade*, mas sim a falsificabilidade, de um sistema que deve ser usada como um critério de demarcação. Por outras palavras: não vou exigir a um sistema científico que seja capaz de ser selecionado, de uma vez por todas, num sentido positivista, mas vou exigir que a sua forma lógica seja tal que ele possa ser selecionado, por meio de testes empíricos, num sentido negativista: *um sistema científico empírico tem de ser tal que possa ser refutado pela experiência.*"

O trabalho de Popper foi criticado pelos seus colegas filósofos, devido ao seu formalismo excessivo ou ao facto de focar a teoria, e não a prática, da ciência. Outros notaram que a ideia de Popper só explicava a racionalidade da ciência quando vista em retrospetiva, não em prospetiva. Mas, no geral (embora não fosse o primeiro), Popper expôs de forma clara o método hipotético-dedutivo e pôs, por isso, fim à busca, por parte dos filósofos, de uma certeza nas teorias das ciências naturais. Todas as teorias são, necessariamente, provisórias, ou mesmo "falsas", num sentido absoluto. Não podem nunca ser verificadas, só falsificadas. Terminou a ideia de leis naturais gravadas em tábuas eternas e imutáveis.

Uma consequência irónica do trabalho de Popper foi a abertura de portas a um tipo de filosofia da ciência inteiramente novo, que pouco tem a ver com o seu empenhamento na lógica e na objetividade. Se a verdade absoluta das teorias científicas é uma impossibilidade, que fazem os cientistas de tão especial e o que é que distingue os seus esforços dos de qualquer outra atividade cultural? Durante os anos sessenta e setenta, a enfâse intelectual começou a deslocar-se das explicações lógicas e formais para as descrições psicológicas e sociológicas das teorias científicas. A ciência era vista como uma atividade cultural, desenvolvendo-se

historicamente ao longo do tempo e sujeita a diferentes "estilos de raciocínio". Era o *processo* da ciência, e não o produto, que interessava a estes filósofos de ciência pós-popperianos. Foi o caso de Imre Lakatos, um filósofo de ciência húngaro que emigrou para Inglaterra e que via a ciência moderna como um conjunto de "programas de investigação", estendidos ao longo dos últimos séculos, representando estes "programas de investigação" o sentido da realidade científica. Como Ian Hacking, um filósofo inglês que ajudou a promover as ideias de Lakatos, notou: "Lakatos tentou fazer do crescimento do conhecimento um substituto para a teoria representacional da verdade."

Yehuda Elkana, um filósofo de ciência israelita, propôs a ideia de uma "antropologia do conhecimento" — a ideia de «que» a procura de universais humanos fora de um contexto cultural não tem qualquer significado". Mantendo-se coerente com a sua perspetiva antropológica, comparou as formas literárias dos teatros trágico e épico a formas distintas de olhar o progresso científico. Na sua opinião, a forma trágica reflete a "solenidade do funcionamento das coisas, livre de remorsos... a inevitabilidade do destino", escreveu ele. Em ciência, a forma trágica corresponde à perspetiva de "que as grandes verdades da natureza, não tendo sido descobertas por um Newton ou por um Einstein, acabariam, mais cedo ou mais tarde, por ser descobertas por qualquer outra pessoa". O progresso científico, como o vemos no seu desenvolvimento histórico, é inevitável. O teatro épico, pelo contrário, não vê nada como inevitável. Nas palavras do crítico cultural Walter Benjamin (citado por Elkana): "Pode acontecer desta maneira, mas pode também acontecer de uma maneira muito diferente." Elkana e outros pensadores sociais achavam que o rumo da investigação científica dependia de fatores históricos e culturais que eram imprevisíveis. Mas a maioria dos cientistas no ativo (incluindo Einstein, embora Elkana considerasse Einstein um proponente da perspetiva épica) não concordaria com esta opinião. Embora ninguém ponha em causa que os fatores culturais tenham o seu papel, o fator principal é a própria ordem material do universo. Não existe nenhuma "ciência comparativa", semelhante à literatura comparativa, das diversas culturas, pois as descobertas da ciência não são tão reguladas pela cultura quanto pela própria estrutura do universo.

A posição mais radical neste espectro de pensadores é ocupada por Paul Feyerabend, que, apesar da sua evidente formação superior, só pode ser descrito como um filósofo com uma certa pancada. O seu livro *Against Method* (1974) ataca todo o empreendimento da metodologia científica como algo mal-entendido e impossível. Feyerabend defende a ideia de que pode ser necessária uma reestruturação radical do conhecimento. Não vê qualquer distinção entre a conduta do inquérito científico e os achados das ciências ocultas. No seu ensaio "Como proteger a sociedade contra a ciência" observa: "A crítica que faço à ciência moderna relaciona-se com o facto de ela inibir a liberdade de pensamento. Se o motivo é ter encontrado a verdade e agora segui-la, então diria que se podem fazer coisas melhores do que primeiro encontrar e depois seguir um tal monstro." Ou, ainda no mesmo ensaio: "Três hurras pelos fundamentalistas californianos que conseguiram retirar uma formulação dogmática da teoria da evolução dos livros escolares e incluir uma versão do Génesis (sei, contudo, que eles se tornariam tão chauvinistas e totalitários como os cientistas de hoje se lhes fosse dada uma oportunidade de reger a sociedade. As ideologias são maravilhosas quando usadas em conjunto com outras ideologias. Tornam-se aborrecidas e doutrinárias assim que os seus méritos conduzem à eliminação das suas oponentes.) Tais comentários fizeram com que os poucos cientistas que o leram dessem saltos. Feyerabend provoca a consciência intelectual liberal de colegas filósofos ao extrapolar algumas das suas ideias até às suas conclusões lógicas e ficando, desta maneira, um pouco à sua frente. Exprimindo a sua posição extremista (é óbvio um convite à controvérsia) e argumentando veementemente contra qualquer pretensão de verdade por parte da ciência moderna, conseguiu atingir a coerência simples do niilismo. Considero-o muito refrescante. Até é provável que muitas das opiniões de Feyerabend sobre a ciência estivessem corretas se pudéssemos observar a nossa ciência de uma perspetiva futura — daqui a um milhar de anos, por exemplo; não temos, porém, nenhuma maneira de saber quais das suas opiniões, se é que algumas, subsistirão.

Embora não seja possível examinar aqui todos estes filósofos mais recentes, seria útil mencionar as ideias de Thomas Kuhn, quando mais não seja porque muitos cientistas leram o seu livro

The Structure of Scientific Revolutions, que teve uma influência notória.

Li o livro de Kuhn aquando da sua primeira edição. Na perspetiva de Kuhn, o inquérito científico corrente é conduzido dentro daquilo a que ele chama um "paradigma" — uma forma de fazer ciência, um enquadramento conceptual, um sentido comum da realidade natural. Uma revolução científica acontece quando se dá uma "mudança do paradigma". Ao fim de um longo período de "ciência normal", o consenso entre os cientistas começa-se a desintegrar, dá-se a revolução, e a ciência enceta então reformas em torno de um novo paradigma. Como exemplo, tem-se a mudança da teoria clássica para a teoria quântica ou da teoria da criação para a teoria da evolução.

O livro de Kuhn realça as transformações sociais e intelectuais no interior das revoluções científicas. Segundo ele, a geração mais jovem de cientistas adota o novo paradigma quando ele surge. Enquadram nele o seu trabalho, enquanto a geração mais idosa, incapaz de alterar a sua maneira de ser, guarda o antigo paradigma até à sepultura. A mudança científica é assim conseguida. Esta sucessão de gerações, em que os filhos enterram os pais, é contada de forma comovente no romance *Night Thoughts of a Classical Physicist*, de Russel McCommach. Este livro conta-nos a história de um professor universitário alemão, um físico clássico que viveu nas primeiras décadas deste século e que vê o seu mundo a desabar perante o advento das teorias quântica e da relatividade. Incapaz, tanto intelectual como emocionalmente, de suportar as alterações na sua visão do mundo, acaba por pôr fim à sua vida. Trata-se de uma forte "pressão seletiva". Também, a propósito, costumo pensar no capitão Fitz-Roy, comandante do *Beagle* durante a expedição de Charles Darwin e seu companheiro de conversa e de mesa de jantar. Fitz-Roy, um cristão e um criacionista devoto, nunca pôde aceitar as novas ideias evolucionárias de Darwin quando elas surgiram, e mais tarde, já depois de velho, costumava molestar os conferencistas que promoviam as ideias de Darwin. O livro de Kuhn menciona, de forma poderosa, as transformações sociais e intelectuais da história da ciência. Ainda assim, continuo a achar que ele não identificou a causa última da mudança científica, mas apenas a sua manifestação.

No derradeiro capítulo do livro intitulado *Progress through Revolutions*, Kuhn tenta explicar a razão por que o conhecimento científico progride enquanto noutros campos do empreendimento humano, como sejam a literatura e a teologia, não se assiste a este progresso. Embora identifique algumas características da ciência como a capacidade dos cientistas de concordarem a respeito de um único paradigma durante um período normal da ciência, que não se encontram em outros empreendimentos intelectuais, não explica por que é que a ciência detém essas características especiais e é, por isso, "progressiva".

A fim de compreender a razão pela qual a tese de Kuhn não consegue explicar a causa do funcionamento da ciência, decidi efetuar uma experiência intelectual a que darei o nome de "método da substituição de conteúdo". Imaginei que Kuhn não estava a falar de ciência, mas sim de alta costura, da forma como ela é periodicamente promovida em Paris e Nova York, com o objetivo de vender uma nova linha de roupas. Havia, então, períodos de mudança normais, alternados com grandes "variações do paradigma" ocasionais, impulsionadas pelas gerações mais novas. É curioso notar que conseguia imaginar muito daquilo que era dito no livro de Kuhn tão bem aplicado à ciência como à alta costura. Isso preocupa-me. O motivo por que esta substituição do conteúdo funciona tão bem reside em que, tirando o facto de a ciência descobrir a estrutura invariante da natureza, o código de construção do demiurgo, a conduta da ciência e a promoção das suas ideias se podem assemelhar ao mundo da alta costura.

Embora tome muitas vezes a forma de um conflito de gerações intelectuais entre os "filhos" e os seus "progenitores", uma mudança de paradigma declara-se dentro da comunidade científica unicamente por possuir um maior poder conceptual e explicativo. É um mapa da realidade de melhor qualidade e realiza um contato com o código cósmico — a ordem do cosmo. Não é devido a fatores sociais que um novo conjunto de ideias científicas se impõe, excetuando um ou outro caso em que as condições sociais eram severa e perversamente restringidas, como foi o caso da doutrina de Lysenko sob o regime de Stalin (que negava a validade da genética moderna) ou da ciência "ariana" no regime nazi (que afirmava que a física teórica era uma perversão judaica e que só a física experimental era pura e válida), e estes casos

são reconhecidos como tais. (Convida-se o leitor a aplicar o "método da substituição do conteúdo" ao livro de Kuhn, usando a ciência ariana — também uma "mudança do paradigma" — no caso de o exemplo da alta costura lhe parecer demasiadamente rebuscado.) Embora os estudos sociais e psicológicos da conduta do inquérito sejam muito elucidativos — do papel do apadrinhamento, da formação de elites científicas, da relação professor-aluno —, são relegados para segundo plano perante o facto indesmentível de as ciências naturais só se alterarem em resposta a novos ambientes experimentais ou a um mapa da realidade mais alargado que surja dentro da sua própria estrutura. Em resumo, a ciência altera-se quando descobrimos uma nova verdade acerca do mundo.

A metáfora mais importante a que Kuhn recorre é a de "revolução científica". Já muitas pessoas argumentaram contra esta metáfora, acusando-a de destorcer a natureza da mutação científica. É o caso do historiador francês Pierre Duhem, que contrapõe, na sua obra em dez volumes *Le système du monde* (1913), que a ciência foi evolucionária e não revolucionária e que a ciência do século XVII foi, na realidade, mais o resultado da culminação gradual da ciência medieval do que propriamente uma revolução.

Tem-se abusado um pouco do termo "revolução", que foi retirado do seu sentido de descrição de acontecimentos políticos, tais como golpes de Estado, para ser aplicado a alterações à nossa maneira de pensar, quer seja na ciência, na tecnologia ou num novo desenvolvimento comercial. A culpa desta apropriação mal cuidada pode ser, em parte, partilhada pelos historiadores de ciência e pelos cientistas, que pretendem chamar a atenção para o facto de haver grandes descontinuidades no desenvolvimento da ciência. Mas penso que a metáfora mais apropriada para a história da ciência (se vamos insistir em metáforas) não é a das mudanças humanas, sociais e políticas, mas sim a da evolução da vida na Terra. O motivo por que prefiro a metáfora natural à social é a última dar a sensação de as revoluções científicas serem um exercício de vontade e determinação, enquanto a primeira implica que a mudança seja forjada pelo ambiente da experiência humana ou pela própria ordem escondida da natureza, que são fatores

exteriores à vontade e objetivos humanos. É assim que me parece estar correto.

Nesta conjuntura, gostaria de explorar a metáfora da mudança científica vista como um sistema seletivo do mesmo tipo que a evolução. Em parte, gostaria de contrastar esta metáfora com a que é mais usada — a de uma revolução social —, que salienta os fatores sociais, culturais e psicológicos. A metáfora evolucionária salienta a importância de fatores materiais e ambientais, como novos instrumentos, métodos e ideias, e o facto (visto retrospetivamente) de que uma nova descoberta existia "já" pronta a ser efetuada. Não creio, no entanto, que seja possível acabar por separar inteiramente os fatores sociais, culturais e psicológicos dos fatores "materiais". Também eles fazem parte do ambiente. Não há dúvida de que é da interação entre estas componentes complexas — o mundo humano e a ordem da natureza — que resultam as alterações ao nosso conhecimento do mundo natural. A metáfora "revolucionária", no entanto, tornou-se tão corrente que muitas pessoas, com outras responsabilidades, desenvolvem e popularizam a ideia de que a ciência não passa de mais um empreendimento social. Este equívoco, tal como o ocultismo, merece ser censurado. Insisto em que as ideias científicas, devido à sua especial vulnerabilidade ao insucesso imposto pela verdadeira ordem da natureza, estão sujeitas a uma pressão seletiva autoimposta que não encontra qualquer paralelo. Trata-se de um critério de sobrevivência que transcende a cultura particular na qual nascem estas ideias científicas.

Penso que a ordem da mutação científica pode ser descrita, à semelhança da mutação evolucionária, como um sistema seletivo. Se o ambiente se altera, devido a uma revelação de um novo instrumento ou um avanço conceptual (que então se transforma num novo "instrumento" cognitivo), o mesmo acontece às teorias científicas. As teorias são selecionadas pela positiva e pela negativa e sobrevivem enquanto o ambiente empírico e cognitivo as apoia. O árbitro deste processo de seleção é a ordem invariante do mundo natural da forma que é revelada pela observação.

Kuhn também desenvolve a analogia evolucionária no último capítulo do seu livro, e isto é significativo. Salienta especialmente que a grande oposição às ideias de Darwin não foi devida à noção

de evolução (que muitos naturalistas já haviam defendido antes de Darwin), mas sim à sua ideia de que a evolução era cega, que as formas de vida não se encaminhavam para uma perfeição final. Kuhn sugere também, por analogia, que talvez a ciência não possua uma verdade final (uma hipótese salientada por C. S. Pierce por razões semelhantes). No entanto, do que Kuhn se esquece nesta analogia é de que a grande pressão seletiva exercida sobre as ideias científicas é exterior à ciência — trata-se da ordem invariante da natureza. Ao longo do seu livro, Kuhn foca principalmente as mudanças da ciência devidas a desenvolvimentos *internos* na comunidade científica. Privada dessa distinção crucial, a ciência assemelhar-se-á a qualquer outro empreendimento humano, à indústria de alta costura. Ou por lapso ou por um desejo de pôr a enfâse nos fatores sociais, Kuhn passou ao lado da chave para a compreensão da mutação científica.

A mutação científica é, normalmente, gradual. Mas sucedem, por vezes, algumas mutações repentinas. Comparo essas mudanças graduais e repentinas aos tipos de mudanças a que assistimos na história evolucionária. As mudanças graduais correspondem à passagem dos genes, de geração em geração, sem grandes alterações. As descontinuidades súbitas correspondem a uma extinção ou a uma redistribuição genética das cartas, muitas vezes como resposta a uma grande alteração ambiental.

Os registos fósseis, por exemplo, revelam muitas vezes uma estabilidade notável de certos organismos ao longo de grandes períodos de tempo, ao contrário do que seria de esperar da simples aplicação da seleção natural — uma mutação contínua e gradual. Os longos períodos de estabilidade, no entanto, são intercalados por alguns períodos curtos (do ponto de vista evolucionário) de mudanças radicais. Esta tese do "equilíbrio pontuado", proposta pelos biólogos evolucionistas Stephen Jay Gould e Niles Eldridge, também se poderá aplicar às mudanças nas ciências, caso insistamos na metáfora evolucionista. Na verdade, como Kuhn salientou no livro *The Structure of Scientific Revolutions*, uma ciência caracteriza-se por longos períodos "normais", seguidos de períodos "revolucionários". Os biólogos não estão de acordo quanto às causas exatas das mutações

rápidas (não dos períodos relativamente estáveis) que surgem nos registos fósseis, mas, no caso da ciência, podemos ver, em retrospetiva, qual a causa do período de mutação rápida. É, invariavelmente, consequência da aplicação de um instrumento ou de uma técnica metodológica não disponíveis anteriormente. Como exemplos, temos a utilização do telescópio por Galileu, que lhe abriu a visão dos céus, ou a invenção do microscópio por Anton van Leeuwenhoek, que lhe permitiu observar as bactérias. A colocação de tais instrumentos à disposição de uma mente capacitada altera radicalmente o "ambiente", e a perspetiva científica reflete essa mudança.

A noção de que a ciência se comporta de modo semelhante à evolução já não é nova. Já mencionei o trabalho de Duhem que minimiza a noção de "revoluções" científicas. Há também a "epistemologia evolucionária" do filósofo Charles Pierce, que vê a verdade científica como estando sujeita a um processo evolucionário. Karl Popper foi outro a quem não passou despercebido o significado da analogia entre o método hipotético-dedutivo e a seleção natural. Dedicou parte da sua Conferência de Herbert Spencer, em 1973, a uma comparação entre adaptação genética, comportamento adaptativo e descoberta científica, concluindo que, apesar das diferenças entre estes três sistemas, "o mecanismo de adaptação é, no essencial, o mesmo". De acordo com Popper, em cada um destes três sistemas, a instrução de mudança vem do interior. Quanto à seleção, ela vem, em parte, do exterior e estabelece-se pelo "método de tentativas e eliminação de erros" — uma malha de realimentação negativa. Popper comentou: "Sugeri que o progresso da ciência, ou da descoberta científica, dependia da *instrução* e da *seleção:* de um elemento conservativo, tradicional ou histórico, e de um uso revolucionário de tentativas e de eliminação de erros pela crítica, que incluía exames e testes empíricos estritos; por outras palavras, tentativas de sondar as possíveis fraquezas das teorias e tentativas de as refutar."

Popper mencionou também uma analogia entre as teorias do progresso científico e as teorias da formação de anticorpos propostas por Niels Jerne e Sir Macfarlane Burnet (1955). A ideia básica de Jerne era que a capacidade do corpo de reconhecer um antigénio invasor fazia parte da estrutura genética inata do

organismo, embora talvez estivesse sujeita a variações aleatórias do sistema de reconhecimento. Os anticorpos são cópias invertidas aproximadas dos antigénios invasores e são, por isso, capazes de os contra-atacar e destruir. Tal como a evolução, a resposta imunológica é também um sistema seletivo no qual o sistema é instruído a partir de dentro — a instrução genética mais a variação aleatória —, mas a seleção já depende do ambiente exterior — os antigénios invasores específicos. Considero esta analogia muito apropriada.

Por que sobrevivem as teorias científicas (a mecânica de Newton, a teoria da evolução de Darwin)? Por que não sobrevivem algumas delas (a teoria do flogisto, a biologia lamarckiana)? Para responder a estas questões, é interessante notar a existência de modas científicas — ideias que surgem e desaparecem — que não conseguem sobreviver. Não há cientista, com uma duração de carreiras de algumas décadas, que não tenha assistido à ascensão e queda de uma moda científica; de facto, é bem possível que tenha participado numa. As modas intelectuais distinguem-se pelo facto de se basearem ou em provas inexistentes ou em provas incompletas e com falhas; só em retrospetiva se dá conta disso, quando os seus proponentes estão já a lutar com as tropas da retaguarda. Não é possível evitar participar nelas, uma vez que, em geral, principiam de forma honesta. Que interessa o facto de as provas estarem incompletas? Ninguém aguarda até que os dados estejam inteiramente recolhidos; por essa altura, já alguém mais audacioso desenvolveu uma teoria ou elaborou outras experiências. Mas o facto de existir uma "indústria de modas" honesta na investigação científica é crucial para o processo seletivo.

Tais tentativas e erros, buscas e variações aleatórias são necessários ao funcionamento de um sistema seletivo, tanto faz que se trate da ciência como da evolução. Este método não só se aplica ao trabalho de um investigador individual, como também pode caracterizar a investigação de toda uma profissão — uma "indústria de modas". E ainda bem que assim é. A ciência raramente progride com um objetivo direto em mente. Tal como o sistema evolucionário, ela encaminha-se cegamente para algum ponto. Há uma certa aleatoriedade na sua progressão, aleatoriedade que é severamente restringida pela experiência

adquirida. Mas, quando uma ideia funciona, o indivíduo e a profissão seguram-na com unhas e dentes — termina a busca aleatória e a investigação torna-se mais dirigida para objetivos concretos. No fim, as ideias que funcionam são selecionadas, não tanto pelos seres humanos, mas mais pelo demiurgo — a ordem da natureza em si mesma. E aí repousa a peculiaridade única da ciência: a sua verdade não é exclusivamente regulada por nós.

Há uma história chamada "Francis Crick vai para o Céu", que ouvi pela primeira vez ao biólogo molecular Sydney Brenner. Ilustra uma característica da seleção natural, a de ser um método sujo e pesado mas que resulta — de certo modo, é assim que eu gosto de pensar que o método científico funciona. É uma história acerca da sabedoria pragmática da natureza (como se a natureza pudesse ter uma tal sabedoria).

Crick, um dos descobridores da estrutura molecular do ADN, morre e vai para o Céu. Encontra S. Pedro, que lhe pergunta se tem algum pedido especial a fazer. "Sim", responde-lhe Crick, "quero conhecer o próprio Homem e pôr-lhe algumas questões." S. Pedro diz-lhe que esse é um pedido um pouco invulgar, mas que se poderá arranjar, e pede a Crick que o siga. Depois de passarem por campos elísios, com as suas fontes de água fresca e lagos em torno dos quais brincam pessoas atraentes, com todos os seus desejos satisfeitos, Crick e S. Pedro chegam às montanhas e penetram num vale escuro. O caminho está atravancado com sucata, máquinas partidas, componentes eletrónicos, vidros e tubos de ensaio partidos, lixo orgânico, computadores velhos — um verdadeiro ferro-velho. No fim do vale encontram uma choupana. Entram nela e depara-se-lhes um homem de idade, com a bata manchada de óleo, sangue e reagentes químicos. Está inclinado sobre uma mesa, coberta com mais porcarias, trabalhando com afinco. "Francis, apresento-te Deus; Deus, apresento-te o Francis", diz S. Pedro. "Muito prazer", cumprimenta Crick, "mas gostava de saber como é que criou o sistema molecular da asa da mosca. É realmente engenhoso. "Bem", responde-lhe Deus, "já o criei há muito tempo e, de facto, é bastante simples. Deixe ver se me lembro. Pega-se assim num bocadito de tecido, depois . . . bem, vira-se... e depois... de uma forma ou de outra... depois dobra-se ... colam-se estas cadeias proteicas... e... Bem, já não me lembro muito bem de todos os

pormenores. Mas também que é que isso interessa agora? Funciona, não funciona?"

A moral da história é que a evolução não é sistemática ou exata. Não precisa de estar à altura das expetativas intelectuais de perfeição de uma pessoa. Não é um "método rigoroso". Serve qualquer truque manhoso, desde que funcione. O mesmo se passa com a conduta do inquérito e com o progresso da ciência — que interessa saber todos os pormenores? Se uma ideia estiver correta, sobrevive. A sobrevivência, como é evidente, não se identifica com a verdade. Mas o poder ser verdade já é suficiente. A sobrevivência também não é critério para uma boa ideia científica (as ciências ocultas "sobrevivem"). Mas são a sobrevivência e a capacidade de mudança e evolução — a vulnerabilidade — que distinguem uma teoria científica.

Já expliquei que a alteração das ideias científicas é um processo de seleção, e salientei que, em última análise, a seleção não é efetuada por nós. Como dizia Werner Heisenberg, um dos fundadores da teoria quântica: "Também aprendi algo talvez não menos importante, nomeadamente que em ciência se pode sempre chegar a uma decisão a respeito do que está certo e do que está errado. Não é uma questão de crença ou de *Weltanschaung (visão de mundo)* ou de hipótese, mas uma dada afirmação pode estar simplesmente correta e uma outra simplesmente errada. Nem a origem nem a raça decidem estas questões: são decididas pela natureza, por Deus, se se preferir, em qualquer dos casos nunca pelo homem."

O meu ponto de vista de que a evolução das ciências, tal como a evolução da vida, é autónoma e, em grande medida, independente da vontade e dos objetos humanos — um desenvolvimento "orgânico"" — não é muito popular hoje em dia. Alguns pensadores filosóficos e sociais salientam que os cientistas promovem certos valores e interesses (é verdade!), que a ciência está sujeita a pressões sociais e políticas (e está mesmo!) e que a cultura lhe serve de suporte estabelece a visão global que torna o inquérito científico possível (não há dúvida que estabelece!). Outros, apoiando esta posição, concordariam e argumentariam que as ciências naturais são "um mundo" que, repousa ao lado dos outros mundos — música, arte, literatura, direito — e que a

sua pretensão de ter acesso a uma realidade primitiva não passa de uma construção mental na cabeça dos cientistas. Já quando se afirma que as ciências naturais *não são mais do que* um empreendimento social, como qualquer outro, e que promovem e articulam uma visão sem qualquer pretensão especial de verdade, aí eu paro e digo que não. Embora a nossa visão da realidade natural possa ser uma construção, é uma construção diferente de todas as outras, pois não foi determinada exclusivamente por nós.

Para ilustrar este contraste que existe entre mundos puramente construídos e as ciências naturais, vou contar uma história. Durante uma prova oral na Universidade de Harvard, um professor perguntou a um aluno de história, num curso de pós-graduação, que é que ele pensava que faziam os historiadores — uma boa questão, fundamental até. O aluno respondeu que a atividade dos historiadores que investigavam o passado era comparável à de uma pessoa que entra numa casa às escuras e que acende as luzes, para observar os quartos e a mobília. "Ah", interveio o professor, "mas quem é que construiu a casa!" O professor estava a recordar ao aluno que a história era uma construção. Ao contrário da história, no entanto, o mundo natural não foi construído por nós, embora não restem dúvidas de que as suas representações, os mapas da realidade, são, esses sim, obra nossa.

A conduta do inquérito científico é extraordinariamente complexa, não tão complexa como a evolução de inúmeros organismos ao longo dos séculos, mas, ainda assim, muito complexa. Contudo, estamos a começar a aprender a manejar esse tipo de complexidade e poderão ser possíveis progressos verdadeiros na compreensão dos pormenores de como a ciência cresce. Não acredito que, de futuro, a tarefa de compreender o desenvolvimento da ciência seja deixada nas mãos dos filósofos e dos historiadores de ciência convencionais. Julgo que se transformará num empreendimento por direito próprio. A razão por que assim penso é que a instrumentação para o estudo dos métodos e do progresso da ciência se está a alterar.

Alguns cientistas, por exemplo, estão agora a promover um projeto de grande impacto — introduzir o corpo completo do conhecimento científico dos últimos trezentos anos num sistema

de computador. É um projeto gigantesco, e o orçamento envolvido reflete isso mesmo. Mas, caso seja posto em prática, dará origem a novas abordagens, tirando partido do acesso rápido a quantidades maciças de informação científica, que podem ser, e serão mesmo, usadas na compreensão da estrutura histórica da ciência, vista como um sistema seletivo. Esta abordagem não trará resposta a todas as nossas questões, mas será, sem dúvida, meio caminho andado. As pessoas que estudam o crescimento de novos campos da ciência, como se faz no Instituto de Informação Científica de Filadélfia, podem já efetuar uma análise de recorrência de citações envolvendo palavras chaves que identificam um tópico emergente. Podem depois visualizar a frequência crescente das ocorrências e ver como é que áreas de investigações emergentes se influenciam entre si. Tais estudos não sondam as questões mais profundas da mutação científica, mas, com mais informação e com computadores mais sofisticados, isso pode vir a ser possível um dia. Compreender o desenvolvimento da ciência é um problema de interpretação da complexidade em sistemas seletivos. O instrumento que manipula essa complexidade é o computador, e com uma base de dados de dimensão adequada poderemos observar, pela primeira vez, os padrões de crescimento da ciência. E o sucesso deste empreendimento futuro poderá ser avaliado pelo pouco interesse que os filósofos tiverem por ele, deslocando-se para outros problemas menos tratáveis.

A imagem que eu escolheria para o enquadramento intelectual da ciência moderna consiste na unidade de maior beleza e complexidade que eu conheço — o corpo humano. Ante a realização que é o corpo humano (se é que pode ser visto como uma realização), toda a filosofia e toda a epistemologia, toda a interpretação e todo o criticismo, se reduzem à insignificância. O nosso organismo e a sua versatilidade, plasticidade, durabilidade e poder de sobrevivência são o produto de dois biliões de anos de um processo evolucionário que ainda não dominamos. Mas, independentemente de o compreendermos ou não, somos testemunhas de um corpo humano magnífico, único, definido e vulnerável à mudança. E funciona, com todo o tipo de "truques manhosos". Se em alguns dos nossos objetivos intelectuais, como a ciência, pudéssemos ao menos imitar os processos evolutivos que conduziram à criação do corpo humano, ainda que não

compreendêssemos em pormenor esses processos complexos, a sobrevivência e a flexibilidade do nosso conhecimento estariam asseguradas.

Então, tal como o corpo, a ciência nunca poderia mentir.

[1] Investigador Cético. (*N. do T.*)

[2] No original, em inglês: *Introduction to Logic*, que se poderá traduzir em português por: *Introdução à Lógica*. (*N. do R.*)

CAPÍTULO 12

– GUERREIROS DO INFINITO –

Ninguém nos expulsará do paraíso que Cantor criou para nós.

DAVID HILBERT, 1926

Sempre adorei quebra-cabeças matemáticos. Durante a minha adolescência, nos anos cinquenta, debati-me com a resolução do problema do mapa de quatro cores — como colorir um mapa-múndi, representando os diversos países, de modo a *ter* de usar mais de quatro cores para distinguir as fronteiras entre dois países ou, alternativamente, mostrar que o número máximo de cores necessárias para colorir qualquer mapa é quatro. Este problema não tinha ainda sido resolvido, embora pudesse ser colocado e compreendido de uma forma simples. Passei muitos fins-de-semana seguidos a tentar encontrar um mapa que necessitasse de cinco cores. Os mapas tinham de ser bastante elaborados, pois os matemáticos sabiam já que qualquer mapa com um número de regiões igual ou inferior a quarenta só precisava de quatro cores. Em dada altura dos meus esforços, compreendi que se dobrasse a folha de papel de modo a que formasse um cilindro e depois juntasse os extremos, dando-lhe a forma de um toro (forma geométrica semelhante a um "*donut*"), conseguia encontrar mapas que necessitavam de, pelos menos, cinco cores. Fiquei satisfeito com este resultado. Mais tarde, contudo, soube que os matemáticos já tinham provado que, no caso do toro, era necessário um máximo de sete cores (em vez das quatro). A topologia da superfície era importante.

Não consegui nunca descobrir um mapa plano que necessitasse de cinco cores, pois isso é, de facto, impossível. A prova matemática deste resultado foi estabelecida vinte anos mais tarde, em 1976, e foi exposta por Wolfgang Haken e Kenneth Appel. Estes matemáticos afirmaram que, caso existisse um mapa que necessitasse de cinco cores, então teria de existir o mapa mais pequeno desse tipo — o mapa de cinco cores "mínimo". A sua estratégia foi, então, mostrar que, caso esse mapa mínimo existisse, poderia ser ainda mais reduzido e não era, portanto,

verdadeiramente mínimo. Então a única possibilidade lógica que restava era um tal mapa de cinco cores não existir mesmo, provando desta forma o teorema das quatro cores. Conseguiram demonstrar este teorema através da utilização de um computador que verificou a redutibilidade — o problema era mesmo complicado. Um adolescente não tinha qualquer hipótese.

Lembro-me, quando me debatia com este e com outros quebra-cabeças matemáticos, da minha confrontação com a necessidade lógica. Se concordasse em jogar um "desafio matemático" como o problema do mapa de quatro cores, de acordo com certas regras lógicas, então algumas coisas tornavam-se simplesmente impossíveis. Não eram só impossíveis na altura, mas sempre; e esta impossibilidade não era apenas uma questão de opinião ou uma característica da psicologia humana, mas era inerente às próprias regras.

Este duro sentido de responsabilidade pode-se assemelhar a uma prisão. Contudo, tal como muitas disciplinas em que há regras, as regras lógicas de matemática abrem as portas a um vasto e complexo domínio da existência suficientemente rico para desafiar os recursos mais profundos da imaginação humana.

Que vem a ser a matemática? Praticamente desde a altura em que a humanidade aprendeu a contar que as pessoas se interrogam sobre a natureza dos objetos matemáticos como os números ou os pontos, as linhas e os triângulos, dando início a uma discussão que se prolonga até aos dias de hoje. Esta discussão ainda não terminou, embora o nosso conhecimento se tenha aprofundado. Persistem questões fundamentais. Em que sentido existem os objetos matemáticos? Será que eles existem de todo? Se não existem, então a que é que se referem os teoremas matemáticos; de que é que se está a falar?

Alguns filósofos modernos da matemática pensam que os teoremas matemáticos não dependem da existência de nenhum tipo de objetos matemáticos, são simplesmente proposições lógicas, prescrições formais sem qualquer conteúdo necessário. Os teoremas da geometria de Euclides, por exemplo, podem ser vistos como proposições puramente lógicas, cuja validade não depende da nossa visualização de linhas e triângulos. Ernest

Nagel, filósofo da Universidade de Columbia, apoiou esta visão quando observou: "A interpretação de princípios lógicos [como, por exemplo, os teoremas matemáticos] como invariantes ontológicos [como, por exemplo, pontos, linhas, figuras geométricas] parece... ser uma ornamentação estranha." Bertrand Russell, um lógico (pelo menos no início da sua carreira) e Jules Henri Poincaré, um matemático, apesar das respetivas diferenças filosóficas, concordavam neste ponto — os axiomas matemáticos são simplesmente definições lógicas e não necessitam de nenhumas entidades que satisfaçam os axiomas. As verdades matemáticas são simplesmente as verdades da lógica — são verdadeiras por definição.

Outros, seguindo uma tradição que se estende desde Platão até Kurt Godel, um lógico do século XX, pensam que os axiomas matemáticos são mais do que meras definições e os objetos matemáticos mais do que uma "ornamentação estranha", mas que, em vez disso, a coerência de um sistema apela a uma intuição mais profunda sobre uma ordem da realidade — uma ordem transcendente à ordem da lógica matemática formal. Acham que as verdades matemáticas são algo mais — verdades a respeito de entidades. A forma não é suficiente; o conteúdo interessa. A não ser assim, argumentariam, como poderiam então ter lugar as intuições matemáticas na mente humana? Donde é que elas vêm? Argumentariam que seria necessário existir uma ordem do ser, transcendente à nossa experiência, que torna essa experiência inteligível e donde surgem as nossas intuições. Mas existem ainda outras perspetivas na matemática, uma das quais é o empirismo, uma filosofia frequentemente associada a David Hume, um pensador inglês do século XVIII.

Não há dúvida de que a matemática e a lógica são um produto da mente e cultura humanas. Contudo, os seus produtos são universais e objetivos e estendem-se para lá da mente ou da cultura particulares que estiveram na sua origem. Faz parte da natureza da lógica — da sua necessidade — a inerência à nossa própria maneira de pensar e à estrutura do mundo que nos rodeia. Não é possível libertarmo-nos dela. Mesmo quando os matemáticos e os lógicos inventam novos sistemas lógicos e matemáticos que não têm, à primeira vista, nada a ver com o mundo natural ou a forma como pensamos logicamente, a sua

exigência — de que o sistema seja consistente, verdadeiro e interessante — apela à experiência do mundo natural comum do ser e do pensar. Por vezes, a ligação entre o mundo natural comum e a matemática parece tão próxima que alguns filósofos matemáticos — os empiristas — pretendem estabelecer a consistência da matemática na coerência evidente, ainda que misteriosa, da ordem natural. Apesar da dificuldade em manter uma tal perspetiva empirista da matemática (ao fim e ao cabo, a ciência empírica apela à lógica matemática para a coerência das suas teorias, e não o contrário), alguns filósofos concordariam com o comentário do filósofo Lazlo Kalomar: "Por que não confessamos que, em última análise, a matemática, como as outras ciências, se baseia e tem de ser verificada na prática?" A verdade matemática torna-se então dependente da nossa experiência da ordem natural, em contraste acentuado com a visão transcendental de Platão e de Gödel ou com a visão lógico-formal de Russell. Os contrastes entre estas visões da matemática — a visão lógico-formal, a visão transcendental, a visão empirista, bem como outras — serão examinados neste capítulo. Curiosamente, muitos dos tópicos e contrastes dos nossos capítulos anteriores acerca da natureza da ciência e do problema do corpo-mente ressurgem aqui, especialmente o contraste entre a visão transcendental, que vê a mente como autónoma, e a visão naturalista, que vê a mente como parte da natureza, estando sujeita às suas leis. Irei argumentar, como já fiz nos capítulos anteriores, que o enquadramento categórico do nosso pensamento sobre estes problemas e a filosofia da matemática em particular vão ser alterados e moldados pelas ciências da complexidade emergentes. Na verdade, a própria matemática não só fornece a linguagem das ciências da complexidade, como está sujeita a essas ciências, logo nos seus fundamentos lógicos. Se os cientistas conseguirem, no futuro, desvendar o "problema da cognição" — como representar o significado e o conteúdo num sistema formal fisicamente realizável —, creio que descobriremos ter estado a colocar as questões erradas, realizando falsas distinções ao discutir a filosofia da matemática. A fim de conseguir uma melhor compreensão conceptual destes temas, vou fazer um esboço da história da matemática, com especial saliência para os problemas filosóficos. Essa história fará incidir alguma luz sobre a presente controvérsia e preparará o cenário para a nossa discussão.

Desde tempos remotos que os povos antigos, apercebendo-se das regularidades da natureza, começaram a pensar nelas de uma forma diferente, mais abstrata. Os mercadores e os comerciantes, trocando mercadorias, conceberam sistemas de contabilidade numérica e uma aritmética elementar. Embora regularidades como a simples contagem de objetos, as delimitações entre campos agrícolas e o som de uma corda a vibrar façam parte do mundo do comércio e da natureza, podemos abstrair e universalizar estas regularidades de modo a que se tornem parte do domínio do pensamento puro. Se se somarem três ovelhas a oito ovelhas, fica-se com onze ovelhas, e somando três cabras a oito cabras fica-se, do mesmo modo, com onze cabras. A partir deste exemplo vemos que a noção abstrata do número surge quando reconhecemos que o resultado de adição pode ser obtido sem qualquer referência a ovelhas e cabras, mas simplesmente à noção abstrata de um número.

Foram os gregos antigos quem primeiro apreendeu conscientemente o conceito de uma ciência abstrata do universo ordenado, abstração essa que parecia fazer apelo a uma realidade transcendente de objetos universais. Aperfeiçoaram o pensamento matemático nas áreas dos números inteiros e da geometria e os métodos de dedução lógica que colocaram a tradição matemática ocidental na sua longa caminhada para os dias de hoje. Embora os Gregos tenham partido de conhecimentos anteriores dos Babilónios e dos Egípcios, o seu feito é tanto mais espantoso quanto conseguiu romper com essas influências poderosas. Alguns filósofos gregos salientaram que a matemática está na base da realidade. No seu diálogo *Timeu*, Platão descreve uma visão do cosmo como estando organizado com base em princípios geométricos — uma visão que, com certa notoriedade, está a ser concretizada na moderna física de campos. Curiosamente, Aristóteles rejeitou esta enfâse nas matemáticas e salientou o papel da lógica na base do nosso pensamento sobre a realidade. Esta dialética entre a lógica e a matemática prolonga-se até aos nossos dias. Pode-se dizer, só com um leve toque de exagero, que os Gregos descobriram a mente ocidental.

Um dos feitos mais altos da mente grega foi a aplicação da lógica aos princípios da geometria plana, um feito que tomou forma nos dez axiomas de Euclides. Os axiomas são as

proposições fundamentais, as definições, que estão na origem de qualquer sistema matemático. Um dos axiomas de Euclides, por exemplo, diz que só pode ser desenhada uma linha reta entre quaisquer dois pontos no espaço. Por muito verdadeira que esta proposição pareça, tem de ser claramente apresentada sob a forma de um axioma. Usando este axioma e os outros, pode-se prosseguir com a definição de objetos geométricos tais como triângulos e quadrados e, de modo significativo, deduzir logicamente teoremas — afirmações acerca destes teoremas que não parecem tão óbvias como, por exemplo, que a soma dos ângulos internos de qualquer triângulo plano é exatamente 180 graus. Curiosamente, os Gregos ponderaram primeiro os objetos da geometria e depois compreenderam que as suas propriedades podiam ser deduzidas a partir de um conjunto de axiomas. Hoje em dia, invertemos essa situação — consideramos os axiomas como fundamentais, e não os objetos; de facto, muitos matemáticos não querem saber se existem quaisquer objetos que satisfaçam um dado conjunto de axiomas.

De certa maneira, foi a poderosa imaginação espacial dos Gregos que tanto os conduziu ao maravilhoso domínio dos objetos geométricos como limitou a sua imaginação e intuição ao que podia ser visualizado. O facto de a geometria euclidiana ser apenas um caso especial da geometria só pôde ser compreendido alguns milénios mais tarde, quando a independência lógica do famoso "postulado das paralelas" foi compreendida, uma descoberta que deu origem às geometrias não euclidianas. Neste caso, a intuição espacial desencaminhou os Gregos. (Uma pessoa pergunta-se a si própria o que é que hoje nos desencaminha).

Na matemática grega surgiam os reflexos de uma ordem transcendental e universal de conceitos, exterior ao universo físico. Surgiam os próprios pensamentos da mente de Deus, tanto quanto os nossos intelectos individuais poderiam esperar abarcá-los. Pois as verdades da matemática não são apenas verdades para o leitor ou para mim, mas para qualquer mente capaz de abarcar a necessidade lógica. Neste sentido, então, as verdades da matemática são transcendentes ao mundo — tem-se uma ordem de necessidade que não está sujeita à evidência dos sentidos ou à especificidade do mundo. E o que se passa no domínio dos conceitos passa-se também com a própria mente: é

do mundo natural, mas não está no mundo natural. Este conhecimento — de que existe uma ordem transcendente da realidade, como a verdade matemática claramente exemplifica (e alguns acrescentariam que a verdade moral também) — é tão poderoso que tem dominado o pensamento ocidental e tem sido adotado pelas nossas religiões, mesmo até aos nossos dias. Mas será mesmo assim? Não será a noção de um domínio de conceitos transcendentais uma alucinação intelectual para serviço de proveitos próprios? Talvez nos devêssemos perguntar não só o que é a matemática, mas *onde* está a matemática. Em que sentido existe o espaço lógico de conceitos? Em que sítio se encontra o triângulo euclidiano — essa ideia perfeita? Mais uma vez, retornamos às questões colocadas anteriormente na nossa discussão das ciências cognitivas — o problema da representação do conhecimento na mente.

Durante a Idade Média algumas ordens religiosas forneceram grandes contributos para a lógica, segundo o percurso traçado por Aristóteles. A matemática, uma peça fundamental da perspetiva de Platão, era relegada para segundo plano dentro da lógica aristotélica, na qual a lógica se transformou na chave da realidade. Alguns estudiosos mantêm que foi a reemergência do platonismo e da sua ênfase na geometria durante o Renascimento que abriu o caminho para a revolução científica e para a descrição matemática (em detrimento da lógica) da natureza.

Foi apenas com a fundação da física e da astronomia modernas, por Copérnico, Kepler, Galileu e Newton, que começaram os grandes desenvolvimentos matemáticos. O trabalho analítico de Descartes e Vieta, no século XVII, juntou, pela primeira vez, a álgebra à geometria, substituindo assim os argumentos dedutivos dos Gregos por manipulações simbólicas de quantidades algébricas — uma técnica inventada pelos Árabes. Através da introdução, por Descartes, de um sistema de coordenadas, um referencial no espaço, os objetos geométricos passavam agora a poder ser estudados algebricamente — uma simplificação enorme que deu à mente uma "mãozinha" analítica e simbólica na geometria. Foi um tal engenho analítico que permitiu que se abrisse uma janela sobre objetos de dimensões superiores. A mente matemática podia agora manipular objetos matemáticos em espaços com mais de duas ou três dimensões.

Estes desenvolvimentos analíticos do século XVII promoveram também a noção matemática de função — uma variável y pode ser função de uma outra variável x, escrevendo-se $y = f(x)$. A função f especifica uma relação precisa e determinista entre as variáveis x e y — uma relação logicamente causal que podia tornar-se a forma básica de todas as leis físicas, como aliás veio a acontecer. Desta forma, os fenómenos naturais podiam ser expressos na linguagem das equações matemáticas, em vez de simples palavras. Trata-se de um avanço enorme na compreensão e na quantificação.

Uma outra maior invenção matemática no século XVII foi a criação do cálculo integral e diferencial por Newton e Leibniz, uma ferramenta que foi utilizada para pôr de pé o monumento da mecânica clássica de Newton. Para os Gregos, o tratamento do infinitamente pequeno e dos processos infinitos sempre foi um grande obstáculo. Agora, com a chegada do cálculo e da álgebra moderna, esse obstáculo desaparecia. O caminho estava aberto para uma descrição matemática da natureza.

A linguagem da física clássica assenta nas equações diferenciais, que são um desenvolvimento do cálculo. Tornou-se então claro que, das duas formas de expressão humana — a linguagem e a matemática —, a matemática se tornaria o meio pelo qual os seres humanos iriam descrever a natureza. A descrição linguística, mais antiga, dos Gregos e dos filósofos da natureza medievais parecia agora inadequada e pouco prática, uma vez surgidas as ferramentas matemáticas apropriadas. Mas com a matemática seguramente identificada como a linguagem própria da física e da astronomia surgiu a questão da relação simbiótica entre as ciências naturais e a matemática — por que pode a natureza ser descrita matematicamente? Kant comentou uma vez: "Cada doutrina particular da natureza inclui tanta ciência aceitável quanta a matemática que nela esteja envolvida.", estabelecendo assim a ligação entre a ciência empírica e a matemática.

Que essa ligação existe é incontestável. As ciências naturais fazem muitas vezes uso de matemática previamente desenvolvida. Por exemplo, o desenvolvimento da geometria não euclidiana, no século XIX, que culminou com o trabalho de

Bernard Riemann sobre a curvatura do espaço, foi usado, algumas décadas mais tarde, como bloco conceptual por Einstein para desenvolver a sua teoria geral da relatividade. As noções de espaço vetorial de dimensão infinita e de operadores num espaço de Hilbert, desenvolvidas no início do século XX, serviram de suporte matemático à teoria quântica desenvolvida no fim da década de 20.

Embora o fluxo de ideias da matemática para as ciências naturais tenha sido imenso, nunca teve um so sentido. Os físicos muitas vezes descobrem novos aspetos da matemática nas suas tentativas de resolução das equações que descrevem os processos físicos. Newton, por exemplo, inventou o cálculo a fim de resolver problemas físicos. Além disso, são descobertas novas classes de soluções matemáticas na tentativa de resolução de problemas de física. A conceção de que o espectro — o conjunto de valores possíveis — de alguns operadores matemáticos tanto podia ser discreto (só tomar certos valores) como contínuo (tomar todos os valores) partiu de alguns físico-matemáticos que procuravam o espectro de emissão luminoso do átomo de hidrogénio. O advento recente do computador — que não só resolve problemas como *é*, ele mesmo, um problema de complexidade — deu origem a um rol de novos desenvolvimentos matemáticos.

Em princípio, a matemática poderia ter-se desenvolvido completamente separada das ciências naturais. Na realidade, não o fez. Contudo, muitos matemáticos eminentes não só consideram a estrutura lógica da sua disciplina completamente independente do mundo natural, como se pavoneiam do carácter abstrato e transcendental da matemática. Esses matemáticos sentem repulsa ao ouvirem falar de matemáticas aplicadas. Jean Dieudonné, um ex-membro do grupo Bourbaki em França, sentiu um certo prazer ao comentar, na sua obra de 1977, que a geometria algébrica, o seu assunto favorito, não tinha qualquer relação com a física da altura. Na edição de 1982, no entanto, esses comentários haviam sido retirados, em consequência da aplicação frutuosa da geometria algébrica às teorias da invariância de padrão para as partículas quânticas. A teoria de números, durante muito tempo um domínio isolado da matemática pura, atingiu grande proeminência em consequência da teoria da codificação e da ciência dos computadores.

O que me intriga é a razão pela qual o desenvolvimento das ciências naturais e o da matemática estão tão correlacionados. A que se deve o aprofundamento quase coincidente de ambos os domínios, um empírico e outro do pensamento puro? Por que razão as ferramentas matemáticas da geometria de Riemann e do espaço de Hilbert estavam ali, prontas a ser usadas pelos físicos que desenvolviam ideias acerca do mundo natural que não poderiam ter sido previstas pelos matemáticos? Embora não possa dar nenhuma resposta satisfatória a estas questões, posso propor algumas conjeturas.

A matemática tem um desenvolvimento que se caracteriza por uma generalidade muito grande; os matemáticos *lutam* por essa generalidade e tentam provar os seus resultados por exaustão lógica de todas as possibilidades dentro de uma classe de problemas altamente específica. Além disso, existe a ambição geral de matematizar todas as estruturas lógicas existentes para depois as estudar até ao limite da capacidade humana. Em resumo, os matemáticos criaram *muitas* matemáticas, e em todas as coisas para as quais puderam desenvolver uma descrição matemática fizeram-no até aos limites da sua imaginação, tempo de vida, origem histórica e recursos. Talvez não devamos ficar tão surpreendidos pelo facto de as ferramentas matemáticas de que necessitamos para estudar algum novo desenvolvimento das ciências empíricas já estarem prontas, à espera de serem usadas.

Uma segunda razão para a simbiose entre a matemática e as ciências tem a ver com os limites da imaginação humana. Os matemáticos e os cientistas nasceram no mesmo mundo, dentro da mesma cultura intelectual. Cada século tem o seu estilo, a sua visão geral, sendo a conduta da vida intelectual moldada por esse estilo. As convenções sociais e culturais também desempenham o seu papel na definição dos problemas em que é aceitável trabalhar e do que é visto como bizarro e, por isso, menos aceitável. Os cientistas e os matemáticos vão muitas vezes buscar a sua inspiração à ordem natural e à ordem lógica que ela reflete. A nossa cultura limita a nossa imaginação, ao mesmo tempo que a alimenta, e isto acontece uniformemente para toda a vida intelectual. A correspondência entre a matemática e a ciência na Renascença, no Século das Luzes e nos séculos XIX e XX não nos deverá surpreender. Uma vez que a descrição da natureza e a sua

coerência é, como salientou Kant, tal como as matemáticas, um produto das nossas faculdades cognitivas, talvez a respetiva correlação seja até necessária.

Com o desenvolvimento contínuo das matemáticas, no século XIX, surgiu um novo problema fundamental. Alguns matemáticos, tentando somar várias séries infinitas de frações, descobriram que obtinham respostas indiferentes consoante a forma como manipulavam as somas. A resposta a esta situação de crise, que parecia querer fazer sugerir uma inconsistência nas matemáticas, foi o desenvolvimento de um método rigoroso de prova. Tornou-se importante — crucial até — examinar com rigor a natureza das operações matemáticas. Graças aos trabalhos de Cauchy, Dirichlet, Fourier, Gauss, Bolzano, Weiertrass e outros, a análise matemática foi colocada numa base muito mais rigorosa, tendo sido eliminadas as inconsistências aparentes. A noção de rigor tornou-se inerente à matemática.

Os matemáticos do século XIX estenderam largamente as iniciativas anteriores, no campo do cálculo e das equações diferenciais e algébricas, desbravando novos e imensos territórios. Os génios de Carl Friedrich Gauss e de Augustin-Louis Cauchy desenvolveram novos métodos analíticos que estenderam o cálculo a domínios nunca antes atingidos. Joseph Fourier descobriu a série matemática que ostenta hoje o seu nome. William Hamilton descobriu e esclareceu um novo tipo de números — os quaterniões. Pierre Simon de Laplace, partindo de trabalhos anteriores, elevou a teoria das probabilidades ao nível de disciplina matemática. Everiste Galois criou a teoria de grupos, que veio resolver muitos dos problemas clássicos associados a equações algébricas. Foram compreendidas e exploradas novas geometrias não euclidianas. Richard Dedekind e Leopold Kronecker aprofundaram grandemente a abordagem algébrica da geometria. Muitos outros desenvolvimentos (demasiados para poderem ser aqui mencionados) emergiram da imaginação fértil dos matemáticos europeus — obteve-se um corpo de conhecimentos eterno que, em breve, se transformou num legado de toda a humanidade e formou a linguagem de grande parte da ciência do século XX.

A matemática do século XIX caracterizou-se por um sentido de descoberta de novos objetos matemáticos — entidades que repousam "algures" no domínio da imaginação matemática. A noção de abstração que, pelo contrário, caracteriza as tendências da matemática no século XX, embora já tivesse tido início no século XIX, não tinha ainda vingado. A abstração partiu, em parte, de novos desenvolvimentos da lógica, uma disciplina que no século XIX era ainda vista como distinta da matemática. Estes desenvolvimentos da lógica no século XIX vieram a desempenhar um papel muito importante na filosofia da matemática. Vamos vê-los.

Augustus De Morgan publicou em 1847 o seu livro *Formal Logic*, que punha a lógica aristotélica numa forma quantitativa e dava início ao estudo das relações lógicas. Um maior marco da lógica do século XIX foi a publicação do livro *Law of Thought*, de George Boole, que surgiu em 1854. O objetivo de Boole, que aliás foi atingido, era substituir a lógica verbal corrente por um simbolismo e um formalismo algébricos, apressando a tendência para uma maior abstração. O trabalho de Boole teve, sem dúvida, alguma influência sobre o *Begriffschrift*, de Gottlob Frege, um livrinho de oitenta páginas, surgido em 1879, que foi possivelmente o mais importante trabalho isolado sobre lógica. Contrapondo-se à linha de pensamento de Boole, Frege escrevia: "A minha intenção não foi representar uma lógica abstrata por meio de fórmulas, mas sim expressar um conteúdo através de símbolos gráficos de uma forma mais clara e precisa do que é possível por meio de palavras. De facto, o que pretendi criar não foi um mero *Calculus ratiocinator*, mas sim uma *lingua characterica*, no sentido de Leibniz".

Frege iniciou a sua carreira esforçando-se por dar uma análise lógica e precisa da ideia de uma sucessão. Com o fim de o conseguir, inventou uma linguagem de fórmulas com o objetivo de construir a lógica como uma linguagem que não necessitasse de ser suplementada por qualquer raciocínio intuitivo. Escreveu ele, na introdução do seu grande trabalho: "O meu primeiro passo foi tentar reduzir o conceito de ordenação a uma sequência ao de consequência *lógica*, de forma a partir daí para o conceito de número. Para evitar que algo de intuitivo aqui entrasse despercebido, tive de dar tudo por tudo para manter a cadeia de

interferência livre de buracos. Ao tentar cumprir esta exigência tão estritamente quanto possível, descobri que a inadequação da linguagem era um obstáculo; por mais rígidas que fossem as expressões que eu estava pronto a aceitar, era cada vez menos capaz, à medida que as relações se tornavam mais complexas, de atingir a precisão que os meus objetivos exigiam. Desta deficiência surgiu-me a ideia para a presente ideografia." Frege inventou o cálculo proposicional da verdade, realizou a primeira análise de proposições usando os conceitos de função e argumentos, em lugar de sujeito e predicado, e concebeu a teoria de quantificação, na qual as derivações são efetuadas apenas usando a forma explícita das expressões.

Frege e Boole deram o tom para futuros desenvolvimentos da lógica — uma abordagem formal, quase mecânica, do raciocínio. Frege exigiu que, ao pensarmos em raciocínios matemáticos, usemos simbolismos explícitos, axiomas e regras explícitos e provas explícitas. Assim, uma demonstração matemática, vista como uma sequência de declarações lógicas, podia ser, ela mesma, vista como um objeto matemático passível de ser examinado (um ponto de partida para a "teoria das demonstrações" de David Hilbert). Alguns anos mais tarde, Frege interessou-se pela filosofia da matemática. Numa retrospetiva de um trabalho anterior do filósofo Edmund Husserl sobre as bases da aritmética, convenceu Husserl do seu erro de "psicologismo" — que o conhecimento matemático depende da psicologia humana e não de julgamentos certos e objetivos —, levando-o assim a adotar uma abordagem apodítica nos seus trabalhos posteriores.

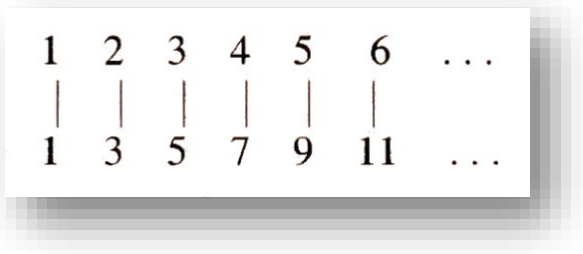
O trabalho de Frege preparou o cenário para a Era de ouro da lógica moderna do fim do século XIX, início do século XX. A sua grande força foi tornar as ideias lógicas explícitas. No entanto, exprimiu uma certa apreensão a respeito de um dos axiomas do seu sistema — o axioma V—, e na verdade este axioma problemático acabou por implicar uma inconsistência, conforme Bertrand Russell fez notar em 1901. O que aconteceu a seguir no movimento para uma maior abstração foi a criação da teoria dos conjuntos.

Os matemáticos do século XIX tornaram-se guerreiros do infinito — travavam batalhas conceptuais ao tratarem o

infinitamente grande e o infinitamente pequeno. Muitos dos métodos rigorosos foram inventados devido aos problemas levantados pela manipulação de tais quantidades. Contudo, ao longo deste desenvolvimento o infinito tinha um significado — o limite de uma sucessão como a sucessão dos inteiros 1, 2, 3... Foi o génio de Georg Cantor, nas últimas três décadas do século XIX, quem primeiro revelou a estrutura notável do infinito.

Como poderemos nós, alguma vez, falar de infinito? Ao fim e ao cabo, as nossas mentes, mesmo as melhores, são finitas. Ninguém pode contar até ao infinito. Contudo, os próprios povos primitivos, cujos sistemas de contagem não lhes permitiam ir além do dez (para eles, tudo o que seja superior a dez é efetivamente infinito), conseguem, apesar de tudo, comparar dois conjuntos, cada um com mais de dez elementos, e dizer qual dos dois é maior. Conseguem-no fazendo corresponder objetos entre os dois conjuntos e vendo em qual dos conjuntos sobram objetos — esse é o conjunto maior. Cantor, partindo do trabalho anterior de Bernhard Bolzano, fez, no essencial, a mesma coisa com conjuntos infinitos, como, por exemplo, o conjunto dos números inteiros. Depois de comparar diferentes conjuntos infinitos de objetos metálicos, descobriu que, em alguns deles "sobrava" alguma coisa — havia infinitos de vários "tamanhos". Como pôde ele chegar a uma conclusão tão notável?

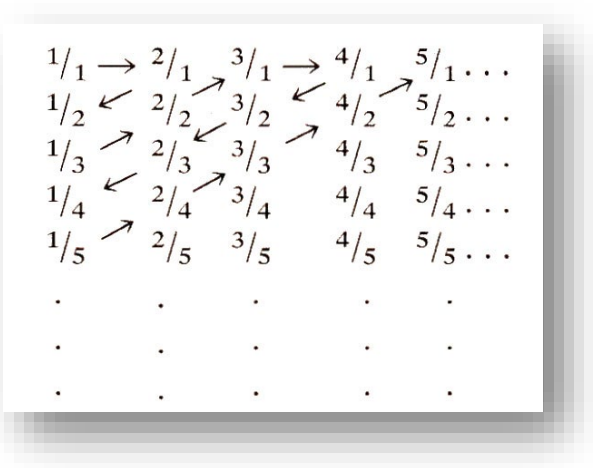
Primeiro, vamos supor que existe um conjunto infinito mais pequeno que qualquer outro — o conjunto de todos os inteiros 1, 2, 3, 4, 5..., onde "..." significa uma continuação indefinida. Este é um conjunto infinito. Poder-se-ia, de início, pensar que o conjunto de todos os números ímpares é menor do que este conjunto; ao fim e ao cabo, os números pares compreendem só metade dos números. Mas este género de raciocínio, embora se aplique a conjuntos finitos, já não é válido para os infinitos — uma parte pode ser igual ao todo. Este argumento tem a ver com o facto de se poder realizar uma correspondência um a um entre o conjunto dos números inteiros e o dos números ímpares, de acordo com



de modo que os dois conjuntos são comparáveis — o conjunto dos números ímpares tem a mesma ordem de infinito que o conjunto dos números inteiros. Da mesma maneira, é possível realizar uma correspondência biunívoca entre os quadrados dos números inteiros 1, 4, 9, 16, 25... e os números inteiros; estes podem ser contados. A esses conjuntos dá-se o nome de "enumeráveis". É possível escrever uma lista dos objetos desses conjuntos e fazê-los corresponder aos números inteiros.

De início, poder-se-ia pensar que a razão pela qual se pode efetuar uma correspondência biunívoca entre os números inteiros ou os quadrados perfeitos e os números ímpares é que existe uma "solução de continuidade" entre os membros sucessivos destes conjuntos infinitos. Será ainda possível contar objetos que estão densamente próximos uns dos outros? Por exemplo, o conjunto infinito dos números racionais é o conjunto de todas as frações, razões entre números inteiros como $^{1}/_{4}$, $^{7}/_{3}$ ou $^{126}/_{901}$. Se imaginarmos estas frações representadas pelas respetivas imagens sobre uma reta infinita, então dentro de qualquer segmento dessa reta existe uma infinidade desses números racionais. Estão densamente empacotados. Será possível contá-los?

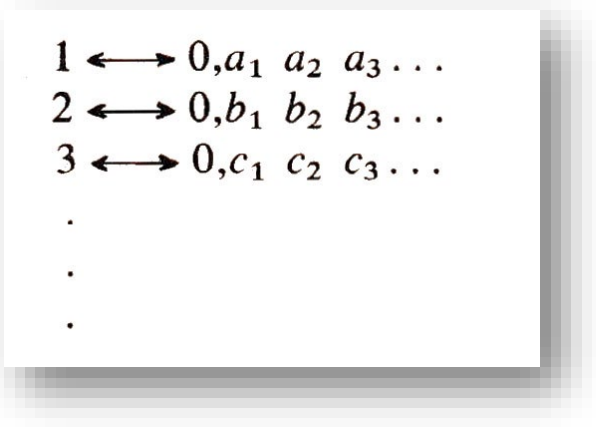
Cantor mostrou que isso era possível. Vamos imaginar a matriz infinita de todos os números racionais



em que os numeradores 1, 2, 3... representam as colunas e os denominadores 1, 2, 3... representam as linhas da matriz. É bastante claro que cada número racional aparece, pelo menos uma vez, nesta matriz; alguns números racionais como $1=^{1}/_{1}=^{2}/_{2}=^{3}/_{3}$... surgem mesmo uma infinidade de vezes. Seguindo a matriz ao longo do percurso indicado pelas setas, é possível começar a contar os números racionais — atribuir-lhes uma correspondência com os números inteiros. A cada número racional corresponde um número inteiro. Desta forma, o conjunto dos números racionais é enumerável.

Ao descobrir este resultado, Cantor exclamou: "Vejo, mas não acredito!" Mas existirão conjuntos não enumeráveis? Curiosamente, a resposta é afirmativa, como Cantor demonstrou.

Consideremos o conjunto dos números reais no intervalo entre 0 e 1. Este conjunto inclui números racionais, como $^{1}/_{4}$ e $^{37}/_{43}$, bem como números irracionais, como $^{1}/_{\sqrt{2}}$ ou $^{1}/_{\pi}$. Suponhamos que se partia do princípio de que é possível escrever uma lista de todos estes números como uma expressão decimal de modo que $^{1}/_{4}$ = 0,25 e $^{1}/_{\pi}$ = 0,3183... Em vez de escrevermos esses números explicitamente, vamos representar simbolicamente os números decimais, de modo que o primeiro número da nossa lista é $0,a_1a_2a_3$... e o segundo é $0,b_1b_2b_3$... em que os *a's* e os *b's* são algarismos definidos. Procedendo desta forma, poderíamos imaginar uma lista com *todos* os números entre 0 e 1 e traçar uma correspondência entre eles e os números inteiros.



Poder-se-ia pensar que desta forma se mostrou que era possível contar todos os números reais entre 0 e 1. Contudo, usando o "método da diagonal de Cantor", é possível construir um número que não esteja nesta lista infinita. Esse método consiste em examinar o primeiro algarismo do primeiro número da lista, o a_1, e em escolher um algarismo diferente, x_1. Este algarismo, x_1, será o primeiro algarismo do novo número. A seguir, vamos para o segundo algarismo do novo número da lista, b_2, e escolhemos um outro algarismo diferente, x_2, para segundo algarismo do novo número. Repetindo este procedimento para todos os números da lista, acabamos por chegar a um novo número $0,x_1x_2x_3...$ Este número não pode estar na nossa lista, pois, por construção, difere de todos os números da lista em pelo menos uma casa. Portanto, a suposição de que partimos, de que podemos listar todos os números reais entre 0 e 1, tem necessariamente de ser falsa — o contínuo dos números reais não pode ser contado! Trata-se de um exemplo de um conjunto não enumerável. Como os povos primitivos que não conseguiam contar para além de dez, descobrimos que o conjunto infinito de todos os números possíveis — o contínuo — não é igual ao conjunto dos números inteiros. O infinito de todos os números, o contínuo, é "maior" do que o infinito só dos inteiros.

Cantor pôs a hipótese de não existirem conjuntos com um "tamanho" intermédio entre o conjunto dos números inteiros e o dos reais entre 0 e 1. Várias pessoas tentaram provar este resultado até que, em 1963, o lógico Paul Cohen mostrou que ele não podia ser provado unicamente com base nos axiomas familiares da teoria dos conjuntos. Talvez o pudesse ser com base noutros axiomas.

Mas Cantor sabia já que o tamanho de todos os conjuntos não parava no contínuo — existia uma "infinidade de infinitos". Ao conjunto de todas as linhas curvas de um plano, por exemplo, não pode ser atribuída uma correspondência um a um com o contínuo dos pontos de uma linha — equivalente ao conjunto de todos os números entre 0 e 1. Isto porque podemos imaginar um conjunto de linhas curvas em que cada uma delas intercepta um dos pontos de uma linha do plano. Basta-nos então desenhar mais uma curva diferente de todas as outras e verificar que já não sobram nenhuns pontos para ela intercetar. Portanto, o conjunto das linhas curvas é "maior" do que o conjunto dos pontos da linha — o contínuo. Cantor demonstrou que a hierarquia dos conjuntos infinitos se prolonga indefinidamente.

Em 1983 Cantor descreveu o seu trabalho de seminário da seguinte forma:

> A descrição das minhas investigações sobre a teoria de conjuntos atingiu um estado em que a sua continuação depende de uma generalização dos inteiros positivos reais para além dos limites presentes; uma generalização que segue numa direção na qual, pelo que eu sei, nunca ninguém olhou.
>
> Dependo de tal maneira da generalização do conceito de número que, sem ela, não posso avançar nem sequer pequenos passos, na teoria dos conjuntos. Espero que esta situação justifique ou, se necessário, desculpe a introdução de ideias aparentemente estranhas nos meus argumentos. De facto, o objetivo consiste em generalizar ou estender a série de inteiros reais para além de infinito. Por muito ousado que isto possa parecer, exprimo não só a esperança, mas também a firme convicção, de que, a seu devido tempo, esta generalização será aceite como um passo bastante simples, apropriado e natural. Ainda assim, estou convencido de que, adotando um tal procedimento, me estou a pôr em oposição a certas perspetivas generalizadas sobre o infinito nas matemáticas e a opiniões correntes acerca da natureza do número.

Muitos matemáticos pensaram que Cantor estava doido (ele teve realmente um colapso nervoso; retomou o seu trabalho em 1887; mas morreu numa instituição de saúde mental em 1918) e que os seus conjuntos infinitos eram monstros. Foi especialmente atacado pelo seu antigo professor, Leopold Kronecker, e por Henri Poincaré. Contudo, os proponentes da teoria dos conjuntos

acabaram por levar a sua avante e mostraram que a sua teoria fornecia um enquadramento unificador para toda a matemática. De facto, a visão aceite hoje em dia é que a matemática se identifica com a teoria dos conjuntos. (O domínio da lógica, no entanto, é maior do que a simples teoria dos conjuntos.) Em 1926, David Hilbert exprimiu o sentimento da maioria dos matemáticos quando afirmou: "Ninguém nos expulsará do paraíso que Cantor nos criou."

Algumas das ideias de Cantor acerca dos conjuntos revelaram-se um tanto ingénuas, tendo sido subsequentemente efetuadas várias tentativas de formalizar e axiomatizar as suas ideias originais, especialmente por parte de Ernst Zermelo e de Abraham Fraenkel. No entanto, com a nova ferramenta unificadora da teoria dos conjuntos, os matemáticos do final do século XIX começaram a pôr em causa as próprias bases da sua disciplina. Surgiu um novo campo, os fundamentos da matemática, que atraiu alguns dos maiores lógicos e matemáticos do nosso século. Estes matemáticos estavam fortemente divididos a respeito da própria natureza do raciocínio matemático. Essas divisões, que já vinham de longa data, eram fortemente contrastadas à luz da nova teoria dos conjuntos. Vamos examinar três das doutrinas mais importantes: o logicismo, de Bertrand Russell, o intuicionismo, de L. E. J. Brouwer, e o formalismo, de David Hilbert. Muitas dessas doutrinas tinham a ver com a forma como a matemática via os conjuntos, o papel da lógica e o que uma demonstração matemática deveria ser. Todos partilhavam um grande empenho pelo rigor; eram matérias profundas de princípio que os dividiam.

Um grande motivo para se reexaminarem as bases da matemática era que a teoria dos conjuntos era extraordinariamente poderosa e se aplicava a toda a matemática. Contudo, estava atulhada de paradoxos intransponíveis, caso fosse usada com alguma leviandade. Para o demonstrar, gostaria de contar uma curta "anedota teológica" acerca de uma experiência por que passaram muitos jovens que refletiram sobre a natureza de Deus.

Lembro-me de, quando andava no liceu, refletir sobre que tipo de ser Deus poderia ser — sentia uma certa curiosidade. Deus era claramente um Ser omnipresente, omnipotente e misericordioso,

mas alguém que só ajuda os outros que não se ajudam a si mesmos. Ajudar-se-ia Deus a Ele próprio? Se não se ajudasse, então deveria ajudar-se. Se se ajudasse, então não deveria ajudar-se.

Este tipo de contradição apoquentava-me. Também me lembro de me interrogar se, sendo Deus omnipotente, poderia modificar as leis da lógica. Se pudesse, então seria uma espécie de um ser sem lei, incompreensível para a mente humana. Se, por outro lado, não as pudesse modificar, não seria um ser omnipotente. Estas alternativas não me satisfaziam. Embora saiba que este "raciocínio de adolescente" tem algumas lacunas (pode, no entanto, ser-lhe dada uma formulação rigorosa), deixou-me uma sensação de que ou Deus não estava sujeito às leis da lógica, e nesse caso não valia a pena pensar racionalmente sobre Deus, ou estava sujeito às leis da lógica, o que faria d'Ele um deus pouco impressionante. Estas preocupações não se limitam às mentes dos adolescentes. Sei que Gödel desenvolveu uma prova da existência de Deus (eu nunca a vi). Com certeza que estava consciente dos paradoxos lógicos associados com a maioria das noções lógicas de Deus. Um conjunto é basicamente uma coleção de objetos — os elementos do conjunto —, cujo número pode ser infinito. Um dos paradoxos mais elementares da teoria dos conjuntos ocorre quando se considera o conjunto de todos os conjuntos, ou seja, o conjunto a que pertencem todos os outros conjuntos. Até aqui parece não haver nenhum problema. Eles surgem quando perguntamos se o conjunto de todos os conjuntos se inclui a si mesmo como elemento. Se não se contém a si mesmo, então, visto ser ele próprio um conjunto, não pode ser o conjunto de todos os conjuntos. Se, pelo contrário, se inclui a si mesmo, como deverá ser, então terá forçosamente de ser membro de um conjunto mais vasto e não pode, portanto, ser o conjunto de todos os conjuntos. Uma profusão de paradoxos, normalmente incluindo uma autorreferência como esta, ocorrem na lógica e na teoria dos conjuntos quando se não tem cuidado. O mais famoso deles é o paradoxo cretense da mentira, que surge quando se considera a frase: "Eu não digo a verdade." É importante eliminar todos esses paradoxos, pois eles implicam uma inconsistência — uma afirmação única que é *simultaneamente* verdadeira e falsa. Ocorrendo uma única inconsistência num sistema lógico, é logo possível provar que

qualquer afirmação da sua negação é também verdade — em resumo, não existe verdade.

Bertrand Russell interessava-se muito por estes paradoxos, desde o dia em que encontrou um no trabalho de Gottlob Frege (o tristemente célebre axioma V), que tornou inconsistente esse importante trabalho pioneiro. Russell achava que os paradoxos surgiam por negligências de distinção entre diferentes "tipos" de conceitos. Um "conjunto de conjuntos", por exemplo, não é do mesmo tipo que um conjunto em si, e é errada a comparação de tipos lógicos diferentes — é como comparar "maçãs" com "justiça". O "conjunto de todos os conjuntos" é semelhante a uma cobra que se tenta engolir a si própria, começando pela cauda — tal não é possível. Contudo, uma cobra de um tipo — uma cobra grande — pode engolir uma cobra de outro tipo — uma cobra pequena. Fazendo uma distinção entre "tipos lógicos" diferentes, evitam-se os paradoxos. O interesse dos tipos lógicos não se limita aos próprios lógicos. O antropólogo Gregory Bateson fez larga utilização desta noção na elucidação do comportamento humano e da organização biológica.

Russell via a matemática como um ramo da lógica — um sistema de pensamento que trata com estruturas, independentemente do seu verdadeiro significado. Embora esta ideia não fosse nova (muitos lógicos e matemáticos, incluindo G. Leibniz, A. De Morgan, G. Boole, C. S. Pierce, E. Shröder, G. Frege e G. Peano, contribuíram para ela), foi ele quem a levou à sua formulação e execução mais claras. Posta de maneira simples, a tese de Russell diz que a matemática faz parte da lógica. Especificamente, a matemática é idêntica à teoria dos conjuntos e a teoria dos conjuntos faz parte da lógica.

Em lógica podem-se estabelecer várias regras. Por exemplo, se A, B, e C são proposições (não nos interessa o seu significado), e se A implica B e B implica C, então A implica C — é uma regra da lógica, independentemente dos significados de A, de B ou de C. Russell pensava que na matemática — na geometria, na teoria dos números, na análise — também era assim. De certo modo, os triângulos e os números não existem. Existem somente as proposições lógicas acerca deles; ou, o que é o mesmo, essas estruturas matemáticas não têm qualquer significado fora das

suas definições lógicas. Além disso, a linguagem acertada para a expressão de relações lógicas não era a linguagem humana corrente, mas sim a lógica simbólica. Entre 1910 e 1913, Russell e o seu colaborador Alfred North Whitehead publicaram a sua obra colossal em três volumes, *Principia Mathematica*, na qual os teoremas da geometria analítica, os números naturais e os reais são descritos com base nas leis da lógica. John G. Kemeny, um matemático contemporâneo, fazendo troça dos filósofos, comentou uma vez, a respeito dos *Principia*, que se trata de "uma obra-prima discutida por praticamente todos os filósofos, mas que nunca foi lida praticamente por nenhum". E se alguma vez experimentar lê-la, como eu fiz, depressa compreenderá porquê. Está a abarrotar de símbolos abstratos e somente no segundo volume se chega à demonstração de que 1 + 1 = 2.

Os *Principia* tiveram uma profunda influência na forma como as pessoas viam a relação entre a lógica e a matemática — foi uma divisória de águas. Contudo, não era ainda satisfatório. A teoria dos tipos, que foi introduzida com o fim de evitar os paradoxos, revelou-se incrivelmente pesada — até tipos diferentes de números (como números reais e racionais) pertenciam a classes diferentes. Além disso, Russell e Whitehead viram-se forçados a introduzir vários axiomas "artificiais" que pareciam demasiadamente rebuscados. Como o matemático Herman Weil comentou a respeito dos *Principia*: "A matemática não se baseia mais na lógica do que se baseia a utopia construída pelo lógico." Parecia a muitas pessoas que a matemática era mais do que simples lógica. Mas que mais exigia a matemática? Os intuicionistas defendiam que os objetos e as verdades matemáticas existiam realmente, mas apenas dentro da nossa vida mental e da nossa imaginação intuitiva. Liderados pelo matemático holandês L. E. J. Brouwer, os intuicionistas criticaram o programa logicista de Russell. A matemática, segundo os seus argumentos, era mais do que simples lógica; estava presa à capacidade da nossa mente para descrever entidades matemáticas e discernir as suas propriedades. Os objetos que não pudessem ser assim intuídos não tinham uma existência válida. Brouwer herdou de Kant a noção de que certas cognições — particularmente as cognições matemáticas — estão incutidas na mente humana e que proposições lógicas vazias, como as que Russell advogava para conteúdo da matemática, passavam ao

lado da essência da matemática, do seu conteúdo objetivo. Brouwer exigia uma ideia clara e distinta dos objetos matemáticos.

Brouwer criticava o "princípio do terceiro excluído", que estipulava que ou uma propriedade *P* de um objeto matemático era verdadeira ou a sua negação tinha de o ser. Este princípio parece muito razoável. Por que é que o criticava Brouwer? A razão era que o princípio do terceiro excluído permitia um género de demonstração matemática frequentemente usado e conhecido por *reductio ad absurdum*, no qual se provava que uma dada proposição *P* tinha de ser verdadeira provando a sua dupla negação: a negação da negação de P. De acordo com o princípio do terceiro excluído, a proposição *P* e a negação da negação de *P* são, do ponto de vista lógico, a mesma proposição. Os matemáticos provavam frequentemente a existência das coisas sem realmente as construírem. Mostravam simplesmente que, caso essas coisas não existissem, era-se levado a uma contradição pelo princípio do terceiro excluído. Então, embora se soubesse que o objeto existia, não se teria qualquer ideia dos seus pormenores e da sua estrutura — uma perspetiva que não agradava a Brouwer. Ele achava que todas as provas deveriam ser *construtivas* — ou bem que se provava a proposição *P*, diretamente, ou bem que se mostrava que *P* era um absurdo, também diretamente. Ao não permitir a demonstração por absurdo, Brouwer fazia desaparecer uma das ferramentas mais poderosas do reportório das demonstrações matemáticas.

As críticas de Brouwer ao tipo de demonstração matemática eram especialmente dirigidas aos formalistas, chefiados por David Hilbert, um dos maiores vultos da matemática do século XX. Einstein, que, como é evidente, não se interessava muito por estas disputas entre Hilbert e Brouwer, referia-se a elas como "a batalha da rã e do rato". (O próprio Einstein tinha uma disputa com Hilbert sobre a teoria matemática da relatividade geral. Uma disputa que, no entanto, foi resolvida amigavelmente.)

Hilbert nascera em Königsberg, a terra natal do filósofo Kant. Königsberg era reputada pelas suas matemáticas, e foi aqui que Hilbert formou um trio, o "círculo de Königsberg", com outros dois grandes matemáticos, Adolf Hurwitz e Hermann Minkowski (que

descobriram as implicações quadridimensionais da relatividade restrita de Einstein). Ao contrário de muitos grandes matemáticos, Hilbert só revelou o seu grande talento depois dos vinte anos. No entanto, quando finalmente o revelou, foi arrasador. Deu um grande contributo à teoria dos invariantes, à geometria e aos números algébricos. A sua obra, nalguns casos, foi tão geral e teve um alcance tão grande que varreu campos de investigação por inteiro — não sobrava nada para se fazer. Trabalhava exaustivamente num campo da matemática, como por exemplo a teoria algébrica de números, dava um grande contributo e depois largava-o de repente, libertando o seu génio para um outro campo inteiramente diferente. Áreas houve cujas bases foram lançadas por ele.

Em breve se estabeleceu em Gotinga, a capital alemã da matemática, e se afirmou como o maior matemático alemão, se não mesmo europeu. Dava muitas vezes aulas sobre a sua própria investigação e depois escrevia um artigo que fazia história. Em dada altura, lançou mão do desafio de construir uma ciência da geometria inteiramente abstrata — um modelo que preenchesse os requisitos dos axiomas sem efetuar qualquer referência aos próprios objetos da geometria. Um dia, cheio de entusiasmo por mais este desafio, aguardava o comboio, juntamente com dois colegas, na estação de caminho-de-ferro de Berlim, quando comentou: "É necessário poder sempre dizer "mesas, cadeiras, canecas de cerveja' em vez de "pontos, retas, planos". Por outras palavras, não interessava que tipos de objetos específicos satisfaziam os axiomas abstratos. Hilbert foi um dos grandes impulsionadores do movimento por uma maior abstração que tem dominado o pensamento do nosso século.

Em 1990, numa conferência do II Congresso Internacional de Matemática de Paris, Hilbert expôs vinte e três problemas matemáticos sem solução conhecida, propondo que o progresso da matemática fosse julgado pelos progressos na resolução desses problemas. Tal como os Gregos primitivos nos haviam deixado alguns problemas, como a duplicação do volume do cubo, também Hilbert expôs os seus problemas. Principiou a sua famosa conferência perguntando à audiência: "Quais de nós não desejariam acima de tudo levantar um pouco o véu por trás do qual se esconde o futuro, de modo a poder dar uma olhada ao

avanço futuro da nossa ciência e ao segredo do seu desenvolvimento!" Em 1950, a meio do século, já cerca de doze desses problemas estavam resolvidos. Muitas das soluções para os problemas de Hilbert foram bastante longe, dando origem a novos campos de matemática.

Mais para o fim da sua vida, ao sentir os poderes criativos a diminuir, Hilbert dedicou a sua reflexão quase exclusivamente à natureza da matemática, um assunto por que se tinha interessado durante toda a sua vida. Na sua perspetiva, a matemática era um sistema dedutivo baseado em axiomas. Mas, para provar os teoremas a partir dos axiomas, era necessário usar a lógica, a teoria de números elementar e a teoria dos conjuntos: caso não se tivesse cuidado, era fácil arranjar problemas com os paradoxos associados à teoria dos conjuntos e à lógica. Hilbert, como um programa de fundo, pôs então ombros à tarefa de provar a consistência de sistemas dedutivos matemáticos. Provou, por exemplo, a consistência da geometria euclidiana, partindo do pressuposto de que a teoria de números era consistente. A sua estratégia consistia em pegar numa área da matemática, como a geometria euclidiana, e tentar reduzi-la a uma outra área mais simples, neste caso, a teoria de números, que estivesse numa base mais segura. No final, seria possível provar a consistência de todas as áreas da matemática, colocando-as todas numa base mais firme.

Para atingir essa base mais firme, Hilbert introduziu o "ponto de vista finito" — um sistema formal devia conter operações finitas e permitir somente proposições que pudessem ser expressas num número finito de símbolos. Por exemplo, as demonstrações que exigissem um número de passos infinito não eram permitidas.

O programa de Hilbert deu origem a uma nova disciplina matemática — a teoria das demonstrações, na qual as próprias demonstrações matemáticas se tornavam objetos do inquérito lógico e matemático. Era uma espécie de autorreflexão ou autorreferência no seio das matemáticas. O objetivo da teoria das demonstrações consistia em provar a consistência de um conjunto de axiomas — um grupo de proposições expressas na linguagem da lógica simbólica. Daqui em diante, a matemática passava a ser

vista como reduzida a um conjunto de símbolos que exprimiam perfeitamente a sua constante lógica, aquilo a que se chama um sistema matemático formal. Segundo este ponto de vista, a essência da matemática está *completamente* incorporada nos símbolos escritos, por exemplo, numa folha de papel e nas regras exatas que nos dizem como é que eles serão manipulados. "O conteúdo da matemática", dizia Hilbert, "são... os próprios símbolos, cuja estrutura é imediatamente clara e reconhecível." A tarefa do teórico das demonstrações é provar a consistência desses sistemas formais, ou seja, demonstrar que, se se manipularem os símbolos de acordo com as regras explícitas, nunca se chega a uma proposição e à sua negação simultaneamente. Nas palavras de Hilbert: "O problema da consistência... reduz-se obviamente a provar que a partir dos nossos axiomas e de acordo com as regras nas quais concordámos, nunca podemos chegar a '1 ≠1' como a última fórmula de uma demonstração." Além disso, uma vez assegurada a consistência de um sistema formal de axiomas, pode-se dar lugar, com confiança, à demonstração dos teoremas — o conjunto de todas as proposições verdadeiras (cadeias de símbolos) que são consequência dos axiomas. Este era o programa formalista que, em certa medida, era idêntico ao próprio programa da matemática. Com a missão definida com tanta clareza e propósito, a matemática parecia estar para sempre vacinada contra uma possível infeção das doenças geminadas do paradoxo e da inconsistência. Não parecia, portanto, levantar-se nenhum obstáculo ao poderoso programa formalista. Foi então que surgiu o teorema de Gödel, que veio mostrar que o programa formalista de provar todos os teoremas de um sistema matemático, ou sequer a sua consistência, não passava de um sonho impossível.

Kurt Gödel foi um produto do notável fermento intelectual de Viena — a mesma sociedade que viu crescer Ludwig Wittgenstein, Karl Kraus, Gustav Klimt, Ludwig Boltzmann e Sigmund Freud, entre outros. O instinto intelectual de Gödel levou-o a examinar as próprias bases da matemática. Em 1931 publicou o seu célebre teorema que se aplicava a sistemas lógicos formais como os *Principia* e o programa formalista de Hilbert. O teorema de Gödel dizia simplesmente que qualquer sistema lógico formal que contivesse pelo menos os axiomas da aritmética teria necessariamente ou de ser inconsistente (e ninguém pretende

isso) ou de conter proposições verdadeiras exprimíveis dentro do sistema formal que não são passíveis de demonstração. Este resultado era absolutamente notável e não tinha qualquer precedente na história da lógica e da matemática. O que ele queria dizer é que algumas verdades da matemática não poderiam nunca ser provadas. Neste sentido, a matemática era incompleta. Curiosamente, um dos teoremas de Gödel estipulava explicitamente que as demonstrações de consistência finita não podiam ser efetuadas. Deste modo, o sonho de Hilbert de provar a consistência de toda a matemática tornou-se impossível de realizar.

Gödel provou o seu famoso teorema segundo os cânones da lógica formal, não sendo muito fácil seguir a sua demonstração rigorosa. Mas, no essencial, resume-se a isto: Gödel, usando algumas propriedades da aritmética simples, conseguiu construir uma proposição que diz de si mesma: "Não sou demonstrável." Esta afirmação, caso seja falsa — isto é, no caso de a proposição ser demonstrável —, implica uma inconsistência dentro do sistema. A outra opção godeliana consiste na veracidade da afirmação — a proposição *não é*, realmente, demonstrável. Mas isto quer dizer que o sistema matemático é incompleto, no sentido de que existem proposições verdadeiras não demonstráveis no interior do sistema. Esta proposição, é importante notá-lo, evita o paradoxo do mentiroso na afirmação que diz de si mesma: "Não sou verdadeira.", uma vez que verdade e demonstrabilidade são propriedades distintas das proposições. É significativo o facto de Gödel ter conseguido demonstrar que a proposição de esse sistema ser consistente é uma dessas afirmações indemonstráveis.

Como é que o teorema de Gödel se aplica à matemática em si? Infelizmente, o seu teorema nem sempre nos diz quais as proposições que não são demonstráveis. Há quem pense que a conjetura de Goldbach — a proposição de que cada número par é a soma de dois números primos (12 =5+7 ou 42 = 19 + 23) é uma proposição verdadeira não demonstrável no sistema formal corrente (foi verificada por computador até números pares muito grandes). Mas é difícil ter a certeza; talvez amanhã alguém a demonstre ou mostre que é falsa. Em tempos, pensou-se que o problema do mapa de quatro cores não conseguia ser provado

devido ao teorema de Gödel, mas veio-se a verificar que não. Independentemente da determinação de quais os teoremas que não podem ser demonstrados, sabemos que esses teoremas existem. A perspetiva formalista da matemática — de que era, em princípio, possível produzir todos os teoremas verdadeiros da matemática — chegou ao fim.

Apesar de o teorema de Gödel alterar profundamente a nossa perspetiva da matemática, o próprio Gödel achava que a matemática, que se identifica com a teoria dos conjuntos, estava em boa forma — podia-se evitar a inconsistência, pagando para isso o preço da completude. Para Gödel, os problemas profundos eram os problemas da lógica que iam além da teoria dos conjuntos corrente, problemas que ele continuou a abordar no resto da sua vida.

Gödel passou os últimos anos da sua vida nos Estados Unidos, no Instituto de Estudos Avançados de Princeton. Ele e Einstein eram bons amigos e costumavam ir juntos para casa, discutindo os problemas fundamentais da existência ou, a um nível mais corriqueiro, um pouco de política. Certa vez, Einstein confidenciou a um colega: "Agora é que o Gödel endoideceu. Votou no Eisenhower!"

Gödel era uma pessoa tímida e sedentária que evitava a presença em público. Estive uma vez com ele, quando veio à Universidade de Rockefeller, em junho de 1972, a fim de receber um grau honorífico. No fim da cerimónia, um colega meu perguntou a Gödel em que é que ele tinha estado a pensar enquanto esteve sentado na tribuna entre David Rockefeller, homem de negócios e filantropo, e Frederick Seitz, um físico de renome, na altura reitor da universidade. Lembro-me de que Gödel se manteve silencioso durante um grande bocado, enquanto atravessávamos o *campus* universitário, e depois, como se tivesse acordado de um transe, respondeu: "Sim! Eu também estava *espacialmente* entre eles!" Não faço a mínima ideia do que é que ele estava a pensar.

No fim da sua vida, continuou a debruçar-se sobre questões fundamentais e sobre a sua perspetiva da filosofia como uma ciência exata. Envolveu-se na filosofia de Edmund Husserl, uma

visão que defendia a existência de uma filosofia primeira suscetível de ser compreendida por intuição introspetiva no seio da estrutura transcendental da consciência — o próprio terreno do ser. Considerava que fazia sentido questionar a verdade dos axiomas — que os axiomas eram mais do que um simples sistema formal e revelavam uma qualidade de existência lógica que estava para além deles e lhes fornecia a sua base última. Comentando a perceção de objetos matemáticos, disse uma vez: "Mas apesar do seu afastamento da experiência sensorial, temos algo como uma perceção dos objetos da teoria dos conjuntos, como se vê pelo facto de os axiomas se nos imporem como verdadeiros. Não vejo nenhuma razão para termos menos confiança neste tipo de perceção, isto é, na intuição matemática, do que na perceção sensorial." Gödel foi um "platonista epistemológico" que, no fim da sua vida, como já referi anteriormente, chegou mesmo a conceber uma demonstração matemática da existência de Deus. Veio a falecer em Princeton, Nova Jersey, em 1978, como consequência, sobretudo, de subnutrição (não se alimentava com receio de que a comida estivesse envenenada). Foi um dos pensadores lógicos mais profundos de todos os tempos e a sua obra será recordada durante milénios.

Os trabalhos de Gödel mudaram o rumo do pensamento sobre a natureza da matemática. Mesmo no pensamento puro havia um limite para aquilo que era possível demonstrar. Na esteira do trabalho de Gödel, os lógicos continuaram a aprofundar o seu conhecimento dos sistemas formais. Hoje, a lógica formal divide-se em teoria dos conjuntos (originalmente desenvolvida por Cantor, Zermelo e Fraenkel), teoria dos modelos (modelação de axiomas), teoria das demonstrações (Hilbert e Gödel), intuicionismo (Brouwer e o seu discípulo Heyting, que o fizeram reviver como um raciocínio construtivo, eliminando o princípio do terceiro excluído, na década de 30) e a teoria das recursões, que deve a sua origem ao processo de tornar precisa a noção de algoritmo — um programa para a resolução de um dado problema lógico ou matemático. A teoria das recursões, acerca da qual ainda não falámos, deve a sua origem aos génios de Gödel, Allan Turing e Alonzo Church e ao seu interesse contemporâneo pela ascensão dos computadores eletrónicos.

Através do trabalho de Frege, Russell, Hilbert e outros, tornou-se evidente que a lógica matemática envolvia a manipulação de símbolos, de acordo com regras bem definidas. As demonstrações matemáticas são um exemplo dessa manipulação. Allan Turing, um matemático inglês, cuja obra se caracterizou por uma originalidade única e uma profundidade de objetivos, apercebeu-se de que havia interesse em considerar essas manipulações simbólicas como efetuadas por uma máquina (mais tarde chamada uma máquina universal de Turing). Como já foi explicado, essa máquina, que é vista como uma máquina conceptual e não como uma máquina verdadeira, é constituída por uma fita com um conjunto de símbolos que, de acordo com um programa previamente produzido, podem ser apagados ou impressos. O facto de a máquina de Turing ser tão simples e, contudo, como Turing demonstrou, abranger toda a noção de computabilidade está na base do seu poder conceptual. A máquina de Turing veio mecanizar a lógica, reduzindo-a, assim, ao seu núcleo inteiramente formal.

De posse do conceito de uma máquina de Turing, o próprio Turing aplicou-o às questões fundamentais da lógica matemática. Surgem questões acerca do que pode e não pode ser realizado por esta máquina num intervalo de tempo finito (um vestígio do finitismo de Hilbert). Para começar, demonstrou que o computador mais complexo podia sempre ser reduzido a uma destas máquinas universais. Tudo o que possa ser calculado pode também ser calculado numa máquina de Turing. Ou, invertendo as coisas, uma máquina de Turing define aquilo que se entende por "computável". Prosseguiu com a definição de uma nova classe de números — os números computáveis que podem ser calculados numa máquina por um programa de instruções finitas. Por exemplo, o número π = 3,14159... com uma expansão decimal infinita é um número computável, pois é possível escrever um programa bastante curto que calcule a expansão do π. O programa do π correrá indefinidamente, uma vez que a expansão do π contém um número infinito de dígitos — contudo, o programa, em si mesmo, é finito. Para outros números — os números incomputáveis — esse programa finito não existe. Esta distinção entre números computáveis e incomputáveis está relacionada de perto com a distinção que descrevemos anteriormente entre sistemas simuláveis e insimuláveis. Para os sistemas insimuláveis, não

existe nenhum programa, mais simples que o próprio sistema, que os possa modelar.

O teorema de Gödel tomou um outro aspeto à luz da máquina de Turing. Podemos imaginar que a máquina foi preparada para demonstrar teoremas dentro de um dado sistema de axiomas. Suponhamos que ela começa a provar um certo "teorema" e nunca mais pára. Como poderemos saber se a máquina alguma vez chegará ao fim da demonstração do teorema? Este é o famoso problema da paragem. Gödel mostrou que existem proposições indecidíveis em sistemas axiomáticos suficientemente ricos. Sabemos, portanto, que para essas a máquina nunca mais pára. No entanto, não podemos saber antecipadamente quais são essas proposições: o próprio problema da paragem é indecidível — a própria decidibilidade de algumas proposições é indecidível.

O trabalho de Church, embora não apelasse ao conceito da máquina, era logicamente equivalente ao de Turing. Provou um teorema fundamental (agora conhecido por teorema de Church) sobre a *validade lógica* de proposições expressas como fórmulas lógicas. Diz-se que uma fórmula é *logicamente válida* quando ela é verdadeira independentemente da interpretação que damos aos seus símbolos, funções e constantes. O teorema de Church estipula que nenhuma máquina de Turing pode decidir se uma fórmula lógica arbitrária é logicamente válida. Se aceitarmos a ideia de que todas as fórmulas intuitivamente computáveis podem ser computadas numa máquina de Turing (a tese de Church), então o seu teorema implica que nenhuma máquina nos dirá alguma vez se uma fórmula arbitrária é logicamente válida — será necessário recorrer à ingenuidade, à conjetura e à imaginação para o fazer. Este resultado parece trazer alguma credibilidade ao famoso comentário de Gödel de que talvez existam coisas que uma mente pode fazer e um cérebro não. Ou poderá simplesmente significar que o nosso cérebro não é redutível a uma máquina universal de Turing — uma interpretação alternativa do teorema de Church.

Por muito fascinantes que fossem estes desenvolvimentos da lógica e dos fundamentos da matemática (que ainda hoje prosseguem), eles eram vistos com uma certa apreensão por parte dos matemáticos ativos. O desenvolvimento da lógica e a

investigação dos fundamentos da matemática foram uma resposta aos paradoxos que surgiram, no final do século XIX, com a teoria dos conjuntos. Esses problemas agora parecem estar resolvidos. Hoje a lógica é vista como uma espécie de águas passadas — umas águas passadas fundamentais, diga-se de passagem —, quando comparadas com o oceano imenso da matemática moderna. André Weil, um grande matemático do nosso século, comentou a respeito da ligação entre a matemática e a lógica: "Se a lógica é a higiene da matemática, não é a sua fonte de alimentos; os grandes problemas fornecem-lhe o pão de cada dia, do qual ela subsiste." E depois repete no mesmo tom: "Aprendemos a *traçar* a *genealogia* de toda a nossa ciência até uma única fonte, constituída por alguns sinais e algumas regras para a sua utilização; existe um reduto inquestionável, *dentro do qual mal nos podemos confinar sem risco de provações*, mas para onde nos podemos sempre retirar em caso de incerteza ou perigo exterior." Os matemáticos vão buscar o seu sustento ao conteúdo e não à forma. A visão de Russell da identidade da matemática com a lógica até pode estar em princípio correta, mas na prática revela-se estéril. Dizer que a matemática é idêntica à teoria dos conjuntos é o mesmo que dizer que a poesia é idêntica a frases organizadas — passa ao lado do conteúdo e do significado.

Embora este capítulo foque a filosofia da matemática (e daí a ênfase na lógica e nas bases da matemática e não na matemática propriamente dita), é importante dar agora uma certa perspetiva aos aspetos abordados. A filosofia da matemática é um pântano por onde poucos matemáticos no ativo gostam de andar. Preferem trabalhar nos problemas da matemática. Contudo, os matemáticos no ativo mantêm opiniões filosóficas acerca da sua disciplina e alguns (como Hilbert) deixaram-lhe grandes contribuições. Por isso, é importante examinar os pontos de vista de alguns matemáticos, ainda que estes sejam antifilósofos.

É difícil para um leigo atingir o desenvolvimento enorme que a matemática experimentou neste século, os novos campos que foram criados e que enriqueceram a nossa experiência. A ênfase da matemática tem-se deslocado relativamente à posição onde antes se situava. De uma maneira geral, toda a matemática pode ser caracterizada pela interação de objetos matemáticos, como os números ou a multiplicidade de geometrias, por um lado, e os

seus morfismos — a maneira como são transformados pelos mapeamentos e funções matemáticos —, por outro. Objetos e morfismos — é esse o tópico central de toda a matemática. As do início deste século, os matemáticos debruçavam-se, sobretudo, sobre os objetos e as suas propriedades — o que "ali" existia no domínio da matemática. Por exemplo, no século XIX foram descobertos novos tipos de números — os quaterniões e os números complexos foram estudados em profundidade. Foram descobertas novas geometrias não euclidianas e exploradas as suas propriedades. Neste século XX, no entanto, não são tanto os objetos da matemática que ocupam o centro das atenções, mas sim os seus morfismos. A *relação* abstrata entre as entidades matemáticas tornou-se o objeto de estudo principal e as entidades, em si, passaram a desempenhar um papel secundário. Os matemáticos aperceberam-se, finalmente, do poder de abstração — de certo modo, os morfismos *definem* os objetos. Alguns morfismos, por exemplo, tornam ou deixam os objetos invariantes, como é o caso da rotação do círculo em torno do seu centro, e isso pode ser usado na definição do objeto. É a maneira como os objetos se transformam que define o que eles são. Os poderosos conceitos de morfismo e de aplicação foram explorados exaustivamente.

É difícil expor o cenário da matemática moderna. J. Fang, um historiador da matemática, comparou o desenvolvimento matemático ao crescimento de uma cidade. No meio, está o centro histórico — um património preservado, representando a matemática primitiva. A cidade nova cresce em torno desse centro. Vemos a cidade do século XIX, com os seus edifícios sólidos e utilitários, cercando o centro histórico. E em torno disto tudo estendem-se os subúrbios do século XX, que se espalham rapidamente até ao horizonte — os novos campos da matemática. Tão vastos são os subúrbios que, ao pé deles, o centro tende a desvanecer-se. Alguns subúrbios crescem de tal maneira que se tornam cidades por direito próprio. Há um problema de comunicação entre os subúrbios — alguns praticamente desconhecem a existência de outros. O cantinho familiar que servia de domínio à matemática cresceu até quase à perda do controle, sendo ridícula qualquer pretensão de um lógico que pretenda ser capaz de impor a ordem neste estado de coisas; é impossível alguém manter-se a par de todo o trabalho.

É então que surge Nicolas Bourbaki, o grande matemático francês do século XX, herdeiro legítimo de Hilbert e Poincaré, que aparece em cena sob a capa do urbanista que vem trazer a ordem a este caos. Bourbaki, com a autoconfiança própria de um visionário, propõe-se rever e transformar nada menos do que a totalidade do corpo da matemática moderna. Nada na matemática lhe é estranho. Independentemente da forma como se vê Bourbaki, a sua obra, nas palavras do matemático Paul Halmos, é tal que "sem [ela], a matemática do século XX seria, para melhor ou para pior, muito diferente do que é hoje". Emil Artin presta um tributo muito maior a Bourbaki: "A nossa época assiste à criação de uma obra monumental: uma exposição da totalidade da matemática contemporânea. Além disso, esta exposição é realizada de uma maneira tal que a ligação comum entre todos os ramos da matemática se torna evidente, que o enquadramento que suporta toda a estrutura não se irá tornar obsoleto a curto prazo e que as ideias novas poderão facilmente ser absorvidas. Bourbaki atinge este objetivo tentando apresentar cada conceito com a maior generalidade e abstração possíveis."

Quem é Nicolas Bourbaki? Bourbaki é o nome de um grupo de matemáticos franceses de renome que, apercebendo-se da impossibilidade de um só indivíduo atingir uma compreensão sinóptica de toda a matemática, formaram uma coletividade e escreveram (pelo menos de início) sob o pseudónimo de Nicolas Bourbaki. O grupo Bourbaki estava ligado por uma filosofia comum da matemática (essencialmente abstração e generalidade) e por um desejo comum de se divertirem um pouco. Já nos anos trinta, o enérgico Nicolas Bourbaki escrevia artigos matemáticos que revelavam uma imaginação e uma profundidade incríveis, surpreendendo toda a comunidade matemática. Um novo génio havia surgido. De início, a sua identidade era desconhecida (exceto dos seus editores, Hermann & Co.), mas sabemos agora quem foram os seus *membres fondateurs*: Henri Cartan, Claude Chevallier, Jean Delsarte, Jean Dieudonné, André Weil — a nata dos matemáticos franceses da sua geração. Bourbaki pôs aos ombros a tarefa enciclopédica de cobrir a totalidade da matemática nos seus *Éléments* (assim apropriadamente denominados em homenagem à obra de Euclides), cujos volumes ainda hoje são publicados. Há muito que os membros iniciais foram substituídos e reforçados por outros — é uma grande honra

fazer parte do Bourbaki. É costume encontrarem-se em França, no campo, durante o Verão, e por vezes em Paris, a fim de realizarem o seu trabalho conjunto e planearem volumes futuros. Durante estas sessões é evidente um grande *esprit de corps*. Recordando esses tempos, Cartan comentava: "Era necessário a cada membro esquecer-se da sua especialidade durante um certo período; éramos forçados a aprender tudo de novo, a partir do zero. Cada problema tinha de ser discutido em conjunto e, de acordo com isso, a versão final só podia surgir na sequência dessas discussões."

O nome Bourbaki tem uma origem interessante. Segundo a lenda, dois irmãos gregos, cretenses, Emanuel e Nicolaus Skordylis, demonstraram um tal heroísmo combatendo os Turcos durante uma invasão no século XVII que os Turcos os apelidaram de "Vourbachi" ou "líderes dos guerreiros". Os dois irmãos assumiram a alcunha sugerida pelos seus inimigos e transmitiram-na aos seus filhos, tendo Vourbachi ficado Bourbaki em grego.

Um século mais tarde, um bisneto de Emanuel, chamado Sauter Bourbaki, que era marinheiro, foi enviado pelo irmão de Napoleão ao Egipto com a mensagem de que Napoleão deveria voltar a França para um *coup d'État*. Depois de tomar o poder, Napoleão, em sinal de agradecimento, garantiu uma educação francesa aos três filhos de Sauter Bourbaki. Um dos três filhos veio a tornar-se um oficial francês e o seu filho Charles foi o pai de um general francês. O general Charles Bourbaki conduziu o seu exército na Guerra Franco-Prussiana. Derrotado, fugiu com o que restava do seu exército para a Suíça. Aí, Bourbaki tentou, sem êxito, suicidar-se. No fim da guerra, tentou ingressar no parlamento, no que também falhou, tendo acabado por morrer, desiludido, em 1897. Em Dijon, terra natal de Jean Dieudonné, um dos fundadores do Bourbaki, há uma estátua sua.

Quando Nicholas Bourbaki surgiu pela primeira vez, Cartan insistiu em que Charles Bourbaki tinha uma irmã que se casou com um neto de Nicolas Vourbachi, e o seu filho recebeu o nome de Nicolas — um matemático incomparável que começou a escrever os seus artigos matemáticos nos anos trinta. Quaisquer sugestões, por parte de outros matemáticos, de que Nicolas Bourbaki não existia eram contrariadas com protestos veementes,

sob a forma de cartas dirigidas a todos os que se atrevessem a fazer tais acusações. Uma dessas pessoas foi o editor do *Mathematical Reviews*, um tal Mr. Boas. Bourbaki chegou mesmo a lançar o rumor de que era Boas quem não existia e que B.O.A.S. era apenas uma designação utilizada por um grupo de editores da *Reviews*. No fim da Segunda Guerra Mundial, no entanto, já a verdadeira identidade de Bourbaki era bem conhecida.

Bourbaki desenvolveu uma filosofia coerente da matemática, uma visão muito distante da perspetiva de Russell de que a matemática é equivalente à lógica. Criticando diretamente esta perspetiva, Bourbaki escreveu: "É uma verdade evidente, sem qualquer significado, dizer que este raciocínio dedutivo é um princípio unificador da matemática. Não é, com certeza, um comentário tão superficial que vai explicar a complexidade manifesta das diferentes teorias matemáticas, da mesma maneira que ninguém poderia, por exemplo, unificar a física e a biologia numa única ciência, baseando-se no facto de ambas fazerem uso do método experimental. O método do raciocínio por meio de cadeias silogísticas não passa de um mecanismo de transformação, tão aplicável a um certo conjunto de premissas como a outro, não podendo, portanto, ser usado para caracterizar essas premissas." Matemáticos no ativo, como Bourbaki, nunca cometeram o erro de confundir a matemática com o formalismo lógico.

Bourbaki tinha uma grande devoção pelo estudo de "estruturas" matemáticas na sua máxima generalidade abstrata — teoria dos conjuntos (tomada como uma base de toda a matemática), álgebra, topologia geral, funções de variável real, espaços topológicos vetoriais e integração são os assuntos dos seis primeiros volumes, a primeira parte do *Éléments*. O método principal de Bourbaki é a abstração — o processo de aumentar progressivamente a generalização, indo ao encontro dos princípios unificadores da matemática. As "estruturas" encontram-se nos axiomas, que são formalmente arbitrários, mas, como qualquer matemático sabe, estão, de facto, limitados pela capacidade de imaginação matemática que lhes irá dar conteúdo. Para Bourbaki, como para Hilbert, o papel dos axiomas não consiste em introduzir rigor (Hilbert comentava que "qualquer palerma" pode brincar com isso), mas sim em introduzir um enquadramento organizacional na

matemática. Os próprios críticos de Bourbaki concordam na perspetiva de distinção entre lógica e matemática. De certo modo, toda a preocupação com a lógica, os axiomas e as bases da matemática, iniciada com Frege, Russell e Gödel, pode agora ser vista como um imenso desvio — talvez um desvio necessário — em relação à verdadeira conduta da matemática. Os lógicos podem argumentar contra esta caracterização e insistir na importância crucial do seu trabalho para a matemática. Poderão perguntar como é que os matemáticos passarão por cima de algo tão fundamental como a lógica. Por exemplo, como é que a matemática evita os paradoxos e a inconsistência potencial? "Oh, é muito, muito fácil", responde Sam Eilenberg (um membro do Bourbaki). "Isso faz-se normalmente por *circunlocução*. Na teoria abstrata das categorias, é óbvio que não surgem nenhumas dificuldades de base, uma vez que uma categoria se define como uma estrutura matemática, como um grupo ou como qualquer coisa. Não há nenhum problema. O problema só surge quando se começam a dar exemplos de categorias. Então, se se formularem exemplos envolvendo *a* categoria de todos os grupos, é óbvio que se arranjam sarilhos. Agora o que é evidente é que não se olha para *a* categoria de todos os grupos; interessa é olhar para *uma* categoria de grupos, uma vez que, em cada questão particular, só ocorrerá uma família de grupos que irá gerar uma categoria; assim, se se estiver disposto a aceitar esta limitação, basta substituir a palavra 'a' pela palavra 'uma' e fica-se, de novo, numa situação perfeitamente legítima. [...] Há muitas maneiras de dar a volta."

A matemática, tal como é praticada, não é tanto uma disciplina lógica, mas mais uma ciência intuitiva. A maneira de pensar de um matemático no ativo assemelha-se à de um cientista empírico — usa os métodos que estão embutidos no sistema hipotético-dedutivo. Usando a sua intuição — aquilo a que Hilbert dava o nome de *Spürkraft*, o poder do pressentimento — os matemáticos conjeturam acerca das estruturas matemáticas. Aventurando-se no seio do território matemático, vão em busca de teoremas simples, unificadores, não triviais. Os resultados julgam-se pela distância a que chega a matemática, pela dificuldade do território e pela grandeza do troféu alcançado. Quando um grande problema é resolvido, desfruta-se, normalmente, de uma nova visão sobre territórios ainda

desconhecidos ou põe-se termo a um caminho para investigações futuras. A matemática, pelo que vemos da conduta do seu inquérito, assemelha-se extraordinariamente àquilo que chamámos de inquérito hipotético-dedutivo — uma combinação frutuosa de pensamento imaginativo e rigoroso. Como já argumentei a propósito das ideias das ciências naturais, as ideias da matemática sobrevivem graças à sua fertilidade e à sua resistência num ambiente de conceitos. Como qualquer ideia, participam num sistema seletivo. A abordagem do lógico à filosofia da matemática só cobre uma pequena fração do território da matemática moderna — e uma fração bastante estéril, diga-se de passagem. De certa maneira, não existe verdadeiramente uma filosofia contemporânea da matemática — um relato do que os matemáticos realmente fazem e de quais são os conceitos e temas marcantes da conduta do seu inquérito.

Como caracterizamos a matemática? Alguns dos próprios matemáticos sugeriram respostas, nenhuma das quais é, porém, inteiramente satisfatória. Descartes via a matemática como a ciência da ordem e das relações, tal como os Gregos antes dele. Leibniz desenvolveu a ideia de que a matemática explora a estrutura de todos os mundos possíveis (inclusive, esperamos, o nosso). Poincaré e Weyl viam a matemática como a ciência do infinito. Mais recentemente, deparam-se-nos novas definições de matemática — a ciência dos sistemas complexos ou a modelação da realidade em formas simbólicas ou de jogos.

O que a matemática (como todas estas definições) tem de peculiar é o facto de não existir um *ali* — uma realidade exterior. Embora a matemática possa ter origem na reflexão sobre o mundo sensorial, em última análise a sua vida reside na mente — o elo de ligação dos juízos puros sobre uma ordem lógica. A matemática, apesar da sua ligação à ciência empírica, é autónoma e deve ser criada por ela mesma. A ironia da matemática está em que, embora seja inteiramente um produto da mente humana, ganha uma vida própria, uma estrutura que transcende a experiência humana e que dela não depende. No caso das ciências empíricas, também assistimos a esse sentido de independência — mas aí podemos atribuí-lo à natureza, que é independente das nossas mentes. Na matemática não existe essa desculpa. Como é então possível a independência no domínio da matemática?

Para responder a isso, vamos recordar o modo como se inicia um sistema matemático. Postulam-se alguns axiomas e definições, como os axiomas e definições de Euclides. Os axiomas têm de ser mutuamente consistentes, simples, claros, gerais, e, o que é mais importante, devem conduzir a algo de interessante. No caso dos axiomas, o que se segue é toda a estrutura da geometria plana. Os axiomas da teoria dos números e da aritmética são igualmente férteis. A marca comum a todos estes sistemas axiomáticos é a sua surpreendente riqueza. Outros sistemas axiomáticos consistentes poderiam ser estéreis — não levarem a nada de interessante.

A própria matemática parece ser um exemplo de complexidade — complexidade lógica. A partir de algumas proposições lógicas — os axiomas —, que se aceitam como dados, emerge uma estrutura implicativa muito rica. Creio que é graças à complexidade possível, emergindo de um sistema lógico simples, que a matemática adquire a sua qualidade de autonomia e independência em relação à mente. Embora o seu ponto de partida seja bastante simples — um conjunto de axiomas facilmente dominàveis pela mente —, o inquérito abre-se sobre um domínio rico e complexo de proposições que parecem tomar vida própria, um cenário lógico muito vasto sobre o qual a imaginação humana pode pairar, mas que não pode ser abarcado como um todo pela mente. O domínio da matemática é semelhante a um autómato insimulável que funciona com base num punhado de regras muito simples.

O matemático israelita Michael Rabin caracterizou uma vez o domínio da matemática com a seguinte metáfora maravilhosa. Imagine-se que o conjunto de todas as proposições verdadeiras da matemática ocupava um espaço muito vasto — o espaço de todos os teoremas verdadeiros. Alguns desses teoremas foram demonstrados, um subconjunto muito pequeno de todos os teoremas verdadeiros, que podemos imaginar como uma linha fina e iluminada, uma cadeia iluminada donde saem alguns ramos que atravessam o espaço negro da escuridão. A parte escura deste espaço imenso é constituída por todos os teoremas verdadeiros que nunca demonstrámos e que provavelmente nunca serão demonstrados. A razão pela qual não podemos provar estes teoremas verdadeiros é que as demonstrações levam tanto tempo

a efetuar que mesmo o maior supercomputador, trabalhando durante todo o tempo de vida do universo, não poderia chegar a uma demonstração. Demoram uma quantidade de tempo tão grande, mas finita, que nunca poderemos chegar a saber se os teoremas são verdadeiros. Outros teoremas "verdadeiros" poderão exigir um tempo de computação infinito — estes são os teoremas que são indecidíveis dentro de um sistema axiomático específico. A linha brilhante mostra-nos os teoremas verdadeiros e demonstráveis, aqueles que não exigem tanto tempo, aqueles que um matemático engenhoso pode descobrir, com a sua capacidade humana.

A perspetiva computacional da matemática, à qual a metáfora de Rabin apela, não é nova, mas a sua influência tem vindo a aumentar desde há várias décadas. Que é esta perspetiva computacional? Gosto de a caracterizar com a expressão "a mecanização da matemática". De acordo com esta perspetiva, não faz sentido falar das entidades matemáticas sem dizer como é que elas podem ser calculadas — como fazer sair demonstrações de um calculador mecânico. O domínio da matemática é idêntico ao domínio do calculável. Como pode a matemática, que apela a um domínio transcendental de conceitos puros, ser reduzida a maquinaria — uma manipulação de símbolos? Vamos examinar como é que isso é feito ou, se não puder ser feito, por que o não pode.

A questão de saber como a matemática é possível é, curiosamente, semelhante à questão de saber como a linguagem é possível. Tanto a matemática como a linguagem são produtos da mente humana, suportados pelo cérebro humano. Não creio que a questão de conhecer o modo como a mente o faz — pensa em conjuntos infinitos — e o faz tão rigorosamente será respondida enquanto não alargarmos muito o nosso conhecimento do funcionamento do cérebro humano. A matemática, apesar de todo o seu carácter transcendental, é, em última análise, a consequência de um órgão material, o cérebro. Talvez a matemática, enquanto a vemos como uma ciência universal, seja, na realidade, bastante particular, uma consequência da nossa estrutura cerebral específica e da sua evolução característica neste planeta. Ser-nos-á possível criar mentes artificiais que possam ver a matemática de uma forma muito diferente e construir um

universo distinto de objetos matemáticos? Ou serão todas as mentes, artificiais ou naturais, constrangidas pelas leis materiais deste universo a alcançar basicamente as mesmas estruturas lógicas e matemáticas? Nesta altura, ainda se desconhece a resposta a estas questões; e, o que é mais, não se consegue a maneira de se chegar a uma resposta. Mas o facto de colocarmos estas questões realça a perspetiva computacional da matemática — a matemática acaba por ser a capacidade computacional da estrutura material que a produz.

Os computadores tiveram um impacto significativo na forma como a matemática é vista. Os computadores digitais executam operações discretas, são máquinas finitas (aqui não há ilusões quanto à mente infinita). Os matemáticos não usam os computadores por estas máquinas serem especialmente "espertas", mas devido ao seu poder e velocidade de cálculo superiores. Os matemáticos usam-nos especialmente por serem dispositivos mecânicos estúpidos, nos quais têm absoluta confiança — os computadores farão exatamente aquilo para que foram programados. Se um matemático quiser verificar se os dez algarismos estão igualmente distribuídos nos primeiros 143 milhões de dígitos da expansão decimal de π, um computador será a única solução viável para o fazer (eles *estão* igualmente distribuídos). Os computadores podem ser usados na modelação de equações matemáticas, em processos estocásticos (processos que dependem das leis do acaso) e como auxiliares na construção de demonstrações complexas, como Haken e Appel fizeram na demonstração do mapa das quatro cores. Aqui há umas três décadas, Hao Wang, um lógico, meu colega na Universidade de Rockefeller, usou um computador para provar muitos dos teoremas, inclusive todos os teoremas da lógica elementar, dos *Principia Mathematica* de Russell e Whitehead, uma primeira demonstração de que os computadores podiam provar teoremas da lógica. Achei piada saber que as despesas com "equipamento" constituem agora 8% do orçamento de apoio à investigação matemática da Fundação Nacional de Ciência. Há uns anos atrás, ninguém poderia imaginar para que é que os matemáticos quereriam "equipamento". Os computadores faziam parte do reportório da matemática e estão entre nós para ficar. Fornecem-nos uma imagem do raciocínio, por mecanizada que seja, que nos permite observar o que se passa.

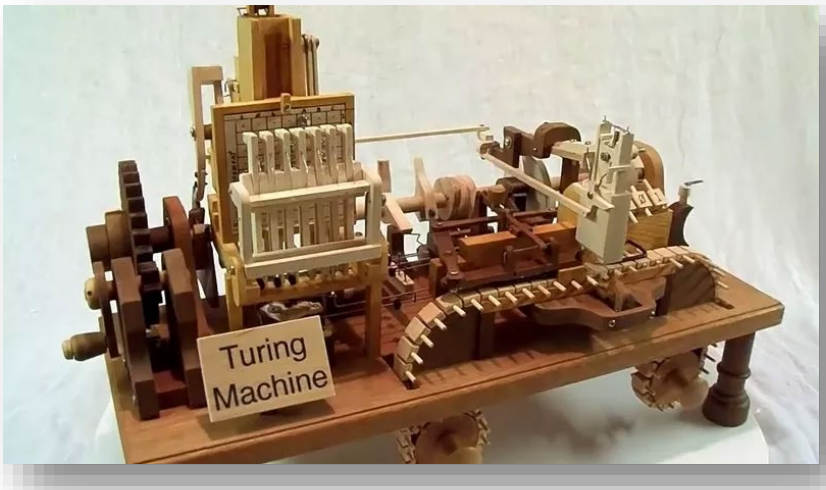
Sendo os computadores dispositivos digitais, finitos, influenciam proporcionalmente a maneira como vemos a matemática. O computador não pode lidar diretamente com a infinidade de pontos de uma reta ou de uma curva. Em vez disso, corta a curva em vários segmentos discretos que, para os fins da análise numérica, são uma boa aproximação à curva. O mundo matemático do computador é discreto, e não contínuo. Contudo, o computador pode *tratar* o contínuo da mesma maneira que nós — com uma série de passos lógicos discretos representados por uma manipulação simbólica. Por exemplo, pode-se usar um programa de computador para encontrar soluções exatas, e não numéricas, de equações diferenciais e integrais, quando essas equações admitem solução em termos de funções simples conhecidas. Basta programar o computador para usar as propriedades conhecidas das funções contínuas, de uma maneira lógica. Em princípio, parece, os computadores podem fazer aquilo que nós podemos. Na prática, ainda têm muito que andar.

Não existe nenhum substituto programável para a atividade da imaginação matemática — pelo menos num futuro próximo. Os computadores não podem efetuar conjeturas "intuitivas" (pelo menos da maneira como nós as efetuamos), e não vão muito longe no reconhecimento de padrões conceptuais globais. Neste aspeto, os computadores não afloram ainda sequer as capacidades humanas; não passam de ferramentas intelectuais. Um dia, verdadeiras mentes artificiais poderão começar, elas próprias, a explorar o mundo da matemática. Poderão desenvolver a sua "intuição" de inteiros até à ordem dos biliões ou de espaços de muito alta dimensionalidade da mesma maneira que nós temos intuição dos primeiros inteiros e do espaço tridimensional. Essas máquinas poderão descobrir coisas que poderemos apreciar, mas que nunca poderíamos ter imaginado.

Por muito poderosos que os computadores se tornem ou por muito longe que eles cheguem, simulando as capacidades da mente humana, serão sempre artefatos materiais, sujeitos às leis da natureza. Neste sentido, a mente mais poderosa do raciocínio lógico e matemático estará sujeita às limitações materiais do universo. No início dos anos sessenta, Rolf Landauer, dos Laboratórios da IBM, seguindo na esteira de Von Neumann, começou a explorar as limitações fundamentais da computação (e

essas limitações *existem*). É uma situação curiosa, pois a nossa compreensão dessas limitações materiais é, ela própria, expressa e entendida em função de raciocínios lógicos e matemáticos, abrangendo uma realimentação de autorreferência. A manipulação lógica de símbolos deve obedecer às leis da natureza; as leis da natureza são expressas por símbolos lógicos. A relação entre o mundo transcendental da mente e o mundo natural da matéria é semelhante à *uroboros* — a cobra que se devora a si mesma.

Gostaria de dar pelo menos um exemplo da interação entre o mundo material e o mundo dos conceitos matemáticos. A noção de computabilidade é especificada usando máquinas de Turing, dispositivos que descrevi anteriormente. Normalmente, as máquinas de Turing são "*Gedanken*" — máquinas idealizadas e não reais. Mas, se realmente queremos falar de computadores a trabalharem com a lógica, devemos considerar máquinas de Turing verdadeiras e imaginar a sua construção. Uma máquina de Turing trabalha de acordo com as leis da física clássica — podemos imaginar uma máquina feita de rodas dentadas e eixos, atravessada por uma fita de papel. Podíamos até dar-nos ao luxo de a tornar eletrónica, mas isso não faz com que deixe de operar de acordo com a física clássica.



A Máquina de Turing é um dispositivo teórico conhecido como máquina universal, que foi concebido pelo matemático britânico Alan Turing, muitos anos antes de existirem os modernos computadores digitais.

Há muitos anos decidi conceber uma máquina de Turing quântica. O meu propósito ao fazê-lo era conceber uma antimáquina de Turing, um computador que *não* pudesse ser

reduzido a uma simples máquina de Turing, pela mesma razão que a mecânica quântica não pode ser reduzida à mecânica clássica. Para o conseguir, é necessário usar uma característica essencial da mecânica quântica na conceção do computador. É fácil fazê-lo, usando as correlações de longo alcance entre os estados quânticos. Imagine-se uma fonte de fotões (*quanta* luminosos) que emite pares de fotões com *spins* correlacionados, em direções opostas. Estes pares de fotões são então detetados em duas estações diferentes depois de passarem por polarizadores. O padrão de fotões detetados — se eles atravessaram ou não o polarizador — pode ser representado como uma sequência aleatória de 0's e 1's (0=não detetado, 1=detetado). As duas sequências de 0's e 1's em cada estação, cada uma delas aleatória, estão relacionadas de maneira não aleatória. Além disso, essa correlação não pode ser explicada pelas leis da física clássica; é intrinsecamente quântica. Estas sequências aleatórias podem ser usadas como entrada de dados parcial de duas máquinas de Turing normais, uma em cada estação, e essas máquinas usariam as entradas de dados nalguma computação. Agora, todo o dispositivo, que engloba as duas máquinas de Turing, pode ser visto como um único computador. Este computador *não* pode ser reduzido a uma máquina de Turing universal, pela simples razão de que as correlações da mecânica quântica não podem ser explicadas pela mecânica clássica.

Embora tivesse há já muito tempo a noção de uma antimáquina de Turing (desde então muita gente propôs máquinas semelhantes), não conseguia encontrar um problema que esta máquina nova pudesse resolver. Na II Conferência da Ilha de Shelter, em 1985, estive com Richard Feynman, um colega de física que sabia estar interessado em problemas fundamentais de computação. O seu interesse surgira-lhe, em parte, de discussões que tivera com Ed Fredkin, um cientista de computadores. Expliquei a Feynman o meu problema de não conseguir encontrar um problema adequado que o "computador quântico" pudesse resolver, um problema que não pudesse ser executado numa máquina de Turing corrente. Respondeu-me de imediato: "Pode simular as correlações da mecânica quântica. Nenhum computador corrente o pode fazer!" Ele tinha razão, como é evidente. Todavia, eu pretendia um problema lógico, não uma simulação.

A dificuldade está em que a máquina de Turing *define* o que chamamos "computável" e "decidível". Os problemas matemáticos correntes são feitos de modo a serem computáveis. Assim, para encontrarmos problemas que o "computador quântico" possa resolver e uma máquina de Turing não, temos de alterar aquilo que consideramos como fazendo parte do território da matemática. Isso é quase como ver um "ovo a pôr uma galinha". De qualquer das formas, este exemplo ilustra bem que o que se considera como matematicamente computável depende do computador, e este, por seu turno, depende das verdadeiras leis materiais da natureza. Existem, provavelmente, muitos tipos diferentes de anticomputadores de Turing e a sua função é dar um novo sentido à ideia de computação e de matemática.

Poderá o cérebro humano ser simulado por uma máquina de Turing? Se as correlações quânticas desempenharem um papel fundamental na rede neurónica (e não há nenhuns factos que apontem nesse sentido), então o cérebro não poderá ser simulado por uma máquina de Turing corrente. Suponhamos, no entanto, que o essencial do funcionamento do cérebro é descrito corretamente com base na física clássica. É possível que o caos determinístico desempenhe um papel na mecânica do cérebro. Ainda assim, uma máquina de Turing poderia simular o movimento de cada átomo do cérebro. Mas nessa altura, ainda que usássemos o maior supercomputador do mundo (equivalente a uma máquina de Turing), a simulação de um milissegundo da operação do cérebro poderia demorar milhares de anos. Não é um procedimento praticável.

Algumas pessoas sugerem que o comportamento inteligente do cérebro pode ser simulado por computadores de Turing, mas não querem dizer que o estado físico exato do cérebro é simulado. De facto, estão-se nas tintas para o cérebro. Em vez disso, a simulação que sugerem tem lugar a um nível muito mais alto, ao nível dos conceitos e dos símbolos. Este problema da simulação, no entanto, não é muito bem definido, pois os conceitos e os símbolos não são muito bem definidos fora do seu contexto, que é o mundo inteiro. Não está nada claro como ou se é possível programar um computador para realizar essa simulação. Assim, a questão de saber se o cérebro pode ser simulado numa máquina de Turing depende, em primeiro lugar, de se saber se o

funcionamento do cérebro é essencialmente quântico ou não. Caso não o seja, pode, em princípio, ser simulado; na prática trata-se de uma tarefa virtualmente impossível.

Os feitos da matemática são extraordinários, estendendo-se desde as suas origens religiosas, há milénios atrás, até à sua formulação abstrata e universal de hoje. Como componente poderosa da cultura humana, prolongar-se-á por um futuro distante e irá, sem dúvida, surpreender-nos ainda mais. Podemos estar apenas no início da nossa exploração e novos mundos e universos matemáticos aguardam a nossa descoberta. Não se avista o final desta aventura da mente humana.

Parece evidente que os mistérios profundos de "onde" e "como" os objetos matemáticos existem e da natureza do pensamento estão ainda encerrados no segredo da mente e não se avizinha a sua revelação. O mistério faz parte do problema geral da representação material do conhecimento, do ser e do pensamento. Se ganhámos alguma coisa neste século foi confiança na crença de que uma ordem transcendente da realidade (como os objetos matemáticos) pode ser pensada produtivamente com base na sua representação material e de processos físicos reais. E, da mesma maneira, a ordem material do universo só pode ser expressa racionalmente apelando a conceitos transcendentais, muitos dos quais provenientes da matemática e da lógica. As perspetivas transcendental e natural são duas representações complementares de uma realidade unitária, cuja expressão integral é ainda elusiva, uma vez que as próprias categorias dos nossos pensamento e linguagem não a podem ainda acomodar. Só através de uma transformação da estrutura categórica da nossa experiência, uma transformação moldada pelas descobertas das ciências empíricas e por um conhecimento mais profundo da mente, se poderá atingir essa acomodação, se ela é de todo possível. Creio que uma parte da resposta será que temos vindo a colocar as questões erradas, fazendo uma falsa distinção entre os mundos transcendental e natural. Mas a descoberta de que *essa* é a resposta será o grande feito. E quando esse dia chegar, a nossa civilização será transformada.

CAPÍTULO 13

– OS INSTRUMENTOS DA CRIAÇÃO –

Dêem-me uma alavanca e um ponto de apoio que eu levantarei o mundo.

ARQUIMEDES

Quando tinha doze anos costumava construir pequenos recetores de galena, versões primitivas do rádio. Todos os componentes, os fios, as resistências e até a galena e os bigodes de gato (um fio especial usado para sondar a superfície da galena) podiam ser comprados na loja de ferragens lá da terra. Enrolava cuidadosamente o fio em torno do rolo central que sobrava do papel higiénico e fazia uma bobina de indução. Soldava o fio e, com muito cuidado, estabelecia as ligações em cima de uma tábua de cortar pão. A antena, uma componente muito importante do sistema, estendia-se por mais de trinta metros, desde a janela do segundo andar da minha casa até uma árvore no jardim de um vizinho. A ligação de terra, parte de um sistema de pára-raios, ia por baixo da parede lateral da minha casa até uma vara de aço enterrada num sítio profundo do meu jardim. Ia entendendo a maneira como o recetor funcionava, imaginando um fluído de eletricidade que era posto a vibrar na antena pela onda radiofónica recebida e depois a galena, a bobina e um condensador selecionavam as vibrações certas porque filtravam ondas. Mas espantava-me sempre quando, ao colocar os auscultadores, conseguia ouvir as estações de rádio locais. O mundo da rádio abriu-se, juntando apenas partes elementares, como quem junta as peças de um puzzle. Especulei sobre os outros dispositivos incríveis que poderiam ser feitos a partir de componentes simples se soubéssemos como os construir. A galena não tinha uma grande seletividade; mas a satisfação de ter sido eu a construí-la era imensa.

Mais tarde, com o auxílio de um operador de rádio local, que morava ao fundo da minha rua, construí um recetor de ondas curtas. Comprei os componentes em lojas de eletrónica de Filadélfia, com dinheiro que ganhara em empregos ocasionais, sobretudo a cortar a relva aos vizinhos. Cada subsistema do

recetor foi testado independentemente, e assim, quando finalmente ficou completo, funcionou tudo logo à primeira. Lembro-me de escutar estações de rádio europeias e africanas. Nunca deixou de me espantar que uma coisa que eu construí a partir de elementos isolados pudesse ir buscar informação ao outro lado do oceano. Ainda hoje sinto espanto ao ver a rádio e a televisão funcionarem.

Recordei a minha experiência como construtor de rádios, anos mais tarde, quando eu e a minha mulher participámos, com alguns amigos, num safari no deserto de Issiolo, no Norte do Quénia. Um dos meus amigos, gerente de um casino e caçador, abateu um búfalo da água que tinha andado a pilhar algumas aldeias locais. Vi dois *morrans* (guerreiros) Samburu-Massai, ainda adolescentes, a dissecar o animal que tinha acabado de ser abatido. Os dois adolescentes sabiam para que é que servia cada uma das partes do búfalo e guardavam com muito cuidado tudo aquilo de que necessitavam. A sua capacidade de apreensão de pormenores interiores era fantástica. Estavam tão à vontade com o interior dos animais como eu com o interior dos rádios.

Umas semanas depois da viagem a Issiolo, andava eu a vaguear por umas ruelas de Nairobi (adoro conhecer os recantos das cidades), quando se me depararam umas lojas de consertos. Vi lá alguns nativos Kikuyu, a uma ou duas gerações de distância dos seus antepassados caçadores e pastores, que trabalhavam com afinco na reparação de sistemas de ar condicionado, frigoríficos, automóveis, rádios — o equipamento de uma cidade moderna. Esta indústria local e o entusiasmo e o cuidado evidenciados pelos trabalhadores impressionaram-me. Os mesmos talentos dos caçadores que eu vira anteriormente, a capacidade da mente de organizar e categorizar o mundo à sua volta, eram agora aqui revelados por estes trabalhadores. Nesse dia, mais tarde, estive reunido com um grupo de pessoas e falámos sobre educação e novas tecnologias em África e sobre a maneira de acelerar o desenvolvimento. Um africano exprimiu a opinião de que eram necessários computadores, especialmente como auxiliares de educação. Perguntei se alguém sabia o que estava *dentro* de um computador — como é que eles funcionavam, não em pormenor, mas apenas em termos de algumas ideias gerais. Ninguém sabia; e, ainda mais, ninguém achava que isso fosse

importante. Discordei. Continuei, dizendo que o futuro de nações subdesenvolvidas, como em África, passava mais pela expansão de infraestruturas tecnológicas — aquilo que eu encontrei nos cantos perdidos de Nairobi — do que por tentar queimar etapas em relação aos países industrializados, introduzindo altas tecnologias inapropriadas. É preciso saber como é que as coisas funcionam "a partir de baixo". De outra forma, o funcionamento das coisas é entendido como uma espécie de magia, sendo provável que vá encorajar um pensamento místico acerca do mundo (como acontece nos países industrializados). Dando à sua população uma educação que possibilitou um domínio da tecnologia a partir de baixo, os Japoneses, que descobriram que a tecnologia da imitação barata só é válida até um certo ponto, conseguiram atingir uma posição de supremacia em vários mercados mundiais. Em nenhum domínio do empreendimento humano existe um substituto para uma compreensão "a partir de baixo".

Fui confrontado com esta capacidade de "partir de baixo" quando era aluno de pós-graduação na Universidade de Stanford. Muitos dos físicos daquela universidade estavam, na altura, a construir o primeiro acelerador linear gigante — um monstro com três quilómetros de comprimento que iria custar 125 milhões de dólares. Eletrões de alta energia iriam ser acelerados ao longo de um tubo de vácuo muito comprido, para colidirem depois com alvos nucleares. Nunca nada deste tipo, ou desta magnitude, havia sido tentado, tratando-se, por isso, de um projeto arriscado.

Certo dia, os cientistas encarregados do projeto defrontaram-se com um grande problema. A partir de uma certa energia, descobriram uma nova instabilidade imprevista, que perturbava o feixe de eletrões de alta energia. Se esta instabilidade não fosse eliminada, todo o projeto poderia ser posto em causa. Wolfgang Panofsky, o físico que dirigia o projeto, suspendeu imediatamente as suas funções administrativas e pôs-se em ação. Organizou pessoalmente uma equipa de especialistas encarregue de estudar o problema e de construir novos equipamentos de verificação. Não era apenas um administrador que dava ordens, era também um trabalhador que sabia como descer aos pormenores. Lembro-me de o ver uma vez, já muito depois da meia-noite, na casa das máquinas, trabalhando com o torno, fabricando à mão o

equipamento de verificação. (Quantos responsáveis pela grande indústria de alta tecnologia estariam dispostos a fazer o mesmo, numa situação de crise? Muitos dos melhores, normalmente os pioneiros, estariam.) Ao fim de umas duas semanas, Panofsky e a sua equipa resolveram o problema da instabilidade. Só depois de se certificar de que não haveria mais problemas é que ele voltou ao seu cargo administrativo. Conhecia aquela máquina tão complexa a partir de baixo. Este incidente fez-me refletir sobre as minhas capacidades. Eu era um físico teórico, mas mesmo assim sabia trabalhar com um torno.

A abordagem de "mangas arregaçadas" é a chave do sucesso na ciência moderna; as pessoas que não querem sujar as mãos não têm lugar nas ciências. Certa vez, levava eu um retroprojetor para uma sala de conferências, onde iria ser usado pelo conferencista dessa tarde, quando um colega meu, de ascendência asiática nobre e distinta, me viu e perguntou por que razão levava eu o projetor. Respondi que, uma vez que eu nesse ano era o responsável pelos seminários, tinha de fornecer aos conferencistas o equipamento necessário. O meu colega pareceu preocupado. Depois disse-me que, sendo ele o responsável pelos seminários no ano seguinte, teria de arranjar um secretário para levar o retroprojetor; ele próprio recusava-se a fazê-lo. Respondi-lhe logo: "Essa, meu velho, é uma boa razão por que a ciência moderna surgiu no Ocidente e não no Oriente." Percebeu imediatamente o que quis dizer e, no ano seguinte, vi-o, bem à vista de toda a gente, a carregar o retroprojetor, sem se queixar.

Como se poderá induzir da minha apologia do trabalho de "mangas arregaçadas" e do conhecimento de máquinas e equipamento "a partir de baixo", sinto-me perturbado pela tendência de alguns pedagogos em promover uma abordagem "a partir de cima", que pode ter como resultado a perda do sentido da base material da existência. Isto só pode ajudar a criar uma classe de pessoas que, mesmo ao operar e gerir o equipamento tecnológico complexo da nossa sociedade, mantêm crenças místicas acerca do seu verdadeiro funcionamento.

As descobertas que transformam a nossa forma de viver são feitas por pessoas que regressam à própria natureza das coisas, se deixam imergir nos pormenores materiais da existência e as

veem de um novo ângulo. Como Sócrates observou, o verdadeiro conhecimento surge da rua ou, neste caso, das bancadas de trabalho e das oficinas. O resto da atividade técnica é uma espécie de jogo de confiança intelectual, normalmente com consequências económicas e sociais, que é disputado com a credulidade humana.

Deus reside nos pormenores da existência. E qualquer pessoa que se recuse a olhar para eles tem toda a probabilidade de vir a adorar ídolos. Mas como chegar aos pormenores da existência? Como poderemos observar o que se passa? A resposta a estas questões está na instrumentação — as ferramentas que criamos e que, por seu turno, criam o nosso mundo. Em certa medida, mais do que a maioria das pessoas imagina, os nossos instrumentos e métodos experimentais revelaram o mundo da ciência moderna. A natureza é hoje uma realidade apreendida instrumentalmente na qual pontos cruciais da observação estão ligados pela teia da teoria. Há já muito tempo, Arquimedes dizia: "Dêem-me uma alavanca e um ponto de apoio que eu levantarei o mundo." Se a alavanca for suficientemente comprida, se existir um ponto de apoio e um local apropriado, pode-se, realmente, levantar o mundo.

São os nossos instrumentos, as extensões artificiais dos nossos vários sentidos e da nossa mente, que nos conduzem a um mundo novo. As ideias teóricas surgem na sequência dos instrumentos e das experiências; e estas ideias teóricas, por seu turno, levam à criação de novos instrumentos. Bastarão alguns exemplos para ilustrar o meu raciocínio — a história da ciência é tanto a história da instrumentação como a história das ideias teóricas.

Pode não ter sido Galileu quem construiu o primeiro telescópio, mas esteve entre os primeiros a usá-lo para fazer uma exploração meticulosa dos céus. Também o usou como instrumento para melhorar a proteção de que desfrutava, especialmente por parte dos Médicis. Galileu viu coisas que nenhum ser humano tinha visto antes — os satélites de Júpiter, as fases de Vénus, montanhas lunares — e concluiu que o universo era muito diferente da cosmologia ptolemaica prevalecente, apoiada pela Igreja, estando mais de acordo com a perspetiva de Copérnico. As suas dificuldades com as autoridades religiosas de

Roma contribuíram para que a revolução científica migrasse para norte, onde se estabeleceu firmemente. Posteriormente, outras pessoas começaram a construir telescópios mais aperfeiçoados, com o objetivo expresso de observar o firmamento. Era o nascimento da óptica ao serviço da astronomia. Isaac Newton desenvolveu o telescópio refletor — um dispositivo que usava um espelho curvo, em lugar de uma lente, com elemento focal e que foi uma antecipação dos primeiros grandes telescópios construídos, séculos mais tarde, em Mount Wilson e Mount Palomar, nos Estados Unidos.

A história da astronomia pode ser traçada estudando os instrumentos astronómicos e os seus aperfeiçoamentos. O telescópio refletor de quinze polegadas, de William Herschel, construído no início da década de 1870 — um instrumento excecional, no seu tempo —, levou os seus olhos a observar pela primeira vez, o universo dinâmico complexo que hoje conhecemos. Durante o século XIX, foram adicionados dispositivos cronométricos precisos ao suporte do telescópio, por forma a compensar a rotação da Terra, a fotografia foi introduzida e o espectro de emissão das estrelas revelado, abrindo o caminho para a astrofísica e para o estudo da química das estrelas. Era também evidente, no final do século, que os telescópios de refração, que usavam lentes de grandes dimensões, tinham chegado a um limite prático de dimensão. Ao construir os primeiros grandes telescópios refletores, a astronomia americana ultrapassou a europeia e o centro de gravidade científico deslocou-se para oeste.

Quer a primeira quer a segunda guerras mundiais constituíram um estímulo para o desenvolvimento de novos instrumentos — um reaproveitamento de aplicações militares. O uso de filmes fotográficos com emulsões de qualidade, a tecnologia óptica, o desenvolvimento de radiotelescópios a partir do radar e os foguetões para colocação de equipamento astronómico em órbita são tudo exemplos deste reaproveitamento. Não houve nenhuma grande descoberta astronómica que não tivesse sido precedida por um novo instrumento ou técnica. Hoje o universo é perscrutado em todo o espectro eletromagnético — luz visível, infravermelhos, raios X, raios gama, ondas de rádio e radiação de micro-ondas. Entre os satélites que orbitam a Terra, em breve estará o

telescópio espacial, um dispositivo que, não sofrendo os efeitos de atenuação da atmosfera terrestre, poderá observar o universo com uma profundidade dez vezes maior do que até agora se consegue. Quem poderá imaginar o que iremos observar? Não é sequer possível imaginar a ideia que teríamos do universo se não existissem estes instrumentos e estivéssemos sempre limitados a usar o olho nu. E é provável que, em comparação com instrumentos futuros, os nossos instrumentos sejam virtualmente "cegos".

Enquanto o telescópio e os seus sucessores exploravam o macrocosmo, um outro acontecimento tinha lugar — a exploração do microcosmo. Fazendo uso dos mesmos princípios de combinação de lentes já desenvolvidos para os telescópios, foram criados os microscópios. Anton van Leeuwenhoek, o intendente-mor da Câmara Municipal de Guelf, na Holanda, construiu os melhores microscópios no seu tempo, com um alto poder de resolução. Com eles observava tudo, particularmente substâncias orgânicas — sangue, depósitos nos dentes dos camponeses, excrementos —, e foi o primeiro a observar uns "animaizinhos" chamados bactérias. Quando comunicou os seus resultados à Royal Society em Londres, as suas cartas foram recebidas com descrença, mas em breve se tornou evidente que tinha sido aberta uma nova janela sobre o microcosmo orgânico. Os seus métodos foram seguidos por outras pessoas. Um poderoso instrumento caíra nas mãos dos cientistas, que começaram a revelar o fundamento material dos processos biológicos.

Os séculos seguintes assistiram a grandes aperfeiçoamentos dos microscópios e melhoramentos dos seus poderes de resolução e contraste. A introdução de técnicas fotográficas permitiu criar registos permanentes e exatos das observações. O microscópio de variação de fase, que veio melhorar enormemente a capacidade de encontrar distinções entre tecidos quase transparentes, constituiu um grande avanço. Mas a maior alteração partiu de um desenvolvimento inteiramente novo, ocorrido nos anos trinta — o microscópio eletrónico. Usando as propriedades ondulatórias dos eletrões, que têm comprimento de onda muito mais curto, e os campos magnéticos como lentes, um novo mundo microscópico — o interior pormenorizado das células — podia ser visto graças a esse microscópio revolucionário. Os biólogos serviram-se do novo

instrumento para explorar o microcosmo vivo e de outros instrumentos e técnicas — difração de raios X, marcadores radioativos, espectroscópios de massa, infravermelhos e micro-ondas — para efetuarem uma análise química e molecular pormenorizada e revelar a presença de grandes moléculas orgânicas. Os físicos, entretanto, construíam "microscópios de matéria" — aceleradores de alta energia. Estas máquinas gigantescas surgiram no final da Segunda Guerra Mundial, tendo sido utilizados, durante as décadas que se seguiram, para explorar o mundo para além do núcleo atómico. Acabaram por chegar ao nível do *quark* — o constituinte dos protões e dos neutrões.

Normalmente, os novos instrumentos surgem nas mãos dos cientistas que os concebem para os seus próprios trabalhos. Se o instrumento se revela especialmente útil e tem aplicação comercial, alguma companhia acaba por se interessar e por o adotar. O percurso desde o laboratório até ao mercado pode demorar desde alguns anos até, em certos casos, algumas décadas. A chave deste desenvolvimento reside na possibilidade de utilização do instrumento por não especialistas e na existência de um mercado que se interesse pelo aparelho. A disponibilidade comercial de aparelhos científicos de precisão em quantidades apreciáveis é um dos pilares de suporte da ciência e tecnologia modernas.

Hoje o microscópio de efeito de túnel já é capaz de "observar" átomos individuais. Um microscópio de efeito de túnel consiste numa agulha extremamente fina que é delicadamente suspensa sobre a amostra a observar, roçando a ponta da agulha praticamente a superfície da amostra. É então aplicada uma tensão entre a agulha e a amostra. De acordo com a física clássica, não passaria nenhuma corrente entre a agulha e a superfície da amostra, uma vez que a agulha não chega a tocar na superfície. Contudo, a física quântica prevê que os eletrões possam, de facto, "cavar um túnel" através do espaço que separa a agulha da superfície e produzir uma corrente elétrica mensurável. A quantidade de corrente que passará então é extremamente sensível à distância entre a agulha e a amostra. Tão sensível, de facto, que se a agulha for deslocada ao longo da amostra as irregularidades da superfície produzidas pelos átomos individuais podem ser detetadas por uma maior ou menor

corrente na agulha. Foi um longo caminho percorrido desde há oitenta anos, altura em que muitos físicos e químicos ainda não acreditavam na existência de átomos.

Em certos casos, o instrumento lógico ou material que contribui para o avanço da ciência já não é tão evidente. Um exemplo é a criação da teoria da seleção natural, de Darwin — sem dúvida uma mudança radical na maneira como os cientistas, e a maioria das pessoas, imaginavam a origem da vida. Darwin pode ser considerado o maior sintetizador do pensamento sobre organismos vivos desde Aristóteles. Qual foi o seu instrumento? Com certeza que usou o microscópio, estava familiarizado com os instrumentos de que os naturalistas dispunham na altura. Contudo, esses instrumentos não foram cruciais para a sua descoberta.

O instrumento de Darwin foi o *Beagle*, o navio com o qual navegou à volta do mundo, durante cinco anos, recolhendo espécimes. Já existiam barcos anteriormente. Contudo, esta combinação do homem com o seu instrumento deu origem a uma nova visão da vida no nosso planeta que antes nunca tinha sido possível. Aquilo que Darwin observou durante a sua viagem no *Beagle* moldou o seu pensamento e ajudou-o a desenvolver a sua perspetiva sobre a evolução da vida.

Para apoiar este argumento — de que o navio era o instrumento de Darwin — sugiro a leitura de um artigo de Stephen Jay Gould sobre a viagem de Louis Agassiz, um influente naturalista e cientista norte-americano do século XIX. Agassiz era um criacionista e pensava que Darwin estava completamente errado. Então decidiu, já bastante idoso, seguir as passadas de Darwin, refazendo a viagem de Darwin à América do Sul e às ilhas dos Galápagos, na esperança de demonstrar que Darwin estava errado. Embora nunca tenha publicado um relatório pormenorizado da sua viagem, o que ele lá viu deve ter sido muito perturbador para um homem com os conhecimentos e com a fé de Agassiz; uma coisa é certa, não voltou a contestar as hipóteses de Darwin. Ao contrário do cardeal que, segundo reza a história, se recusou a olhar através do telescópio de Galileu, Agassiz "olhou" realmente através do instrumento de Darwin. E aquilo que viu deve-o ter abalado.

Hoje em dia dispomos de naves que viajam até outros planetas, radiotelescópios, aceleradores de alta energia, microscópios eletrónicos, máquinas capazes de efetuar análises bioquímicas a moléculas complexas, computadores, um rol de novos e poderosos instrumentos. São estes instrumentos que criam o moderno mundo da ciência, tornando-o irreconhecível com as transformações que introduzem. Produzimos os instrumentos e, em seguida, eles produzem-nos a nós, alterando as nossas perceções e a nossa imagem de nós mesmos.

Embora acredite que a origem de muitas grandes descobertas científicas possa ser procurada na introdução de uma nova técnica ou na utilização de uma técnica antiga de uma nova maneira, é evidente que as coisas nem sempre se passam tão linearmente, e seria tolice insistir neste ponto de vista. A tecnologia não existe num espaço culturalmente vazio; tem de estar apoiada na cultura. É costume dizer-se que as descobertas acidentais privilegiam as mentes que para eles estão preparadas — e não há dúvida de que é a cultura quem prepara a mente. Mas não colocar depois os instrumentos à disposição dessa mente é uma garantia de fracasso científico — os instrumentos são uma condição necessária, ainda que não suficiente, para a descoberta.

Esta perspetiva de que os instrumentos materiais são cruciais para a criação da ciência não é nova, embora, na minha opinião, os cientistas e os filósofos não lhe deem o devido realce. O que eles realçam é o *pensamento* envolvido numa descoberta. Os instrumentos, e um pouco os criadores desses instrumentos, mantêm-se apagados, e toda a atenção dos intelectuais se vira para os pensadores. Esta atitude deveria ser modificada; é um vestígio da cultura clássica que privilegiava o pensamento e a escrita em lugar da realização e da produção.

Também penso que as pessoas têm uma conceção demasiadamente estreita do que é a instrumentação. Quando pensamos em instrumentos, pensamos em microscópios, telescópios, dispositivos eletrónicos de medição — artifícios materiais. No entanto, também se concebem "instrumentos cognitivos", especialmente técnicas matemáticas, que podem ser usados pela mente humana como ferramentas que ajudem a promover a descoberta. Um exemplo seria a invenção, no século

XIX, da geometria riemanniana dos espaços curvos, que nas mãos de Einstein se transformou no instrumento cognitivo com o qual criou a sua teoria de relatividade geral. Newton teve de criar o cálculo como a linguagem apropriada para exprimir as suas leis da mecânica. Da mesma maneira, os físicos apropriaram-se da matemática das probabilidades quando sentiram necessidade de desenvolver a mecânica estatística.

Um outro exemplo, mais recente, de um instrumento cognitivo é o *software* inovador. Algoritmos matemáticos novos e poderosos, que permitem aos cientistas usar os computadores de forma mais eficiente e resolver problemas anteriormente intratáveis, são um exemplo de instrumentos cognitivos usados no *software*. A posse de um programa com capacidades analíticas únicas confere ao cientista uma vantagem tão grande para a realização de novas descobertas como a posse de um telescópio poderoso. Estes instrumentos cognitivos situam-se no domínio dos conceitos e da informação. De qualquer das maneiras, os cientistas usam-nos como ferramentas, extensões da normal capacidade analítica humana.

Existe, hoje em dia, um vasto leque de instrumentos materiais e cognitivos que exploram tanto o macrocosmo como o microcosmo, duas fronteiras que representam os limites da capacidade sensorial humana. Temos agora um bom sentido do território da realidade material, a "disposição do terreno". Sem dúvida que nos aguardam grandes surpresas, à medida que a qualidade dos nossos instrumentos se for aperfeiçoando e novas grandes descobertas forem efetuadas. Decerto que, no futuro, veremos o território de maneira diferente. Creio que, vista daqui a vários séculos, a evolução da ciência nos últimos trezentos ou quatrocentos anos, apoiada pelos instrumentos que criou, será vista como nada mais do que um começo — uma simples exploração do território da realidade, uma reclamação de propriedades. Temos ainda de aprender a viver nesse território, a compreendê-lo e, o que é muito importante, a levá-lo a servir os nossos interesses.

Os nossos instrumentos mostraram-nos os mundos visível e invisível da matéria — os átomos, as moléculas, os protões e as células; sabemos o que nela existe. O que não sabemos, em

pormenor, é o modo como tudo está organizado — um problema de complexidade. Se os primeiros três séculos da ciência moderna estenderem os sentidos humanos com a aprendizagem das propriedades da matéria e da vida, os próximos três séculos assistirão à emergência das ciências da complexidade. A chegada dessas ciências marcará o final do empreendimento científico tal como o conhecemos hoje, pois, por aquilo que podemos observar, a complexidade é a última fronteira que resta transpor.

Para ter uma antevisão desta nova fronteira basta recordarmos que toda a matéria é constituída por átomos — os blocos básicos com os quais é construído tudo quanto vemos à nossa volta. É incrível, mas é verdade: toda a complexidade do mundo resulta da combinação de apenas umas seis dúzias de átomos diferentes. Das combinações atómicas produzimos as moléculas, as células e os organismos vivos. Contudo, a existência de vida é só uma entre as muitas e complexas combinações interessantes de moléculas — uma combinação que se ajusta ao ambiente da Terra. Poderiam ser construídas artificialmente muitas outras combinações de moléculas igualmente interessantes e complexas. Ninguém conhece os limites do que se pode fazer com os átomos. Se não soubéssemos da existência da vida (supondo que éramos qualquer coisa), ninguém teria adivinhado que uma tal coisa seria possível. Não há nenhum motivo para os átomos e as moléculas não serem combinados de maneira diferente. O físico Richard Feynman deu uma palestra, em 1959, intitulada: "Há muito espaço lá em baixo." Descreveu cidades moleculares, fábricas e até reparadores que poderiam ser enviados a algum lugar do corpo humano a fim de o consertarem. Este mundo microscópico seria controlado por computadores moleculares que o orientariam para benefício humano. Poderiam ser criados novos seres — robôs moleculares — distintos dos seres vivos, mas com algumas das suas propriedades. Ao ser compreendido o potencial deste vasto domínio microscópico, torna-se evidente qual vai ser o futuro da ciência.

Este mundo molecular e as suas implicações no nosso mundo são descritos no livro *The Engines of Creation*, de Kim Eric Drexler. Drexler antevê a futura "revolução da montagem", quando forem construídos os primeiros montadores — máquinas moleculares que se autorreproduzem e organizam, controladas

por computadores moleculares e operando numa escala de tempo de alguns nanossegundos. Estes montadores, libertados no meio ambiente, poderiam executar trabalhos mineiros, cuidar das plantas, limpar cidades — em resumo, tornarem-se os escravos moleculares miniaturizados da espécie humana. Os bioquímicos desde há muito que se encaminham nesta direção, usando moléculas orgânicas. Mas há muitas outras maneiras de combinar os átomos em sistemas moleculares, sem recorrer aos exemplos da bioquímica. Talvez possamos construir computadores mecânicos a partir de moléculas mil vezes mais pequenas do que uma célula viva. Esta nanotecnologia pode reparar totalmente organismos atingidos e construir novas formas de vida. Ainda resta saber se uma tal fantasia tecnológica é, realmente, possível, mas não há nada nas leis da física ou da química que diga que o não é. Talvez o único obstáculo que se põe a uma tal revolução seja a ignorância humana sobre o modo como a atingir e a vontade de a fazer avançar.

O nosso domínio da complexidade ir-nos-á permitir não só criar novos mundos e seres, como compreender as componentes complexas do nosso mundo corrente. O corpo e o cérebro são as entidades mais complexas que conhecemos e, devido a esse facto e aos novos instrumentos à disposição, as ciências neurológicas, a medicina e a biologia estão na vanguarda da investigação moderna, sendo provável que aí se mantenham muito tempo. O trabalho nas ciências cognitivas, como na mente ou na visão, ou o estudo quantitativo do mundo social, da economia, da linguagem e da evolução cultural são também exemplos das ciências da complexidade. Qual é o instrumento que trará este mundo à compreensão?

O computador, o instrumento das ciências da complexidade, revelará um novo cosmo nunca antes apercebido. Graças à sua capacidade para tratar e processar enormes quantidades de informação de uma maneira mecânica e segura, o computador, como instrumento de investigação científica, já nos revelou um novo universo. Este universo não era acessível anteriormente, não por ser pequeno ou estar distante demais, mas por ser tão complexo que nenhuma mente humana o podia destrinçar.

Imaginamos, frequentemente, os computadores como auxiliares de trabalho, como objeto de aplicações comerciais ou, finalmente, como potenciais inteligências artificiais. O que aqui gostava de realçar, no entanto, é o computador no seu papel de instrumento de investigação — trata-se do primeiro de uma nova geração de instrumentos que nos abrirá as portas do reino da complexidade. Esta abertura será uma das grandes aventuras da ciência: a segunda parte da revolução científica. Tal como o computador, a nova ciência da complexidade cruza as linhas que delimitam as várias disciplinas. É agora possível usar métodos semelhantes para tratar problemas do domínio da biologia, da física, da engenharia eletrotécnica, da economia e da antropologia, não devido a uma sobreposição da natureza desses domínios, mas porque as técnicas abstratas específicas necessárias à resolução dos seus problemas são semelhantes. A organização futura das ciências, representada pela forma como se distribuem os departamentos científicos nas universidades, será alterada de modo a refletir esta nova estrutura interdisciplinar dos problemas. Ou acontece isso, ou surgirão novas instituições que englobam, elas mesmas, esta nova arquitetura das ciências.

Assim que nos apercebamos de que a complexidade do mundo é um desafio e não um obstáculo — uma oportunidade e não uma barreira —, a visão do futuro da ciência sofrerá uma grande expansão. Os instrumentos de exploração deste mundo estão agora a ser construídos — os computadores complexos —, instrumentos cujo próprio aperfeiçoamento depende do progresso das ciências da complexidade.

Muitos dos problemas que descrevi nesta parte do livro — problemas provenientes das ciências cognitivas, o problema do corpo-mente, os problemas do pensamento acerca do empreendimento científico — serão resolvidos, substituídos ou modificados à medida que as ciências da complexidade forem amadurecendo. A descoberta científica molda profundamente a filosofia. Com a emergência das ciências da complexidade, os cientistas naturais começar-se-ão a debruçar sobre a mente — o território intelectual tradicional dos filósofos. Isto pode representar o fim da "filosofia de lápis e papel" e um regresso ao espírito dos antigos filósofos naturais que não hesitavam em arregaçar as mangas para "filosofarem" no laboratório ou na banca de trabalho.

Já há filósofos a produzirem *software*. É evidente que ficarão sempre os puristas metafísicos que insistem em que a ciência deve ser sempre epistemologicamente alicerçada na filosofia. Mas, se eu estiver correto e o modelo para o desenvolvimento da ciência for a evolução biológica, então esta forma filosófica de pensar a prática científica e a verdade científica será, pura e simplesmente, inadequada. A ciência não é alicerçada nem justificada pela filosofia, da mesma maneira que a evolução biológica também o não é.

Acredito que o maior impacto das novas ciências será a aproximação dos mundos natural e humano. À medida que formos aprendendo a dominar a complexidade, as ricas estruturas de símbolos e talvez a própria consciência, é evidente que as barreiras naturais — barreiras essas erigidas de ambos os lados — entre as ciências naturais e as humanísticas não se poderão manter eternamente. A ordem narrativa dos mundos culturalmente construídos, a ordem dos sentimentos e crenças humanos, ficarão sujeitas, de uma nova forma, à descrição científica. Como já aconteceu durante a Renascença italiana, uma nova imagem da humanidade irá emergir no futuro, à medida que a ciência e a arte interagirem nas suas esferas complementares.

Estou convencido de que, no futuro, a história do mundo contemporâneo será vista como uma história em que a ciência e a *tecnologia* serão a força dominante a moldar o rumo dos acontecimentos internacionais. O futuro do mundo está nas mãos das nações e das pessoas que dominarem este novo reino da complexidade, domínio esse que será a sua fonte de riqueza, segurança e bem-estar.

Francis Bacon afirmou que conhecer é poder. Como estava certo! Mas o seu comentário deixa em aberto a questão de saber se teremos o discernimento necessário ao exercício desse poder e se nós, aqueles que o detivermos, estaremos prontos a estendê-lo aos biliões de pessoas que não o têm. Por vezes pergunto-me se será da pobreza dos pobres ou da ganância dos ricos que virá a nossa perdição. Contudo, mantenho-me otimista e acredito que a capacidade libertadora do nosso conhecimento, em conjunto com um certo discernimento, afirmará o primado da vida sobre a morte. Continuo a acreditar que o dia virá em que a ordem dos

assuntos humanos não será inteiramente estabelecida pelo poder. E mesmo que esse dia nunca chegue, ele parece ser digno da nossa esperança.

ALGUMAS REFLEXÕES EM CONCLUSÃO

CAPÍTULO 14

– OS SONHOS DA RAZÃO –

Os sonhos da razão produzem monstros.

FRANCISCO GOYA

Neste livro tenho vindo a explorar as fronteiras da ciência e os limites da razão humana. A ciência fornece-nos uma visão da realidade segundo a perspetiva da razão, uma perspetiva que vê a vasta ordem do universo, matéria viva e inanimada, como um sistema material governado por regras que a mente humana pode apreender. É uma visão poderosa, formal e austera, mas estranhamente silenciosa a respeito de muitas das questões que nos preocupam profundamente. A ciência mostra-nos o que é que existe, mas não o que é que se há-de fazer com isso.

A política, o direito, a arte e a religião fornecem-nos outras visões de uma outra realidade. Essas visões da realidade são moldadas pela perspetiva da primeira pessoa e pelos princípios da razão prática ou estética que ordenam o imediato da nossa experiência vivida e os nossos valores, refletidos nos nossos juízos éticos e estéticos. Como Vico referiu, há muitos séculos, é esta realidade — o mundo da sociedade civil e da cultura — que poderemos vir a compreender verdadeiramente, pois foi construída por nós e não por Deus.

Existem ainda outras visões da realidade que parecem cair completamente fora da razão. Essas visões têm pouco a ver com regras ou juízos, mas rasgam a fachada da existência comum e, durante alguns momentos breves e intensos, mostram-nos a realidade que suporta emocionalmente essa fachada. A razão é como a casca frágil e protetora de um ovo, que mantém unida a substância vital do nosso ser. Quando essa casca se quebra, num momento de crise intelectual ou emocional, vemos aquilo que não

pode normalmente ser visto. Podemos ver que a totalidade da vida humana — a nossa vida — não passa de umas tantas moléculas complexas no seio de um jogo muito mais vasto, disputado segundo regras de que normalmente não nos apercebemos. Estas crises podem ser momentos de verdadeira criatividade ou de desespero absoluto — experiências transcategóricas que deslocam a ordem do nosso universo pessoal e posteriormente transformam as nossas ideias e valores.

O físico Wolfgang Pauli, que tanto contribuiu para a descoberta das leis da mecânica quântica, e um indivíduo que levou a um extremo os princípios da crítica racional, enfrentou uma dessas crises durante a doença que o viria a vitimar. A história seguinte foi-me contada por Gilles Quispel, um historiador de religião holandês. Quispel fora enviado ao Egipto pelo psicólogo Carl Gustav Jung a fim de adquirir um manuscrito, um texto gnóstico ancestral, em que Jung estava interessado (mais tarde conhecido por *Jung Codex*). Uns anos mais tarde, Quispel deu uma série de conferências sobre gnosticismo, a pedido de Jung. Pauli, que na altura tinha colaborado com Jung num artigo conjunto sobre sincronicidade (o fenómeno de acontecimentos coincidentes e simbolicamente relacionados), esteve presente nas conferências e no jantar que as precedeu. Quispel sentou-se ao lado de Pauli e ambos se envolveram numa conversa intelectualmente estimulante. De repente, Pauli mudou abruptamente de assunto e perguntou a Quispel com uma grande intensidade emocional: "Você acredita num deus pessoal?" Quispel, apanhado de surpresa, desviou a questão. Pauli, veio a sabê-lo mais tarde, confrontava-se com a morte e buscava um sentido mais profundo para a vida, uma busca que o levou a reafirmar a sua ascendência e herança judaicas.

No final das conferências, Pauli aproximou-se de Quispel e disse: "Este deus, o Deus dos gnósticos, eu posso aceitar. O que nunca consegui aceitar foi a existência de um deus pessoal. Nenhum semelhante ser", prosseguiu taciturno, "poderia alguma vez suportar o sofrimento da humanidade." Pauli morreu uns meses mais tarde. Mas tinha tido a visão do Deus da fé, do Deus de Jerusalém, e não do deus racional de Atenas.

No final da década de 60, viajei pela Ásia e estive na cidade de Calcutá, onde dei uma conferência no Instituto de Estatística. Passei diversos dias na cidade, deambulando pelos bairros apinhados de gente. Calcutá é uma cidade extremamente pobre, em que centenas de milhares de desalojados vivem nas ruas. Embora tenha visto miséria, vi também uma vida coerente, e muitas vezes alegre, vivida no seio de um sofrimento quase incompreensível, um mundo social no qual a religião era indiferenciável das transações correntes da vida. Mas este cenário também me enfureceu, por sentir que, mudando os arranjos sociais e pela aquisição de competências educativas, administrativas e sociais, muita da miséria a que assisti poderia ser aliviada.

Um dia ia a caminhar por uma ruela deserta, num bairro extremamente pobre. Havia um grande depósito de lixo no meio do caminho estreito e, quando eu ia a passar, apercebi-me de alguma coisa a mexer-se no meio do lixo, alguma coisa do tamanho de um cão bastante grande. Sabia porém que, num bairro tão pobre, aquilo nunca poderia ser um cão. O que quer que fosse saltou e foi parar à minha frente. Movia-se como uma aranha gigantesca, com a cabeça de um homem, mas sem os membros, salvo uns cotos, no sítio onde os braços e as pernas deveriam estar, olhando-me fixamente. Fiquei aterrorizado, perante esta visão horrível, e preparei-me para fugir. Mas, enquanto corria, ouvi uma voz humana por trás de mim, uma voz indescritivelmente bonita, entoando um hino em honra do deus Shiva, comemorando a beleza da existência. Aterrado perante esta mostra de devoção, virei-me e vi o homem-aranha a cantar, uma voz divina a emergir do meio de uma miséria total. Soube então, no fundo do coração, que tinha acabado de negar a humanidade a uma pessoa e que esta seria a minha lição. Envergonhado do medo e repulsa que senti, jurei não mais me deixar vencer por eles ou voltar a negar a humanidade a alguém. Fiquei ligado ao homem-aranha.

A aprendizagem é mais intensa e afetiva quando tem uma componente emocional, não só intelectual, quando não há regras explícitas e o organismo só pode contar com os seus recursos básicos para sobreviver. Estas emoções não têm, forçosamente, que ser negativas; Platão via o erotismo como uma componente

essencial de qualquer educação verdadeira. A nossa vida emocional situa-se fora do enquadramento da razão (embora possa ser examinada pela razão), e nos seus períodos mais intensos apercebemo-nos de que não existem regras ou regularidades que nos guiem a um novo território. Esta é uma oportunidade para a criatividade e é frequente emergirmos de uma crise emocional com novas regras e valores adquiridos.

A crise pode ser provocada pela confusão e pela incerteza e há o perigo de se cair numa ou outra forma de fundamentalismo intelectual, político, científico ou religioso. A característica de qualquer fundamentalismo consiste em encontrar certeza absoluta — a certeza da luta de classes, a certeza da ciência ou a certeza literal da Bíblia —, uma certeza da pessoa que encontrou finalmente um rochedo sólido onde assentar e que, ao contrário de outros rochedos, é "sólido até ao fundo". O fundamentalismo, no entanto, é uma forma terminal de consciência humana, no qual o desenvolvimento pára, eliminando a incerteza e o risco que o verdadeiro desenvolvimento implica.

É importante distinguir entre uma tal certeza fundamentalista e as nossas convicções reais pelas quais devemos viver como indivíduos moralmente responsáveis. É da natureza do fundamentalismo projetar as convicções internas do indivíduo sobre o mundo objetivo exterior, como uma forma de certeza sobre o mundo. A certeza torna-se então uma propriedade do mundo, e não da pessoa. É da natureza da convicção, pelo contrário, considerar as crenças de uma pessoa como um assunto puramente interno, uma parte da subjetividade da pessoa, e não necessariamente uma parte do mundo objetivo. Consequentemente, as nossas convicções, embora possam ser mantidas com uma certa força, estão sujeitas a um processo evolutivo e de crescimento, uma vez que não são vistas como parte de uma realidade exterior imutável, mas sim como parte do nosso ser criativo individual.

Dado o enorme poder das emoções humanas, o seu potencial de criatividade e realização, bem como de destruição, é caso para nos interrogarmos acerca do papel de uma razão frágil na regulação das nossas vidas, especialmente dada a sua insuficiência face a valores humanos em conflito profundo, valores

moldados pela nossa nacionalidade, cultura, raça, grupo etário e sexo. Além disso, que novos conhecimentos podem as novas ciências da complexidade, debatendo-se para assimilar o emaranhamento da mente e da natureza, oferecer quando se tenta compreender a vida? Martinho Lutero, essa fortaleza da fé, caluniou "essa meretriz da razão", embora argumentasse racionalmente. S. Tomás de Aquino via a razão como uma manifestação do divino que há dentro de nós, mas sabia que no final tudo se resumia à fé. Goya viu os sonhos das Luzes e da razão transformarem-se na monstruosidade das guerras napoleónicas. Será que o vasto império da razão não passa, em última análise, de um instrumento ao serviço dos sentimentos inconscientes primitivos, ou será que é ela quem preside aos nossos destinos? Em resumo, como é que a perspetiva da terceira pessoa pode iluminar as paixões existenciais da primeira pessoa?

Primeiro e antes de tudo, as descobertas da ciência fornecem uma visão da realidade material que representa a vanguarda evolutiva do nosso conhecimento do universo. No mínimo, as nossas crenças e a nossa perspetiva filosófica têm de ser consistentes com essa visão, sem necessariamente se alicerçarem nela. Corre-se um certo risco quando se mantêm crenças que se desvanecem em face das descobertas da ciência — o risco de as crenças serem falsas e contradizerem a ordem da natureza. A insistência nessas crenças não pode, a longo prazo, promover a sobrevivência nem do indivíduo nem do grupo.

Ao mesmo tempo que as crenças profundas não devem contradizer a ciência, também não se podem alicerçar nela. Durante séculos, a Igreja Católica viu a sua fé apoiada na cosmologia de Ptolemeu, que colocava a Terra no centro do cosmo. Quando essa cosmologia foi desmentida por Copérnico, a Igreja viu a sua fé ameaçada. Surgiu um conflito porque as descobertas da ciência são sempre temporais, enquanto a fé se pretende eterna. Se a fé se alicerça na ciência, quando a ciência muda de ideias sobre a natureza da realidade, a fé pode ver-se perturbada.

Hoje alguns ocidentais, atraídos pelas religiões orientais, sugerem que as descobertas da moderna teoria quântica estão, de certa forma, mais próximas das religiões orientais do que das

ocidentais. Uma tal ligação entre os conceitos da física e as noções religiosas é totalmente superficial e não dá valor à profundidade quer das ideias científicas quer dos ensinamentos religiosos. A pretensão, por parte de alguns proponentes de filosofias orientais, de que os estados de meditação estão relacionados com campos quânticos é, na melhor das hipóteses, uma afirmação incorreta, e na pior, uma grandessíssima fraude. Tentar relacionar diretamente as descobertas das ciências naturais com os nossos estados mentais subjetivos é, se se refletir minimamente sobre isso, uma perfeita tolice. E nenhum bem moral pode advir daquilo que é falso.

As novas ciências da complexidade mostram-nos como podem surgir consequências complexas a partir de alguns elementos e regras muito simples. Muitos dos modelos de computador que descrevemos baseiam-se nesta ideia. Alguns aspetos do nosso comportamento moral — comportamento que reflete ou constitui os nossos valores morais — parecem ser extremamente complexos, mas é de crer que possam surgir a partir de elementos simples, passíveis de serem compreendidos. Embora a ciência não possa julgar, pode-nos ajudar a compreender.

Não conheço nenhum modelo de computador do comportamento moral, mas existem imensos modelos do comportamento económico, sendo o seu exame muito instrutivo. Uma característica desses modelos que me intriga é o modo como, muitas vezes, eles são contraintuitivos. Lembro-me de problemas que alguns amigos economistas me colocavam. Perguntavam-se se, caso eu fizesse isto ou aquilo, as taxas de juro subiam ou baixavam? Apesar de raciocinar sobre o assunto, era tão frequente errar como acertar. A resposta correta era muitas vezes contraintuitiva, devido ao facto de eu me ter esquecido de algum fator.

Suspeito de que muitos dos nossos valores morais também sejam assim. Mantemos certos valores por pretendermos atingir um objetivo desejado, um objetivo que, no mínimo, é bom para nós. Contudo, se pudéssemos modelar as consequências complexas desses valores tão simples, poderíamos descobrir, em 50% dos casos, que as nossas ações têm consequências contraintuitivas. Há coisas que o nosso pensamento não

considera. O bem direto que pretendíamos realizar não se realiza ou a ação moral que pretendíamos atingir tem efeitos secundários desastrosos. As novas ciências da complexidade e a perspetiva do mundo que a modelação em computador oferece podem ensinar-nos coisas de que nunca nos apercebemos sobre os valores que mantemos. A ciência não pode resolver conflitos morais, mas pode ajudar a enquadrar melhor os debates em torno desses conflitos.

Considere-se, por exemplo, a mentira. Acreditamos que a verdade é um valor bom; não devemos mentir. No entanto, se toda a gente dissesse sempre a verdade, uma pessoa teria uma confiança absoluta em tudo o que lhe fosse dito, e então um único mentiroso que surgisse nessa sociedade teria um poder enorme. Esta não seria uma situação socialmente estável. Por outro lado, numa sociedade em que toda a gente estivesse sempre a mentir nada poderia funcionar em condições. O estado de equilíbrio parece estar numa sociedade em que as pessoas dizem a verdade a maior parte das vezes, mas de vez em quando mentem, que é o que realmente parece acontecer. De certa maneira, então, são os mentirosos no nosso meio (e dentro de nós) que tanto nos mantêm honestos como em guarda. Este tipo de análise científica da mentira pode ajudar-nos a compreender por que razão a praticamos.

As novas ciências da complexidade também vão lançar um desafio direto aos nossos valores. Isto já é evidente nos debates em torno da ética biomédica, envolvendo a modificação genética de seres humanos, animais e plantas, o prolongamento artificial da vida e as prioridades dos transplantes. Essas preocupações irão aumentar no futuro. Chegará o dia em que as pessoas terão preocupações morais em relação à vida artificial — quais são as nossas obrigações para com os seres que criamos? Poderemos permitir que esses seres se magoem e matem uns aos outros? Podem-nos surgir problemas morais na determinação das ações que permitiremos que as nossas criaturas artificiais tomem. Talvez acabemos por ter de deixar às nossas criaturas a liberdade de se entenderem consigo próprias. As ciências da complexidade, ao transformarem a arquitetura das ciências, irão criar uma nova imagem da realidade. Não podem deixar de influenciar a forma como nos vemos e a natureza da nossa humanidade.

William Butler Yeats, um poeta irlandês, comentava, no fim da sua vida, que tinha tentado encontrar e representar uma verdade profunda nos seus escritos. Veio a compreender que isso não era possível, mas compreendeu também que era possível a um ser humano incorporar essa verdade. Por outras palavras, o verdadeiro recetáculo da verdade do nosso ser é o nosso próprio corpo e sangue, uma verdade que se reflete em toda a nossa vida e ações.

O ensinamento de Yeats, expresso na linguagem da teoria da complexidade, afirma a unicidade de sistemas insimuláveis. É uma maneira de pensar quem e o que o leitor e eu somos — sistemas biológicos insimuláveis. Ninguém poderá alguma vez simulá-lo a si ou a mim com um sistema menos complexo do que nós próprios. Os produtos que realizamos podem ser vistos como uma simulação e, embora os produtos possam suportar mais coisas que os nossos organismos, nunca podem capturar a riqueza, a complexidade ou a profundidade de objetivos do seu criador. Beethoven comentou uma vez que a música que escreveu não era nada em comparação com a música que ouviu.

Visto sob este prisma, não só os seres humanos individuais são sistemas insimuláveis, como também não é simulável a totalidade da cultura e da vida — um vasto "sistema computacional", talvez trabalhando na resolução do grande problema do demiurgo, um problema presentemente para além da nossa compreensão. Assemelhamo-nos a autómatos celulares tridimensionais complexos, representando um papel no nosso próprio jogo da vida e tentando descobrir as consequências complexas das regras elementares refletidas pelas leis da natureza — uma imagem bizarra da nossa existência. E, tal como em qualquer sistema insimulável, a nossa existência futura não é previsível, mas cega em relação ao seu destino final. Alguns indivíduos poderão ter fé no "discernimento" da nossa existência evolutiva para chegar à sua melhor realização; outros planeiam, controlam e tentam prevê-la; todos eles, ao agirem como agem, competem e cooperam no seio do sistema. Como no conto chinês, em que o arrogante rei dos macacos pretendia desafiar Buda para um concurso de saltos, só para descobrir que, ainda que saltasse até aos confins do universo, continuava a estar sempre nas mãos de Buda, não podemos fugir ao jogo da vida. O processo de

raciocínio, embora tome em linha de conta a natureza do mundo, começa logicamente com certos axiomas — proposições básicas — e depois chega às conclusões. Não é possível deduzir valores ou a conduta correta das ações morais a partir exclusivamente da razão, uma vez que pessoas com valores diferentes escolherão, simplesmente, axiomas diferentes. Mas que é que poderá regular a formação dos nossos valores — para onde nos deveremos virar em busca de orientação?

Ao longo dos séculos, pessoas preocupadas com a forma como deveriam atuar deram resposta a esta questão. Há quem pense que só o alicerce transcendental exterior à humanidade pode ser a base dos nossos valores — essencialmente Deus. Outros encontram a base dos valores na autoridade — a Igreja, o partido, a constituição, um professor venerado — ou aceitam simplesmente os "produtos culturais acabados". Ainda outros, "com uma filosofia secular, inclinam-se para princípios universais, como o "imperativo categórico" de Kant, o "véu da ignorância" de John Rawls ou a "democracia relativa" de Feyerabend. Por esta altura, no entanto, deverá estar claro que um tal padrão de valores universalmente aceite não é, de facto, possível, no sentido de todos os homens e mulheres racionais concordarem com ele. A diversidade da cultura humana e a multiplicidade das necessidades humanas implicam um espectro de valores humanos que vai desde a justificação da desumanidade cruel até ao altruísmo santificado. Há também quem argumente que devemos confiar nos nossos sentimentos mais profundos do que é o bem e o mal. Mas essa confiança pode, facilmente, ser mal depositada, e já houve indivíduos e nações inteiras que foram monstruosamente enganados por confiarem nos seus sentimentos. Para onde, então, nos deveremos virar, quando confrontados com uma decisão moral?

O problema de ir em busca de um padrão absoluto de verdades morais apresenta certas semelhanças com o problema da procura de uma verdade científica absoluta. Houve filósofos da ciência que quiseram preservar o conhecimento científico para todo o sempre. Sabemos agora que isso é impossível; a ciência é um sistema seletivo e está sujeita àquilo que descobrimos no mundo real. Da mesma maneira, a ordem moral está realmente incorporada na verdadeira pluralidade da cultura humana em

mutação e nos conflitos imediatos da nossa existência, e não em princípios transcendentais, abstratos ou emocionais. E esta é também a fonte da sua resolução. As nossas verdadeiras decisões devem ter lugar no contexto das relações de força existentes, um ambiente sociocultural específico, e não de um mundo imaginado. Princípios morais abstratos, não concretizados numa escolha pessoal imediata, são uma fonte de orientação tão boa como uma ciência divorciada da experiência. Perguntar onde é que devemos ir pedir orientações, na tomada de uma decisão moral, é o mesmo que perguntar onde é que um animal deve ir pedir orientações antes de dar o passo seguinte na escala da evolução. Será que as nossas ações morais representam um sistema seletivo embutido na nossa cultura, nas nossas leis e no nosso comportamento? Esta perspetiva de um sistema seletivo não nos ajuda a decidir por uma das opções que temos de tomar, mas ajuda-nos a prever as consequências de uma tal decisão. As nossas ações autoconstituem-se; moldam o nosso carácter e definem-no em relação à cultura onde vivemos. E, ao constituirmos o nosso carácter através de ações exemplares, ajudamos a constituir a cultura. A nossa liberdade está no reconhecimento da necessidade.

A forma de atuarmos como indivíduos depende, em última análise, da forma como estamos ligados a sentimentos primitivos profundos, uma ligação que é temperada pela frágil e falível razão. O processo da legislação das nossas ações morais é, tal como a evolução, um processo insimulável, um processo que define a dianteira do nosso desenvolvimento cultural presente. Não há nenhuma resposta para a forma como deveremos atuar a fim de atingir um objetivo explícito, da mesma maneira que não há resposta para o desenvolvimento futuro de um autómato insimulável.

A razão sonha com um império do conhecimento, uma mansão da mente. Contudo, por vezes acabamos por viver numa choupana ao lado da mansão. A razão mostrou-nos a capacidade do nosso poder, tanto para criar como para destruir. A forma como, porém, usamos esse poder depende das nossas capacidades mais profundas, que estão para além do alcance da razão, para além das nossas tradições e cultura, estendendo-se muito para trás, para as profundezas do processo evolucionário

criador da nossa espécie, um processo que, em última análise, afirma o poder da vida sobre a morte. E, ironicamente, até a morte, como parte do processo de vida, afirma esse poder. Foi assim que nos transformámos em seres e nos encontramos agora empenhados na inexorável luta moral da existência humana corrente.

Não há dúvida de que estamos no limiar de uma grande aventura do espírito humano — uma nova síntese do conhecimento, uma integração potencial da arte e da ciência, uma compreensão mais profunda da psicologia humana, um aprofundamento das representações simbólicas da nossa existência e sentimentos tal como são dados pela cultura e pela religião, o surgimento de uma ordem internacional baseada na cooperação e na competição não violenta. Não me parece que esperar por todas estas coisas seja colocar a esperança fora do alcance.

O futuro, como sempre, é dos sonhadores.

Bibliografia

Deixo a seguir uma lista de livros e artigos que me foram úteis na preparação deste livro. Não está completa, mas servirá como introdução à enorme e sempre crescente literatura referente aos tópicos cobertos no texto. O leitor mais interessado e curioso descobrirá, por certo, que esta bibliografia é apenas "a ponta visível do icebergue".

ANDERSON, Walter Truet — *The Upstart Spring, Esalen and the American Awakening*, Menlo Park, Califórnia, Addison-Wesley Publishing Co., 1983.

ASHBY, W. Ross — *Design for a Brain*, Nova York, John Wiley, 1952.

ATTEWELL, Paul, e James Rule — "Computing and organizations: what we know and what we don't know", *Communications of the ACM*, vol. 27, n.º 2 (Dezembro de 1984): 1184.

AYER, A. J. — *Logical Positivism*, Nova York, Free Press, 1959.

BENNET, Charles H, e Rolf Landauer — "The fundamental physical limitation of computation", *Scientific American*, vol. 253 (1985): 48.

BERNSTEIN, J. — "Profiles: Marvin Minsky and artificial intelligence", *New Yorker*, 57 (1981): 50-126.

BOWER, Bruce — "Who's the Boss", *Science News*, vol. 129, n.º 17 (abril de 1986): 266 (artigo relativo às experiências de Ben Libet).

BOYD, Robert, e Peter J. Richardson — *Culture and the Evolutionary Process*, Chicago, University of Chicago Press, 1985.

BRAIN, The — Nova York, Scientific American Books, W. H. Freeman and Co., 1979.

BRUMMER, J. S. — *In Search of Mind*, Nova York, Harper and Row, 1983.

CAMPBELL, David, James Crutchfield, Doyne Farmer e Erica Jen — "Experimental mathematics: the role of computations in non-linear science", *Communications of the ACM*, vol. 28, n.º 4 (1985): 374.

CARNAP, Rudolf — *The Logical Structure of the World: Pseudoproblems in Philosophy*, Berkeley, Califórnia, University of California Press, 1967.

CARRUTHERS, Peter — "Emerging synthesis in modern science", Los Álamos preprint LA-UR-85-2366 (1985).

CHAITIN, Gregory J. — "Randomness and mathematical proof", *Scientific American*, vol. 232 (1975): 47.

CHARLESWORTH, Max — *Science, Non-Science and Pseudo-Science*, Melbourne, Austrália; Dankin University Press, 1982.

CHOMSKY, Noam — *Rules and Representations*, Nova York, Columbia University Press, 1982.

Aspetos da Teoria da Sintaxe, Coimbra, Arménio Amado, 1978.

CHURCHLAND, Patricia Smith — *Neurophilosophy*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1986.

Computer Culture. *The Scientific Intellectual and Social Impact of the Computer*, ed. Heinz R. Pagels. Publicado nos Anais da Academia de Ciência de Nova York, vol. 426, 1984.

− *Computer Software Issue*, Scientific American (Setembro de 1984).

CRICK, F. H. C. − "Thinking about the brain", Scientific American, 241 (1979): 219-323.

CRICK, F. H. C., e Graeme Mitchison — "The function of dream sleep", *Nature*, 304, 5922 (1983): 111-114.

CRITCHLEY, MacDonald — *The Divine Banquet of the Brain*, Nova York, Raven Press, 1979.

CRUTCHFIELD, James, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard e Robert S. Shaw — "Chaos", *Scientific American*, vol. 255, n.º 6, Dezembro de 1986, 46.

DAWKINS, Richard — *O Relojoeiro Cego*, Lisboa, Edições 70, 1989.

− *O Gene Egoísta*, Lisboa, Gradiva, 1989.

DENNETT, D. C. — *Brainstorms: Philosophical Essays on Mind and Psichology*, Cambridge, Massachusetts, MIT/Bradford Books, 1978.

DESCARTES, René — *The Philosophical Works of Descartes*, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press, 1968.

DREYFUS, H. — *What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason*, Nova York, Harper and Row, 1972.

DREYFUS, Hubert L., e E. Dreyfus — *Mind over Machine*, Nova York, Free Press, 1986.

DUHEM, Pierre — *The Aim and Structure of Physical Theory*, Princeton, Nova Jersey, Princeton University Press, 1962.

Dyson, Esther — *Release 1.0* (9 de julho de 1987), publicado por Edventure Holdings, Inc.

EDELMAN, Gerald — *Neural Darwinism*, Nova York, Basic Books, 1987.

FANG, J. — *Bourbaki, towards a Philosophy of Mathematics I e Hilbert, towards a Philosophy of Mathematics II*, Hauppauge, Nova York, Paideia, 1970.

FEYERABEND, Paul K. — *Philosophical Papers*, vols. 1 e 2, Cambridge, Massachussets, Cambridge University Press, 1981.

FEYNMAN, Richard − *Está a Brincar, Sr. Feynman?*, Lisboa, Gradiva, 1988.

FODOR, J. A. — "*The mind-body problem*", Scientific American, 244: 114-123.

FODOR, J. A. — *Representations: Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science*, Cambridge, Massachussets, MIT Press, 1981.

− *The Language of Thougt*, Nova York, Thomas Y. Crowell Co., 1975.

FORD, Joseph — "Chaos: solving the unsolvable, predicting the unpredictable", *Chaotic Dynamics and Fractals*, Nova York, Academic Press, 1986.

− "How random is a coin toss?"", *Physics Today*, vol. 36, n.º 4 (Abril de 1983): 40.

− "What is chaos that we should be mindful of it?", *The New Physics*, ed. S. Capelin e P. C. W. Davies, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press, 1986.

FREGE, Gottlob — Translations from the Philosophical Writings of Gottlob Frege, trad. (inglês) e ed. P. Geach e M. Black, Oxford, Basil Blackwell, 1952.

GARDNER, Howard — *The Mind's New Science: a History of the Cognitive Revolution*, Nova York, Basic Books, 1985.

– *Frames of Mind*, Nova York, Basic Books, 1983.

GAZZANIGA, Michael S. — *The Bissected Brain*, Nova York, Appleton-Century-Crofts, 1970.

– *The Social Brain*, Nova York, Basic Books, 1985.

GLEICK, James, *Caos*, Lisboa, Gradiva, 1989.

GOODMAN, Nelson — *Fact, Fiction and Forecast*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1985.

– *Ways of World Making*, Indianapolis, Indiana, Hackett Publishing Co., 1978.

– *Of Mind and Other Matters*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1984.

GOULD, Stephen Jay, *O Mundo depois de Darwin*, Lisboa, Presença, 1988.

– *Quando as Galinhas Tiverem Dentes*, Lisboa, Gradiva, 1989.

– *The Mismeasure of Man*, Nova York, W. W. Norton, 1981.

– *O Polegar do Panda*, Lisboa, Gradiva, 1986.

GRIFFIN, Donald R. — *Animal Thinking*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1984.

HARRINGTON, L. A., M. D. Morley, A. Scednov e S. G. Simpson, eds. — *Harvey Freidman's Research of the Foundations of Mathematics*. *Studies in Logic*, vol. 117, Amsterdão, North-Holland, 1985.

HEMPEL, Carl — *Aspects of Science Explanation*, Nova York, Free Press, 1965.

HEPPENHEIMER, T. A. — ""Mathematics at the receiving end", *Mosaic*, vol. 16, n.º 4 (1985). Publicado pelo Departamento de Cálculo Científico Avançado II da Fundação Nacional de Ciência.

HILLIS, W. Daniel — "The connection machine", *Scientific American* (Junho de 1987): 108.

HINTON, Geoffrey E., e James A. Anderson, eds. — *Paralell Models of Associative Memory*, Hillsdale, Nova Jersey, Erlbaum, 1981.

HOFSTADTER, Douglas R. — Gödel, Escher, Bach: *An Eternal Golden Braid*, Nova York, Basic Books, 1970.

HOFSTADTER, Douglas R. — *Metamagical Themas*, Nova York, Basic Books, 1983.

HOLTON, G. — "Do scientists need a philosophy?", *The Times Literary Supplement*, 2 (Novembro de 1984): 231-234.

– "Constructing a theory: Einstein's model", *The American Scholar*, vol. 48, n.º 3 (1979).

– *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1973.

HOLYOAK, Keith J. — "*Crítica do Parallel Distributed Processing*, de David E. Rumelhart, James L. McClelland e o Grupo de Investigação de PDP", *Science*, vol. 236 (1987): 992.

KANDEL, Eric R. — "Small systems of neurons", *Scientific American*, 241, 3 (1979): 66-77.

– *Celullar Basis of Behavior: An Introduction to Behavioral Neurobiology*, San Francisco, W. H. Freeman, 1976.

KANT, Emmanuel, *Crítica da Razão Pura*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

KIRKPATRICK, S. G. C. D. Gelatt, Jr., e M. P. Vecchi — "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220 (1983): 671.

KLEIN, Morris — *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, Nova York, Oxford University Press, 1972.

KOLATA, Gina — "What does it mean to be random?", *Science*, vol. 231 (1986): 1068.

KOSSLYN, S. M. — *Ghosts in the Mind's Machine: Creating and Using Images in the Brain*, Nova York, W. W. Norton, 1983.

– *Image and Mind*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1980.

KUHN, Thomas S. — *The Structure of Scientific Revolutions*, 2.ª ed., Chicago, University of Chicago Press, 1970.

LAX, Peter D. — "Large scale computing in science, engineering and mathematics", conferência proferida na Joint Academia Nazional dei Lincei and IBM Sci. Ctr./Roma, Maio 1985.

– "Mathematics and computing", *Journal of Statistical Physics*, Novembro de 1985.

LIBET, Benjamin, E. W. Wright, B. Feinstein e D. K. Pearl — "Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience: a functional role for the somatosensory specific projection system in man", *Brain*, 102 (1979): 191-222.

MAOR, Eli — *To Infinity and Beyond*, Boston, Birkäuser, 1987.

MARR, D. — *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, San Francisco, W. H. Freeman, 1982.

MEDAWAR, Peter — *Pluto's Republic*, Nova York, Oxford University Press, 1984.

Mind's Eye, The, readings from *Scientific American*, Nova York, W. H. Freeman, 1986.

MINSKY, Marvin — *The Society of Mind*, Nova York, Simon and Schuster, 1986.

MINSKY, Marvin, e S. Papert — *Perceptrons*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1969.

NAGEL, Thomas — "What is it like to be a bat?", *Philosophical Review*, 83 (1974): 435-450.

NEWELL, A., e H. A. Simon — *Human Problem Solving*, Englewood Cliffs, Nova Jersey, Prentice-Hall, 1972.

Non-Linear Phenomena, Physica D., "Evolution, games and learning", vol. 22 D (1986), Amsterdão, North-Holland: Proceedings of the Fifth Annual International Conference of the Center for Non-Linear Studies, Los Álamos, Novo México. Eds: Doyne Farmer, Alan Lapidis, Norman Packard, Burton Mendroff.

NORMAN, D. A. — *Memory and Attention*, Nova York, John Wiley, 1969.

PAGELS, Heinz — *Simetria Perfeita*, Lisboa, Gradiva, 1990.

– *O Código Cósmico*, Lisboa, Gradiva, 1986.

PATRUSKI, Ben — "Biology's computational future", *Mosaic*, vol. 16, n.º 4 (1985). Publicado pelo Departamento de Cálculo Científico Avançado II da Fundação Nacional de Ciência.

PEIRCE, Charles Sanders — *The Collected Papers o Charles Sanders Peirce,* vols. 1-6, eds. C. Hartshorne e P. Weiss, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1931-1935.

− *Physics Today*, Maio de 1984, "Advances in computers for physics". Publicada pelo Instituto Americano de Física. – Outubro de 1987. "Computacional physics". Publicada pelo Instituto Americano de Física.

PINES, David, ed. — "Emerging synthesis in science". Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute, Santa Fé, Novo México: The Santa Fe Institute. Artigos da autoria de Gell-Man, Manfred Eigen, Irven DeVore, John Tooby, S. Wolfram, Felix Browder, Harvey Freidman e Charles Bennet.

PITTS W. H. e W. S. McCulloch − "How we know universals: the perception of auditory and visual forms", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 9: 127-147, 1952.

PLATÃO — *Plato: The Collected Dialogues*, ed. Edith Hamilton e Huntington Cairns, Nova York, Fundação Bollinger, 1961.

POPPER, Karl R. — *The Logic of Scientific Discovery*, Londres, Hutchinson, 1959.

− *The Open Universe, An Argument for Indeterminism*, Totowa, Nova Jersey, Rowan and Littlefield, 1982.

− *Teoria Quântica e o Cisma da Física*, Lisboa, D. Quixote, 1989.

POPPER, Karl R., e John Eccles — *The Self and Its Brain*, partes 1 e 11, Berlim, Springer International, 1977.

PRIBRAM, H. H. — *Language of the Brain: Experimental Paradoxes and Principles in Neuropsychology*, Englewood Cliffs, Nova Jersey, Prentice Hall, 1971.

PUTNAM, Hilary — *Realism and Reason*, vol. 31, Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press, 1983.

PYLYSHYN, Z. W. — *Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1984.

QUINE, W. V. O. — *From a Logical Point of View*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1953.

REICHENBACH, Hans — *Philosophy of Space and Time*, Nova York, Dover Publications, 1958. − *The Rise of Scientific Philosophy*, Berkeley, Califórnia, University of California Press, 1951.

RESNICK, Michael D. — *Frege and Philosophy of Mathematics*, Ithaca, Cornell University Press, 1980.

RORTY, R. — *Filosofia e o Espelho da Natureza*, Lisboa, D. Quixote, 1988.

RUMELHART, David D., James L. McClelland e o Grupo de Investigação de PDP — *Parallel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of Cognition*, vols. 1 e 2, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1986.

RYLE, G. — *The Concept of Mind*, Londres, Hutchinson, 1949.

SCHANK, R. C., e R. Abelson — *Scripts, Plans, Goals and Understanding*, Hillsdale, Nova Jersey, Lawrence Erlbaum, 1977.

SEARLE, John — *Mente, Cérebro e Ciência*, Lisboa, Edições 70, 1988.

SHEPPARD, R. N., e J. Metzler — "Mental rotation of three-dimensional objects", *Science*, 171 (1977): 701-703.

SIMON, H. — "Cohabiting the planet with computers", esboço, Departamento de Psicologia da Universidade de Carnegie-Mellon, 1986.

− *As Ciências do Artificial*, Coimbra, Arménio Amado, 1981.

SLOMAN, A. — *The Computer Revolution in Phylosophy: Phylosophy, Science and Models of Mind*, Hassocks, Sussex, Harvester Press, 1978.

SOLOMONOFF, R. J. — "A formal theory of inductive inference, part I", *Information and Control*, vol. 7 (1974): 1.

SOROS, George — *The Alchemy of Finance*, Nova York, Simon and Schuster, 1987.

STENT, Gunter S. — "*Crítica do Neurophilosophy*", de P. S. Chuchland, *Science*, vol. 236 (1987): 990.

SWINNEY, Harry L., e Jerry P. Gollub — "The transition to turbulence", *Physics Today*, vol. 31, n.º 8 (1978): 41.

THOMAS, Lewis — *A Medusa e o Caracol*, Lisboa, Gradiva, 1985.

− *The Youngest Science*, Nova York, Viking Press, 1985.

TRAUB, J. F. — "Information complexity and the sciences", conferência universitária, Low Library, 6 de fevereiro de 1985, Universidade de Columbia.

− "The influence of algorithms and heuristics", esboço, Departamento de Ciência dos Computadores, Universidade de Carnegie-Mellon, 1979.

TRAUB, Joseph F., e Edward W. Packel — "Information based complexity", Nature, 1987.

VON NEUMANN, J. — *The Computer and the Brain*, New Haven, Connecticut, Yale University Press, 1958.

WALDROP, M. Mitchell — "The connection machine goes commercial", *Science*, vol. 232 (1986): 1090.

WANG, Hão — "Computer theorem proving and artificial intelligence", *Contemporary Mathematics*, vol. 29 (1984): 49.

— *Reflections on Kurt Gödel*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1987.

WINSTON, Jonathan — *Brain and Psyche, The Biology of the Unconcious*, Nova York, Vintage Books, 1986.

WINSTON, P. H. — *Artificial Intelligence*, Reading, Massachusetts, Addison--Wesley, 1977.

− *Psychology of Computation Vision*, Nova York, McGraw-Hill, 1975.

WITTGENSTEIN, L. — *Tractatus logico philosophicus*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1989.

WRIGHT, Robert — *The Grand Design, Three Scientists and Their Gods*, Nova York, Times Books, 1988.