

SÉRIE NOVO PENSAMENTO

o cérebro quântico

AS NOVAS DESCOBERTAS DA NEUROCIÊNCIA
E A PRÓXIMA GERAÇÃO DE SERES HUMANOS



JEFFREY
SATINOVER

OCÉREBRO QUÂNTICO

Jeffrey Satinover

O CÉREBRO QUÂNTICO

As novas descobertas da neurociência e a próxima geração de seres humanos

Tradução
William Lagos

2ª Edição
2ª Reimpressão

ALEPH

Copyright © Jeffrey Satinover, 2001
Copyright © Editora Aleph, 2007
(edição em língua portuguesa para o Brasil)

TÍTULO ORIGINAL - The quantum brain CAPA - Thiago Ventura e Luiza Franco
REVISÃO TÉCNICA - Adilson Silva Ramachandra PREPARAÇÃO DE TEXTO - Ana Cristina Teixeira
REVISÃO - Hebe Ester Lucas e Tânia Rejane A. Gonçalves PROJETO GRÁFICO - Neide Siqueira EDITORAÇÃO - Join Bureau

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução, no todo ou em parte, através de quaisquer meios.

Publicado mediante acordo com John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158-0012.

EDITORA ALEPH LTDA.
Rua João Moura, 397
05412-001 - São Paulo - SP - Brasil Tel: [55 11] 3743-3202
Fax: [55 11] 3743-3263
www.editoraaleph.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Satinover, Jeffrey

O cérebro quântico : as novas descobertas da neurociência e a próxima geração de seres humanos / Jeffrey Satinover; tradução William Lagos. - 2. ed. - São Paulo : Aleph, 2008. - (Série novo pensamento)

Título original : The quantum brain. Bibliografia.

ISBN 978-85-7657-065-3

1. Cérebro - Filosofia 2. Neurociência cognitiva 3. Teoria quântica I. Título. II. Série.

Índice para catálogo sistemático: 1. Cérebro quântico: Fisiologia humana

612.82
2ª reimpressão

2013

A meus pais.

SUMÁRIO

Agradecimentos

PRIMEIRA PARTE: O CÉREBRO QUÂNTICO

Introdução: A crise quântica

Iluminismo - Anseios quânticos

Capítulo 1: A mente fora da matéria - A engrenagem do quarto cérebro

O cérebro em uma caixinha de fósforos - Perdendo o controle: jogo e empate com “HER” - Até que ponto é humana? - HERCULES, também conhecido como Criação de Robôs

Capítulo 2: Como abrir os olhos da mente

Pétalas de rosa - Não, nós não temos bananas - Um a partir de muitos (*e pluribus unum*)

Capítulo 3: Morte e nascimento

Minsky - Atingindo o cérebro - Morte XOR ressurreição: o segundo surgimento das redes neurais - Fora da caixinha - Computação paralela versus computação serial

Capítulo 4: Como ensinar velhos truques a um filhote de cachorro

Algumas vezes dois erros justificam um acerto - O catálogo do cérebro holográfico - A escolha dos vencedores - NetTalk

Capítulo 5: A rede úmida

Sim, gentilmente na noite - Então, como novos truques são ensinados a um cachorro velho? - Você vai ter de entrar sozinho - Mapas computacionais

Capítulo 6: Como tecer uma fantasia de vidro

À la recherche du temps perdu - De Madaline a Madeleine - John Hopfield e a rede de Hopfield - Escoteiros de ferro - Antiferro - Frustração, a mãe da inteligência - Como aumentar a temperatura - O lunático, o namorado e o poeta, todos têm imaginação compacta - Duas estradas se separam... - Tempo de enrijecer

Capítulo 7: O jogo da vida, ou como o leopardo ganha suas pintas

“Tudo flui” (Heráclito) - Entra o autômato - Vida: um computador universal - Querida, encolhi o computador - Embriogênese computacional - Viajando para baixo

Capítulo 8: Levantando-se pelas alças de suas próprias botas

Algoritmos genéticos: cópulas sincopadas - Um milhão de macacos - Da programação genética até a computação molecular: hardware evolutivo

Capítulo 9: O ser humano é uma máquina?

Do enrijecimento simulado à tempera quântica

SEGUNDA PARTE: MILAGRES

Capítulo 10: A solução insolúvel

Bruxelas, outubro de 1930 - A nova substância primordial: não mais a matéria, porém a informação

Capítulo 11: EPR: procurado vivo e morto

Contando chumbinhos - Tanto onda como partícula

Capítulo 12: *E Unus Pluribus* - De um mistério saem muitos

Dualidade partícula-onda - Contextualidade - Indeterminismo - Acaso absoluto - Falta trajetórias *versus*... - ...superposição - Tunelamento - Pirâmides mágicas - Superposição de amônia: escorrimientos quânticos - Muitos correrão de uma parte para outra (e o conhecimento será multiplicado) - Daniel 12,4 - Veja só que boas vibrações

Capítulo 13: Estranho em uma terra estranha (Quanto mais estranho, melhor)

Informação máxima - O restante de todos os mundos possíveis - A meditação zen e a arte da computação quântica

Capítulo 14: Na matéria da mente

Tem alguém aí? - Não foi por acaso - A célula da célula - Redes de microtúbulos; microtúbulos como redes - A conexão de Langton para os autônomos celulares - Os detalhes diabólicos - A construção de um cérebro de microtúbulos

Capítulo 15: O computador proteano

Biologia quântica - Computadores quânticos do segundo modelo - O origami orgânico - Através do espelho... outra vez - Fantástico e confuso - Tunelamento e quiralidade - Vibrações melhores - Relâmpagos quanticamente lubrificadas - São os elétrons que fazem, mas os prótons também fazem - A evolução é um algoritmo genético quântico? - Vamos voltar ao Bob

Capítulo 16: Um brinde à sorte inconstante, e que o caos julgue a disputa!

O caos clássico - Toque de novo, Sam... e de novo, e mais uma vez... - Batidas de asas - Oscilações acopladas: estranhamente atraídas para você... - Um retrato de Poincaré - Caos e rotação - A vida, o cérebro e o córtex - O caos é um velho amigo meu - E a ordem brotou da desordem: a versão quântica do caos - O estriamento quântico - O mundo em um pequeno grão de areia - O grande momento do *quantum*

Capítulo 17: Ondulações quânticas

Deus - O livre-arbítrio - Consciência - Moralidade - Religião e crença - O futuro - Sociedade

Apêndice A: A mais simples rede de Hopfield e o “microcircuito cortical canônico”

Apêndice B: O modelo microtubular de Tuszynski

Tubular!

Apêndice C: Coerência e decoerência

Coerência

Notas

Créditos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que tornaram este livro possível e que me permitiram sentir grande alegria durante o tempo que levei em seu processo de redação e publicação. Michael Kellman, da Universidade de Oregon, fez-me uma série de sugestões e comentários inteligentes, que incorporei com gratidão no decorrer da obra. Mas sinto-me particularmente agradecido a ele por sua percepção da ciência em geral - e por sua compreensão do mundo em que vivemos. Rama-muri Shankar, da Universidade de Yale, conseguiu arranjar um pouco de tempo em sua agenda concorridíssima e me auxiliou construtivamente em trechos-chave do texto sobre Mecânica Quântica. Do mesmo modo que sempre ocorre em suas aulas e em seus próprios escritos, seus comentários foram espirituosos e sutis. Brian Fallon, cientista da Universidade de Columbia, envolvido em pesquisas psiquiátricas, teve a gentileza de ler o original manuscrito e incompleto - uma façanha nada fácil - e apresentou um grande número de sugestões extremamente úteis para a redação final. Sou a grato também a Eric Remole que, muitos anos atrás, me apresentou às redes neurais.

Ao longo deste livro, tive como preocupação constante manter o equilíbrio entre os diferentes requisitos dos leigos e os de profissionais da área. Ainda no princípio, James Segelstein, meu amigo há muitos anos, me ajudou a seguir a trilha certa com relação à compreensão do primeiro grupo; de forma semelhante, Gerd Kunde, da Universidade de Yale, ressaltou os problemas que eu poderia encontrar com os leitores do segundo grupo.

Gostaria que tivesse sido possível encontrar-me pessoalmente com a maioria das pessoas que aqui são referenciadas. Agradeço pelo tempo que me foi concedido, no início desse projeto, por Stuart Hameroff, da Universidade do Arizona. Em uma visita intensa, embora breve, Yael Maguire e Jason Taylor, do Laboratório de Mídia do MIT, o Instituto de Tecnologia de Massachusetts, muito me ensinaram e me deixaram consciente de como são excitantes todas as diversas coisas que ainda tenho de aprender e que não cheguei a incluir neste volume. Ron Weiss, que trabalha no MIT, na área de computação biológica, apresentou breves visões tantalizadoras de quão rapidamente as tecnologias de computação em nível molecular vêm surgindo. Roz Picard, também do Laboratório de Mídia do MIT, o espírito-guia por trás do desenvolvimento da “computação afetiva”, foi especialmente generosa com seu tempo, profissional e

pessoalmente, e me sinto profundamente grato - bem como à minha filha Annie, que conseguiu realizar uma leitura no futuro da robótica para sua monografia de ciências. Não posso esquecer de registrar aqui as personalidades cintilantes de Cynthia Breazeal e sua criação robótica, chamada Kismet. Foi um prazer conversar com as duas.

Também me sinto grato pela assistência de minhas agentes literárias, Janis Vallely e Martha Kaplan, e pela excelente revisão de Stephen S. Power, da Editora Wiley.

Devo um agradecimento, embora atrasado, a Richard Feynman, que me inspirou quando eu era criança, e até hoje me ajuda a conservar meus sonhos. Se realmente existe um céu cuja crença desdenhava, então ele merece estar lá, e deve ter se divertido muito ao descobrir que a última piada foi à sua custa.

Agradeço à minha esposa Julie, que me amparou tremendamente, como sempre. Além de sua agenda cheia de responsabilidades, envolvendo a educação de uma filha de 3 anos e um marido distraído, ela teve o trabalho adicional de ler meu manuscrito em seus diversos estágios, eliminando as redundâncias e esclarecendo os pontos mais confusos. Ela é a verdadeira inspiração que se acha nas páginas deste livro e incentivadora de muitas outras coisas também - desde o tempo em que fazíamos longas refeições matinais em Avalon, Houston, Texas, 20 anos atrás.

Este livro é dedicado à minha mãe, Sena Satinover, e a meu pai, Joseph Satinover. No entanto, penso que o melhor agradecimento que ainda posso lhes fazer é o que eles me ensinaram. O melhor presente que posso dar aos meus próprios filhos é o que meus pais me deram.

Primeira Parte

O Cérebro Quântico

INTRODUÇÃO: a crise quântica

*Nossa imaginação está agora expandida o máximo possível, não por meio da ficção, em que imaginamos coisas que realmente não se encontram ali, mas
tão-somente para
compreender as coisas que, de fato, se encontram à nossa volta.*
- Richard P. Feynman, *The character of physical law* (1999)

Este livro conta a história de uma revolução que transformará nosso mundo e também a todos nós, de uma maneira que já reuniu neurobiólogos, psiquiatras, cientistas da computação, físicos e matemáticos em uma competição sem precedentes, acalentada mais por puro entusiasmo do que por um plano diretor. Esta competição tem duas metas interdigitadoras: alcançar uma compreensão cada vez mais precisa - e, a partir dela, obter o controle - do cérebro humano, com o intuito de se criarem cérebros sintéticos cada vez mais poderosos. Estamos, neste momento, nos aproximando dessas duas metas com velocidade crescente, na medida em que a corrida para atingir um dos alvos confere maior energia à corrida em direção ao outro. Podemos, assim, perceber de uma maneira mais clara que as duas metas, em última análise, nos conduzem ao mundo misterioso da *mecânica quântica*.

Quando a poeira baixar, esta revolução, naturalmente, produzirá imensos avanços tanto nas ciências como na tecnologia. Os cientistas do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, como os cientistas de outros institutos, por exemplo, já estão planejando uma nova internet que funcione como um único computador quântico de alcance mundial. Mas as ideias que permitirão que essa tecnologia venha a se desenvolver representam uma revolução no entendimento que temos de nós próprios, da vida em geral e até mesmo de Deus.

Iluminismo

Nossa busca por compreender o funcionamento do cérebro humano tem avançado do mesmo modo que todo o pensamento científico desde a Era do Iluminismo: presume-se que não exista nada no cérebro (de fato, nada em qualquer ponto do Universo) que seja mais do que uma *máquina*, nem o cérebro nem a mente possuem algo de espiritual ou de insubstancial; o que quer dizer que não existe qualquer alma dentro do ser humano, mas apenas uma coleção de objetos físicos, afetando uns aos outros por meio de forças impessoais. Os estados mentais que se desenvolvem a partir desses objetos, por mais complicados que demonstrem ser, são completamente determinados pelos estados que ali estiveram presentes anteriormente. Em outras palavras, significa dizer que é um jogo de bilhar sem jogadores, sem vitória ou derrota, sem marcar pontos - um jogo absolutamente sem sentido.

As partículas que fazem parte do cérebro humano, colocadas em movimento no *Big Bang* a Grande Explosão, não possuem a mínima liberdade de ação, nem sozinhas nem em conjunto. Tudo é uma ilusão: que possamos pensar a respeito de nós próprios como sendo “agentes livres”, que tenhamos “mentes” capazes de “escolher”; sem dúvida, é a própria constatação de que *z pensamos pensar*. O que gostamos de chamar de “vontade” é, quando muito, o produto colateral inevitável das interações mecânicas das diversas partes do cérebro. A “mente” ilusória não pode influenciar nem o que o cérebro faz nem as ações corporais que o cérebro coloca em movimento.

Os poetas, os místicos, os filósofos e os teólogos sempre insistiram em que esse jogo de bilhar universal possuía jogadores com um propósito - e seus seguidores sempre mantiveram longas discussões a respeito de quem ou o que seriam esses jogadores e qual seria o seu propósito. Todavia, desde o início do Iluminismo, a ciência apresenta argumentos de que é impossível e desnecessário saber se a tacada inicial foi realizada pelo capitão de uma equipe de bilhar cósmico, capaz fazer uma previsão incomparável, ou se teria sido feita por um amador com grande senso de humor. Qualquer que seja a hipótese, o taco já foi abandonado há muito tempo e está esquecido, empoeirado, num canto do salão; o jogador também já foi embora há milênios, e as jogadas, a mesa e a partida seguem sem controle. O salão de bilhar está vazio, porém ninguém se lembrou de apagar as lâmpadas de néon. Nas palavras da astrônoma Margaret Geller, da

Universidade de Harvard: “Por que motivo o Universo deveria ter um propósito? Mas qual seria esse propósito? Se ele é apenas um sistema físico, que propósito poderia ter?”¹

Durante milênios, os seres humanos olharam para o Universo como sendo um sistema orientado, proposital e repleto de significado, mas suas operações permaneceram misteriosas. Assim que surgiu a ciência, o Universo rapidamente começou a revelar seus segredos. A ciência, ao mudar de uma forma tão absoluta um ponto de vista de que nem a vida nem os seres humanos se acham isentos, descobriu em si a capacidade de invadir até mesmo os mistérios da mente humana, que anteriormente pareciam ser os mais impenetráveis: a aprendizagem, a inteligência, a intuição - que, atualmente, podem ser compreendidos em termos inteiramente mecânicos. E foi além: esses mistérios já estão sendo imitados por máquinas fabricadas pela mão do homem. De uma maneira mais poderosa do que quaisquer descobertas científicas anteriores, a abertura do cérebro humano parece confirmar a hipótese científica de que tudo - inclusive a mente humana - não passa de uma máquina.

Steven Weinberg, vencedor do Prêmio Nobel de Física em 1979 e um porta-voz eloquente da visão mecanicista, descreveu a situação com as seguintes palavras: “Quanto mais o Universo parece se tornar compreensível, mais dá a impressão de ser desprovido de sentido”.² E conclui: “Seria maravilhoso descobrir nas leis da natureza um plano preparado por um criador interessado, um plano dentro do qual os seres humanos tivessem alguma função especial para exercer. Para mim é motivo de tristeza duvidar que isso jamais seja descoberto. [...] E não me parece útil identificar as leis da natureza, como fez Einstein, com alguma espécie de Deus remoto e desinteressado. Quanto mais refinamos a nossa compreensão de Deus, a fim de tornar tal conceito plausível, tanto mais este conceito parece estar desprovido de sentido”.³

A ideia de que todo o Universo nada mais é do que um “sistema físico” - isto é, uma máquina - que se desenvolve mecanicamente, de acordo com leis rígidas e imutáveis, começou como sendo uma heresia radical, uma heresia que havia surgido dentro de algumas mentes corajosas. Tendo esta ideia como seu ponto de partida, esses pensadores e seus seguidores começaram a experimentar uma corrente ininterrupta de sucessos. Não existe um único dispositivo médico em funcionamento, nenhum tratamento, nenhum veículo, nenhuma tecnologia de comunicação, uma indústria que não esteja alicerçada sobre esse pressuposto. No período que compreende a época em que viveu Galileu e o final do século XX, o que um dia foi uma heresia radical se transformou em uma visão do mundo compartilhada por bilhões de pessoas (quer elas percebam, quer não). Mesmo vindo de tão longe, esta transformação chegou aos Estados Unidos, e, embora

antigamente fosse um requisito em qualquer departamento de uma universidade respeitada que um professor fosse “um homem de Deus”, hoje se tornou bastante embaraçoso que um deles admita levar a sério esse conceito. O famoso zoólogo evolutivo Richard Dawkins afirmou que qualquer pessoa que acredite em um deus criador é simplesmente “um analfabeto científico”. No fim do século XIX, os cientistas acreditavam haver descoberto praticamente todas as leis fundamentais da física, leis que eram puramente mecanicistas devido às suas interações mecânicas (por mais complicado e difícil que, na prática, fosse entender e acompanhar sua aplicação), pelas quais surgiam todos os fenômenos que experimentamos. A própria matéria viva era compreendida como sendo uma fábrica especialmente complicada de máquinas moleculares.

Torna-se desnecessário dizer que havia (e ainda há) um grande número de pessoas que achava esta visão da realidade horivelmente lúgubre. A maioria entendia muito pouco a respeito das sutilezas do ponto de vista mecanicista sobre a vida e compreendia muito mal o método científico, para poder emitir uma opinião exata, sem jamais experimentar de uma maneira responsável o poder de suas afirmações. Todavia, existiam algumas pessoas que entendiam perfeitamente o seu poder e esperavam que, em alguma oportunidade, esse ponto de vista pudesse ser, de algum modo, demonstrado como incorreto. Esperavam, em outras palavras, que um dia os próprios cientistas pudessem descobrir uma lei fundamental do Universo que *não fosse* inteiramente mecânica, mas que, de alguma forma, pudesse ser demonstrada como “livre”. Essas esperanças foram reaquecidas com o surgimento de uma estranha teoria, que recebeu o nome *mecânica quântica*.

Anseios quânticos Mesmo que seja verdade que, na virada do século XIX para o XX, quase todos os fenômenos físicos fundamentais já tivessem sido compreendidos, restaram três que resistiam a uma explicação dentro do ponto de vista mecanicista da Natureza. E claro que nenhum deles parecia apresentar grandes implicações quanto à natureza do homem, do livre-arbítrio, da vida ou de Deus. Além disso, para os leigos, eram totalmente desinteressantes.

- Por que um núcleo radioativo cospe uma partícula alfa *agora*, mas não *antes*, de uma forma totalmente aleatória? (O ponto de vista mecanicista previa a necessidade de haver algum tipo de relógio interno e com funcionamento regular que determinasse o momento exato de sua partida; porém, não existe nenhum.) - Se você aquecer algum objeto completamente negro - uma bola de boliche, por exemplo -, por que o calor irradiado é

sempre invisível e por que a energia dispensada é sempre em forma de *calor*, isto é, “radiação infravermelha” com a mesma distribuição exata dentro do espectro das “cores” infravermelhas? (O ponto de vista mecanicista prediz que, quanto mais quente fosse a bola de boliche, tanto maior seria a energia irradiada, a qual, portanto, deveria aparecer na forma de luz visível, começando pelo vermelho e percorrendo todas as cores do arco-íris, até chegar ao ultravioleta. Observação: não estamos falando em aquecer a bola ao ponto de que ela adquira luz própria!) - Se você projetar uma luz sobre um metal, ele irradiará elétrons - o chamado “efeito fotoelétrico”. Se a cor for a correta para esse metal, ou seja, *na direção da parte azul do espectro visível* um elétron será sempre expelido *imediatamente*, não importa qual seja a intensidade dessa luz (forte ou fraca). No entanto, se a cor da luz tender para a extremidade vermelha do espectro, não importa que a projeção tenha a intensidade de um *laser* industrial - *nunca* será emitido um elétron. Mas por quê? O ponto de vista mecanicista prediz que, desde que você projete luz suficiente - e é obrigatório que exista um mínimo de luz -, nem a cor nem a intensidade do feixe luminoso devem ter importância.

Essas não parecem ser dúvidas capazes de abalar a Terra em seus alicerces. Porém, quando os cientistas finalmente descobriram as respostas, a maioria recebeu um tremendo choque, enquanto alguns experimentaram uma imensa esperança, pois a teoria que foi capaz de resolver esses dilemas - *a mecânica quântica* - apresentou as seguintes respostas dignas do Oráculo de Delfos.

Absolutamente nada, em todo o universo físico, "ocasiona" que uma partícula alfa pule fora de seu núcleo no momento em que faz esse movimento. Ela simplesmente pula fora “no momento em que quiser”. E não é apenas isso: uma partícula escapa, independentemente do fato de que a barreira que a conserva no interior do núcleo seja forte demais para que ela consiga sair. Se o mundo fosse realmente tão organizado como os cientistas haviam pensado, uma partícula alfa *não deveria nunca* ser capaz de escapar de seu núcleo, da mesma maneira que seria muito difícil, até mesmo impossível, um prisioneiro de Alcatraz aparecer instantaneamente em São Francisco.

Os corpos negros e quentes são negros porque a energia existe em unidades discretas. Isso não parece estranho, mas equivale a descobrir que o tempo apenas existe em unidades de uma hora cada uma, de tal modo que você nunca pudesse sentir, muito menos medir, a passagem do tempo durante uma hora. O tempo simplesmente pularia de uma hora para a seguinte.

Um feixe de luz da cor certa, não importa quão fraco seja, gera

instantaneamente eletricidade em um metal porque, *mesmo que a luz se espalhe como se fosse apenas energia, ela é, ao mesmo tempo, uma partícula semelhante a uma bola de bilhar; com força bastante para chutar um elétron para fora de sua órbita*. Mas, se a cor não for correta, ou se a intensidade da luz for baixa demais, o número de partículas que você queria jogar contra o metal não tem a menor importância, porque sequer um dos elétrons irá se mexer - será como jogar milhares de bolas de pingue-pongue contra uma bola de boliche que ficou presa em um sulco, com o intuito de tirá-la dali.

No século passado, desde o momento em que foi proposta pela primeira vez, a teoria quântica originou muitos novos dilemas, conseguiu apresentar soluções para eles e, tudo considerado, demonstrou ser a teoria mais bem-sucedida em toda a história da ciência. E, enquanto se demonstrava a si própria, revelou também que, em seus fundamentos, a própria matéria não se comporta como uma máquina. As mesmas premissas mecanicistas sobre as quais a ciência foi construída talvez venham a ser derrubadas pela própria ciência. Esta constatação traz alguma esperança de um dia podermos encontrar na teoria quântica uma solução para o beco sem saída de um mundo que “tem precisamente as propriedades que deveríamos esperar dele caso não houvesse, bem lá no fundo, qualquer desígnio ou propósito, nem bem nem mal, nada, exceto uma indiferença cega e sem misericórdia”, nas palavras textuais do eminente evolucionista Richard Dawkins.

Algumas dessas saídas quânticas tomam os estranhos fenômenos encontrados na escala subatômica quântica e os aplicam inteiramente à vida humana, devido às analogias que é possível fazer entre, por exemplo, a Uberdade de escolha que nós, como seres humanos, acreditamos ter e a “Uberdade de escolha” de que os elétrons aparentemente dispõem. Muitos cientistas renomados rejeitam esse tipo de analogia porque já conhecem o suficiente sobre como os efeitos mecânicos quânticos “se escalonam para cima”, e estão convencidos de que toda e qualquer estranheza quântica não mais existirá quando estivermos lidando com agregados de “gazilhões” de partículas, numerosas o bastante para formar pessoas.

Todavia, na medida em que a moderna ciência biológica penetra na matéria viva em *nível subcelular*, em particular nos tecidos que constituem o cérebro, indubitavelmente começa a encontrar os desconcertantes efeitos quânticos que confundiram os físicos durante mais de um século. Esses efeitos não são simples analogias; são fenômenos reais e, como veremos, é somente ao estudar seu funcionamento que poderemos começar a entender os blocos de construção da vida: que esse processo transcorre desta maneira ainda não foi divulgado, de

maneira ampla, para o conhecimento da maioria dos biólogos, mas logo será divulgado entre todos. Este conhecimento provocará um efeito dramático, tanto sobre a ciência como sobre os cientistas.

Em nível subcelular, a própria matéria se parece, e se comporta (nas palavras de um físico), “mais como um pensamento” do que como as rodas dentadas de uma engrenagem. *Não existe nada no mundo que cause os saltos das partículas*, descobriram os primeiros estudiosos da mecânica quântica; mas a primeira premissa científica é a de que *tudo acontece unicamente como o resultado de causas preexistentes no mundo*. “Se tivermos de manter esses malditos saltos quânticos”, queixou-se um dos fundadores da física quântica, “então lamento profundamente ter tido qualquer coisa a ver com a criação da teoria dos *quanta*”.⁴

Além disso, se as partículas subatômicas podem escolher livremente entre surgir e desaparecer, então, talvez, todas aquelas afirmações antiquadas sobre nossa própria natureza não-mecânica não sejam assim tão ultrapassadas: subitamente, o maquinário do cérebro pode vir a se demonstrar uma ilusão, enquanto a mente e a vontade são uma realidade de caráter mais fundamental. Uma boa parte dos fundadores da mecânica quântica chegou a considerar abertamente se os antigos místicos não acabariam por ter razão, depois de tudo considerado: talvez exista um Jogador. Colocado bem mais além do mero “sistema físico”, ele estaria em toda parte, girando os átomos e cantando os números, fazendo com que tudo acontecesse *desse jeito*, e não *daquele*. Wolfgang Pauli foi um dos que pensaram assim: mesmo que pretendesse não estar falando com seriedade absoluta, ele simplesmente referiu-se ao assim chamado “princípio da exclusão”, uma das pedras angulares da física e da química modernas, pelo apelativo “Deus”.

Todavia, como identificado, a quantidade de “liberdade absoluta”, disponível de maneira individual para as partículas e peças do Universo, é incrivelmente minúscula. Ela somente é grande na escala das partículas atômicas e subatômicas. Em qualquer escala que seja grande o bastante para interessar aos negócios dos seres humanos (por exemplo, objetos do tamanho de vírus), o efeito líquido de toda essa liberdade é zero - ela simplesmente cancela a si própria. Os elétrons podem ficar pulando daqui para ali sem qualquer razão aparente, tanto quanto se possa determinar, mas os planetas não agem assim, nem os rochedos, nem os grãos de areia e nós tampouco.

Porém, ocorreu a revolução: aparentemente é possível que, em vez de cancelar a liberdade quando se tira a média dos eventos, *o cérebro humano*, embora ele mesmo seja uma máquina, desenvolveu, apesar de uma estrutura particular capaz de atrelar as “escolhas” subatômicas, estudar e fazer sua

transposição para níveis superiores, magnitude por magnitude, aproveitando em sua vantagem, como veremos, os estranhos "fatos do caos". Entre todas as coisas imagináveis, é a própria engrenagem que existe em nossa cabeça que nos deixa transcender a mecanicidade que supostamente existe dentro de todos nós.

Nossos cérebros são, se você quiser, "computadores quânticos". Mas não são do mesmo tipo que anda, ultimamente, aparecendo nas manchetes. Efeitos quânticos sutis que ocorrem no cérebro nos permitem demonstrar uma capacidade que, de outro modo, jamais teríamos; entretanto, a fim de podermos utilizar ao máximo tais efeitos, nossos cérebros naturais estão projetando agora cérebros sintéticos que consigam ser ainda melhores. Esses empregam os princípios quânticos diretamente e não, como ocorre no cérebro humano, de formas sutis e quase invisíveis. Alguns deles serão postos em liberdade a fim de evoluírem naturalmente, em um processo darwiniano, inclusive seu hardware. Todavia, se os processos quânticos são a fonte do pensamento genuíno dentro do cérebro humano - do mesmo modo que a fonte da vontade, intenção e escolhas genuínas então os computadores quânticos que estamos a ponto de projetar (ou, pelo menos, cuja evolução facilitaremos) poderão eventualmente transformar-se em seres genuinamente sencientes, isto é, conscientes de si mesmos. Eles poderão dispor de tanta inteligência como nós próprios, quem sabe até bem mais. Há limites severos para a quantidade de estranheza quântica que o cérebro humano pode empregar (e também para os tipos que possam ser utilizáveis por ele - uma distinção que iremos tornar clara); os limites quanto à quantidade e à qualidade que um cérebro sintético pode utilizar são muito menos severos. Imensos computadores sintéticos, capazes de evoluir sozinhos, superinteligentes e completamente sencientes, podem soar ainda, indubitavelmente, como pura ficção científica, mas, na realidade, já deixaram de ser e não pertencem mais a um futuro distante.

Para além dessa realidade, dentro do cérebro humano, a amplificação da liberdade quântica ocorre por meios que preservam, em nossa escala de vida diária, a aparência de que nós e nosso Universo somos completamente mecânicos. Este é um fato que causa grandes interrogações para os filósofos que procuram entender o mundo e a vida humana em termos com os quais já se achem familiarizados. Mas, para realmente entendermos aonde a ciência está nos levando, pode ser necessária a utilização de uma quantidade muito maior de disciplina intelectual e a criação de uma nova terminologia, mais envolvente do que os materialistas ferrenhos, os teístas apegados à tradição ou os adeptos da Nova Era, com suas danças, terão condições de aceitar de uma maneira confortável. *Nossa imaginação está hoje expandida ao máximo possível\ não por meio da ficção, em que imaginamos coisas que realmente não se encontram*

ali, mas sim tão-somente para compreender as coisas que, de fato, se encontram à nossa volta, são as palavras de Richard Feynman, renomado físico teórico.⁵ Muitos cientistas falam de uma “crise”, que teria sido ocasionada pelas implicações da mecânica quântica, e procuram alguma coisa “mais limpa”, que possa ser realmente mais “mecânica”, a fim de substituí-la e, desse modo, restaurar o austero reducionismo do Iluminismo. Não são poucos os que encontram aqui a confirmação de antigas noções religiosas. No entanto, existem alguns cientistas que conseguem descobrir uma coisa inteiramente nova, repleta tanto de fantásticas oportunidades como de terríveis riscos. Se a natureza humana permanecer fiel à sua história pregressa, podemos esperar que os riscos, bem como as oportunidades, se tornem reais, com muitos ganhos e muitas perdas. De qualquer modo, a compreensão de quem somos e de onde viemos, de nossa posição dentro do grande esquema das coisas do mundo e para onde vamos dá a impressão de que, muito em breve, irá sofrer uma dramática mudança.

A MENTE FORA DA MATÉRIA: a engrenagem do quarto cérebro

O cérebro é um aparelho com o qual nós pensamos que pensamos.
- Ambrose Bierce, *Dicionário do diabo* (1906)

O

cérebro não é realmente constituído por um único órgão, mas sim um conjunto vertical de órgãos nervosos, onde os mais novos ficam por cima dos mais antigos, na sequência de sua evolução, enquanto o último se espalha por todo o espaço superior. O *neocórtex* é uma chapa brilhante e amarrotada de tecido cinza pintalgado de rosa, com aproximadamente a espessura de sete milímetros. Se fosse completamente esticado, como um couro de animal em um curtume, mediria mais ou menos 45 centímetros de largura por 60 de comprimento. O couro em si é formado por seis camadas, cada uma com a espessura de 25 células. No total, o neocórtex é composto por dez a 20 bilhões de células nervosas e um número espantosamente imenso de conexões entre elas, e que também estabelecem ligações entre o neocórtex, o cérebro inferior e o corpo inteiro. Ele origina e orienta a intrincada complexidade da vida inteligente por meio de processos que são essencialmente computacionais - mas de uma espécie muito diferente daquelas que são empregadas por seu computador pessoal ou por um Mac. As máquinas computacionais do cérebro não executam programas escritos previamente. *Ele aprende sozinho, por meio da experiência e embute as lições da experiência através da reconfiguração de seu próprio hardware.*

Durante muitas décadas, presumiu-se que o córtex deveria apresentar algum tipo de “diagrama de fiação” por demais complicado, em que a função específica de cada célula cerebral e de cada conexão entre as células cerebrais fosse descrita de acordo com um plano fixo. Ao mesmo tempo, entretanto, sempre esteve claro que o cérebro não poderia ser governado por uma fiação desse tipo. As células cerebrais simplesmente eram demasiado numerosas e interconectadas de maneira extremamente densa. (Se calcularmos somente 10 bilhões de células, cada uma delas com cerca de mil conexões, já resultaria em 10 *trilhões* de conexões.) Além disso, seria quase impossível desvendar o sentido do padrão geral dessas conexões. A maioria dava a impressão de ser emaranhada e caótica; muitas células rotineiramente emitiam conexões em arco, religando-se a si

mesmas, originando o que, sem dúvida, daria origem a “arcos infinitos”.

Mesmo se houvesse algum tipo de plano diretor, a quantidade de informações necessárias para codificar um esquema tão complexo excederia a capacidade de informação do próprio cérebro, isso desconsiderando-se a capacidade codificadora do DNA. De qualquer maneira, como esse órgão tão complexo poderia ser *montado fisicamente* - especialmente em uma escala tão microscópica - apenas em nove meses?

A resposta, recentemente revelada, surpreendeu a todos. As conexões do cérebro são, de fato, em sua maioria, *aleatórias*. Porém, contrariando o que o bom senso nos diria, esse sistema totalmente casual / *capaz* de inteligência. De fato, é capaz de um grau mais elevado de inteligência - ou, mais precisamente, de uma *espécie* superior de inteligência - do que esquemas deliberadamente projetados. De maneira simples, acontece que esse emaranhado caótico confere a um piloto de caça humano, realizando suas manobras de combate a velocidades supersônicas, a capacidade de fazer o que atualmente um computador formado por um quarto de bilhão de dólares de elementos eletrônicos de alta tecnologia ainda não consegue. Provavelmente, esse equipamento será capaz de realizar esse procedimento muito em breve, mas somente porque seus projetistas estão agora dispostos, tornando-se capazes de deixar que a massa de aparelhos eletrônicos que formam o computador assumam seu próprio treinamento, do mesmo modo que os cérebros humanos fazem.

Sistemas semelhantes ao cérebro são capazes de *organizar a si próprios* em níveis cada vez mais elevados de capacidade de processamento de informações. A inteligência global, como veremos nas páginas seguintes, emerge de baixo para cima, a partir de interações de caráter puramente local — e, por “global”, poderemos considerar o *globo inteiro*. E como se a verdadeira inteligência que guia a economia norte-americana não residisse nos formadores de políticas de Washington, DC, mas estivesse espalhada por toda parte, nas conversas dos motoristas de caminhões durante a madrugada, em áreas de estacionamento; nas perguntas de clientes e nas respostas dos comerciários; ou, mesmo, na conversa amigável entre vizinhos a respeito de seus aluguéis e hipotecas. Desse modo, também, a verdadeira inteligência do cérebro humano individual não reside em algum projeto central determinado *pelo seu* DNA, mas nas interações eventuais de um neurônio com seus vizinhos (ou por meio de trocas de longa distância, como se funcionasse como a internet percorrendo todas as células do cérebro).

E funciona da forma inversa também. É evidente que o bloco de construção fundamental de um “sistema nervoso” é um único “nervo”; portanto, um neurônio. Mas os neurocientistas insistem, já há bastante tempo, em que não

existe qualquer unidade de processamento de informações menor do que esta nas complexas formas de vida terrestres. E claro que as bactérias e outras criaturas unicelulares, e criaturas desprovidas de um sistema nervoso também processam informações, de um jeito muito peculiar. Porém, esses processos rudimentares, segundo se alega, não têm a menor relação com a inteligência humana. Veremos, não obstante, que, no interior de cada neurônio, ocorre um conjunto igualmente complexo de eventos computacionais que, de maneira semelhante, podem ser chamados de “inteligentes”, e que se utilizam dos mesmos princípios de autotreinamento espontâneo que guiam o desenvolvimento do cérebro como um todo. Subindo e descendo a escala, desde os menores elementos no interior de uma célula nervosa humana, cujo estudo seja tecnicamente possível, até o funcionamento de toda a sociedade humana, a ordem emerge do caos de acordo com o mesmo conjunto de princípios básicos.

Isso nos parece quase impossível, mas, para começarmos a entender a maneira como funcionam esses processos - bem como para compreendermos o alcance do poder sobre o qual estamos falando -, iremos construir também um cérebro em miniatura, pequeno, mas capaz de aprender sozinho; para realizar esta tarefa, iremos precisar apenas de algumas dúzias de caixas de fósforos e algumas bolinhas de vidro.

O cérebro em uma caixinha de fósforos

O Jogo da Velha é bastante primário e aborrecido porque obedece a um conjunto muito simples de regras do tipo *if-then*, que faz com que seja impossível perder - em jargão computacional, um “algoritmo” simples.

1.1.1 Se você for o "X",
Escreva X em um dos cantos

1.2.1. Se "O" responder no centro,
Escreva X no canto diagonal oposto

1.2.2 Se "O" responder em uma lateral,
Escreva X em um canto não-diagonal

1.2.3 Se "O" responder no canto diagonal Escreva...
Escreva...

Por um lado, a única razão por que o jogo se mostrava interessante antigamente é o fato de que nossos pais não foram cruéis o bastante para nos ensinar o algoritmo desde o princípio. Por outro lado, apenas uma minoria que joga o jogo com perfeição realmente parou para pensar e escrever o algoritmo.

De fato, a maioria das pessoas sequer seria capaz de descrever as regras imediatamente, caso fosse pedido, mesmo que nunca perdesse uma partida de Jogo da Velha. Então, como foi que nós *aprendemos* o algoritmo? Podemos honestamente afirmar que aprendemos apenas porque hoje nós *sabemos* como é? E, caso não possamos realmente dizer que sabemos, embora joguemos sempre de acordo como as regras determinam, exatamente *onde* ele existe em nosso cérebro e *em que formato*? Estamos falando sobre que tipo de aprendizagem?

Aprendemos a jogar o Jogo da Velha da seguinte maneira: experimentamos primeiro uma maneira e depois outra. Alguns movimentos são tão ruins que, cada vez que os experimentamos, perdemos a partida. Desse modo, sem saber na verdade o que estamos fazendo, tentamos alguma outra coisa - de forma aleatória. Se os resultados parecerem melhores, experimentamos outra vez. Em pouco tempo, descobrimos (em idioma “computadorês”) uma “heurística”, uma linha prática de orientação que, em média, produz melhores resultados do que não ter nenhum caminho para nos orientar ou fazer somente movimentos casuais. Esta heurística é alguma coisa sobre a qual raramente pensamos de forma direta, e pode até ser que nunca a expressemos em palavras.

Jogando de acordo com a nossa heurística não declarada, vamos ficando cada vez melhores no controle do jogo, modificando a heurística aos poucos, para evitar derrotas e alcançar vitórias. Eventualmente, a heurística “converge” em um algoritmo completo, nossa técnica de jogo se torna perfeita e desistimos do Jogo da Velha, trocando-o por gamão ou xadrez ou pela a compra e venda de *commodities* na Bolsa.

Perdendo o controle: jogo e empate com "HER"

Há quase 30 anos, em uma coluna da revista *Scientific American* a respeito de aprendizagem mecânica, Martin Gardner descreveu a maneira de construir um dispositivo, com 25 caixas de fósforos e 116 pastilhas comestíveis, capaz de aprender a jogar sozinho um jogo simples baseado no xadrez que ele denominou “Hexapawn”¹ [do grego *hexa* e do inglês *pawn*, ou “seis peões”]. Como o Jogo da Velha, o Hexapawn utiliza um tabuleiro de três casas por três (veja a Figura 1-1). Nele são utilizados também apenas peões, que obedecem às mesmas regras dos peões do jogo de xadrez (veja a Caixa de Texto).

O jogo pode ser rapidamente analisado para ser jogado com perfeição, o que, conforme Gardner aconselha, *não deve ser feito*. Se você *não analisar*, irá progressivamente alcançando percepções sobre os princípios da aprendizagem espontânea. Nos 30 anos que transcorreram, desde que Gardner publicou sua coluna, esses mesmos princípios foram estendidos para enigmas (desde jogos até

complexos fenômenos físicos) que seriam impossíveis de analisar, ou devido à sua própria complexidade (como o próprio xadrez) ou porque envolvem equações insolúveis (como ocorre na modelagem de certos fenômenos físicos, tais como a turbulência fluida). O argumento é que a automatização de uma solução não requer que entendamos o problema completamente antes de trabalhar com ele (como pode acontecer no Hexapawn).

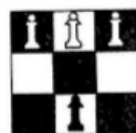


FIGURA 1-1. O Hexapawn, de Martin Gardner. Início do jogo.

Regras para o Hexapawn, de Martin Gardner:

- ▶ Alternando as casas negras e as brancas, de acordo com as regras básicas do xadrez, um peão pode mover-se:
 1. uma casa para a frente, a fim de ocupar um quadrado vazio diretamente à sua frente;
 2. diagonalmente para a frente, uma casa de cada vez, visando a capturar um peão inimigo que esteja ocupando essa casa.
- ▶ A captura *en passant* (um movimento especial do xadrez, em que um peão avança uma casa de sua posição inicial e dobra na diagonal para a captura do peão oposto), avançar duas casas para a frente ao mesmo tempo ou a promoção de peões são lances impossíveis ou proibidos.
- ▶ As brancas iniciam a partida.
- ▶ A partida é vencida quando:
 1. qualquer peão, de qualquer lado, atinge a linha de partida do oponente;
 2. um dos lados captura todas as peças do inimigo;
 3. um dos lados bloqueia o outro completamente, impedindo que possa realizar qualquer outro movimento.

Você pode construir uma *Hexapawn Educable Robot* [robô educável para jogar Hexapawn] ou “HER” com 25 caixas de fósforos e 116 pastilhas de gelatina (por exemplo, balinhas Tic-Tac): 50 vermelhas, 46 azuis, 16 amarelas e 4 pretas. Presuma que você sempre faz o primeiro movimento e que HER, portanto, somente poderá fazer os movimentos pares. Na tampa de cada caixa de fósforos [ou em pedaços de cartolina quadrados], desenhe uma das 25 (únicas) configurações do tabuleiro possíveis no jogo após os seus movimentos, desde o começo até o final (HER executará o segundo, quarto e sexto movimentos). [O criador do jogo refere-se ao robô sempre no feminino, o que já é indicado pelo

pronome em inglês.]

Conforme é mostrado na Figura 1-2, represente os movimentos possíveis para HER por flechas numeradas da esquerda para a direita. Enquanto HER não tiver perdido a partida, sempre poderá escolher entre, no mínimo, um e, no máximo, quatro movimentos. Você pode colorir as setas para tornar o código mais fácil de ser percebido. O primeiro movimento possível (o mais à esquerda) pode ser representado por uma flecha vermelha; o segundo, por uma seta azul; o terceiro, por uma amarela; e o quarto, por uma preta.

Agora, sobre cada casa da caixa de fósforos, coloque *duas* pastilhas da cor ou das cores correspondentes a cada movimento disponível: duas balinhas vermelhas, caso apenas um movimento seja possível; duas vermelhas e duas azuis, se dois movimentos estiverem disponíveis; duas vermelhas, duas azuis e duas amarelas, caso três movimentos possam ser executados; e duas vermelhas, duas azuis, duas amarelas e duas pretas, quando existir uma escolha entre quatro movimentos.

O jogo se realiza da seguinte maneira: faça seu primeiro movimento com as casas brancas. Crie um movimento para HER (uma das opções de movimentos que se encontram na Figura 1-2), escolhendo uma pastilha ao acaso da caixa de fósforos que corresponda ao estado do tabuleiro. Faça o movimento indicado e coloque a pastilha em cima do pacote de onde saiu. (Não a coloque de volta na caixa de fósforos. E não a coma.) Realize seu próximo lance. Crie outro movimento para HER, e assim sucessivamente. Uma vez que os movimentos de HER são totalmente aleatórios, Gardner observou que “(...) HER é uma idiota”. No entanto, ela é educável - ou, mais precisamente, pode ser treinada - e logo se tornará tão esperta quanto você (possivelmente, até mais do que você), pelo menos em relação ao jogo de Hexapawn. A chave de seu progresso é a maneira como você a trata no final de cada partida: a “regra da aprendizagem”. A *regra da aprendizagem de Gardner* é a seguinte:

1. se HER vencer, recoloca ***todas as pastilhas*** nas casas;
2. se HER perder, coma (ou elimine de alguma outra maneira) a pastilha que veio da casa ocupada por seu último movimento. Substitua todas as demais.

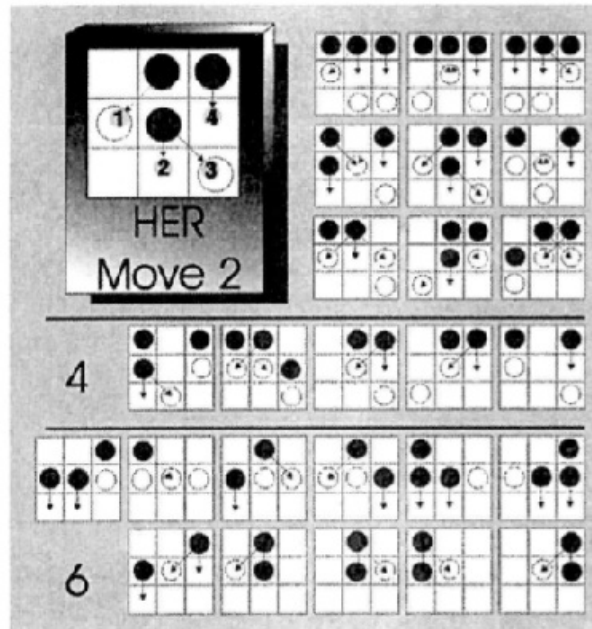


FIGURA 1-2. HER, o robô educável por Hexapawn. Cada caixa de fósforos é rotulada com uma configuração de tabuleiro, e setas que indicam as respostas que o robô pode dar. Cada resposta possível é representada por pastilhas coloridas, colocadas nas casas dos tabuleiros. As quatro cores – vermelha, azul, amarela e preta – são representadas no diagrama pelos algarismos de 1 (alta) a 4, denominando as setas da esquerda para a direita.

Observe que, obedecendo a esta regra de aprendizagem, HER *somente aprende quando perde*. Podemos supor, assim, que HER considere ser bom ganhar, mas as vitórias são inúteis para sua educação. (Vamos entender mais sobre essa questão em breve.) HER executa seu primeiro movimento de uma forma totalmente aleatória. Mas logo os movimentos fatais permitem que as pastilhas sejam comidas, e o registro ganha/perde de HER melhora [porque foi registrado na memória do computador]. E o jogo é só isso. Você não precisa dizer a HER quais movimentos são os melhores ou lhe explicar a estratégia do jogo. Executando movimentos ao acaso, HER “aprende” por meio da experiência. Ela “converge” para a perfeição imperfeitamente, algumas vezes melhorando, outras piorando, “dois passos para a frente, um para trás” (como nós fazemos com relação à maioria das coisas); porém, no final, se você estivesse jogando com HER por um dólar a partida, ela terminaria por “limpar” sua carteira, conforme ilustra a Figura 1-3a.

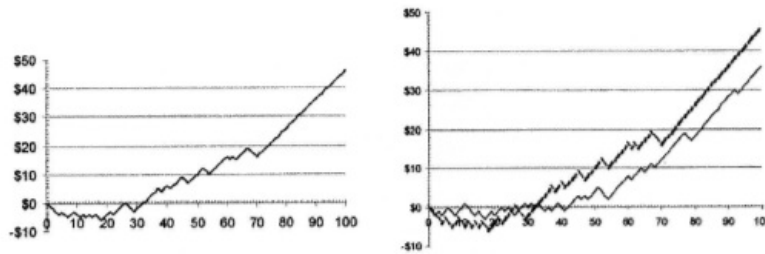


FIGURA 1-3. (a) Relação de cem partidas jogadas por HER em regime exclusivo de punição. (b) Regras de aprendizagem de somente punição (linha sólida) versus recompensa e castigo (linha pontilhada).

Não existe nenhuma razão para se ensinar estratégia para HER, pois há uma retroalimentação constante do ambiente. As derrotas têm consequências diferentes das vitórias. Não há nada criativo, perceptivo, auto-reflexivo ou astuto em relação à “inteligência” que possa vir a ser adquirida pelo dispositivo; assim, nenhum “pensamento crítico” é necessário. Sem dúvida, o processo de pensamento é inteiramente mecânico e decorado. Grandes descobertas (tendências a avanços de maior alcance) quase sempre só acontecem após uma série de tentativas e erros. Finalmente, HER não somente tolera a casualidade: ela a emprega em proveito próprio. *Caso ela conseguisse, de algum modo, evitar incursões cegas que conduzissem a fracassos eventuais, não poderia aprender coisa alguma.* Nós, tampouco.

Durante os anos em que trabalhei como psiquiatra, tratei de muitos indivíduos extremamente “bem-sucedidos”, mas que haviam desabado depois de enfrentar revezes mais sérios, e se consideravam “fracassados”. Essa constatação me levou a aprender a seguinte lição: as pessoas que *realmente* se dão bem na vida, aquelas que obtêm os maiores sucessos, *passaram por trilhas muito acidentadas*, cheias de altos e baixos, manchadas por eventos que consideraram como sérias “perdas”. Para elas, o sucesso não é definido por um padrão externo e objetivo, invariável de pessoa para pessoa, mas sim por aquele nível de auto-realização que os próprias pessoas experimentam como inequivocamente satisfatório (e que, muitas vezes, também coincide com o que as outras pessoas consideram como provas de sucesso, embora isso não seja absolutamente necessário).

De maneira geral, as pessoas que apresentam um histórico quase perfeito, uma carreira notável segundo os padrões “objetivos”, sofrem de duas aflições. Em primeiro lugar, são por demais sensíveis ao fracasso (motivo por que, caso se vejam confrontadas por ele, entram naquele tipo de “parafuso” que as leva ao meu consultório); em segundo, consideram que nunca conseguiram realmente

exercer todo o seu potencial, mesmo quando não estavam em crise. *E elas estão corretas*, contrariamente a todos esses processos de construção de auto-estima orientados por terapeutas de bom coração e cheios de humanidade, mas que se revelam totalmente inúteis e que constituem uma parte substancial das “terapias” que crescem hoje em dia.

Na realidade, uma exposição decente ao fracasso, durante um período longo o suficiente, não apenas nos protege contra um colapso emocional como também nos permite tentar atitudes novas capazes de expandir a nossa potencialidade. Se você não é capaz de absorver um fracasso, não será capaz de alcançar o sucesso. As curvas de aprendizagem de maior ascensão (mesmo que sejam medidas com relação a um padrão que varia de pessoa para pessoa) ocorrem quando sérias perdas são permitidas, e não evitadas. Quando evitamos a perda ou a derrota, podemos estar nos dando muito bem de acordo com os padrões mundanos, mas, intimamente, *nós sabemos que nos portamos covardemente*. Desse modo, não podemos experimentar a alegria de uma realização genuína - e, de fato, nem deveríamos proceder desse modo.

E claro que não aprendemos *apenas* com o fracasso; obviamente, o sucesso também ajuda a aprender. Desse modo, depois de termos aprendido alguma coisa a respeito do comportamento humano com HER, quem sabe aplicamos o que sabemos a respeito das pessoas para treinar a nossa máquina? Vamos comparar o regime original de aprendizagem exclusiva por derrotas com um novo processo em que também recompensamos HER, quando *ela vence*, *acrescentando* balinhas à casa em que foi executado o seu último movimento (veja Figura 1-3b).

Verificamos que, se o objetivo é treinar HER rapidamente, até que ela adquira perfeito domínio do jogo, então uma regra de aprendizagem baseada exclusivamente em punição funciona melhor do que um processo de recompensa e castigo. Mas, se o objetivo for maximizar o número de partidas vencidas em um torneio de duração relativamente curta (entre 12 e 30 partidas), então um regime de recompensa e castigo é melhor. Essa relação não vai funcionar em todas as circunstâncias, pois vai depender das características específicas do computador em que estiver instalada a máquina de aprendizagem e de sua “regra de aprendizagem”. Porém, salienta um princípio importante. O “melhor” método de educação somente pode ser definido com respeito a uma definição exata de qual seja o objetivo dessa.

HERCULES, também conhecido como Criação de Robôs

Já podemos criar “cópias” múltiplas dos superconjuntos de HER e fazer com que as várias regras de aprendizagem que irão aparecer *entrem em competição umas com as outras*.

Os superconjuntos que conduzissem a uma derrota seriam removidos da competição; depois, pegariamos as regras dos que sobraram, juntariamos todas como se fossem cartas, as embaralhariamos e as cortariamos ao acaso, a fim de criar novas “gerações” de superconjuntos de HER - por exemplo, a metade que sofreu punições dentro de uma regra de aprendizagem poderia ser misturada com a metade recompensada de outra.

A partir desse momento, nós colocaríamos *estas* cartas para competir umas com as outras e contra seus “pais”. (Ai de nós, a vida no mundo HER é malvada, brutal e curta.) Desta forma, não somente tropeçaríamos em boas ideias, por meio de variações aleatórias, como poderíamos *evoluir* em regras cada vez melhores. (A formalização matemática desse tipo de busca de soluções é denominada “algoritmo genético”; a formalização matemática de programação de computadores otimizada desta maneira é chamada de “programação evolutiva”.)

E claro que nós também vamos querer introduzir uma certa proporção de “mutações casuais” no embaralhamento de regras de aprendizagem, a fim de permitir o surgimento de características totalmente novas, e não apenas combinações das preexistentes. Além disso, iremos criar regras portadoras de diferentes “fragilidades” - isto é, mutações aleatórias de regras de aprendizagem com diferentes frequências médias, de tal modo que provoquem a evolução de uma taxa de mutações que possa otimizar o próprio processo evolutivo.

Em resumo, HER terminará sendo apenas uma “célula” dentro de uma máquina muito maior, que poderemos chamar HERCULES, sigla para *Hexapawn Educable Robotic Colony Undergoing Learning and Evolution via Selection* [colônia robótica educável em Hexapawn, sujeita a aprendizagem e evolução via seleção]. (alguns leitores podem se ofender pela grande proeminência atribuída a um exemplo aparentemente feminino - HER - nas seções anteriores; outros leitores, ao perceberem que a próxima entidade em escala maior, da qual HER faz parte, parece masculina - HERCULES. Esses leitores poderão se consolar com a crença de que o superconjunto final do Hexapawn - caso venha a existir - participará da variedade sexual que cada um preferir e dará importância ao gênero segundo o qual for referido).

O tecido do córtex humano, o cérebro superior, é estruturado quase desta forma. E um conjunto gigantesco de máquinas de aprendizagem, com superconjuntos e subconjuntos da maneira idêntica como descrevemos (células e coleções de células e coleções de coleções de células). Mas existe uma grande diferença: *as partes de que cada máquina de aprendizagem são compostas são,*

em si mesmas, miniaturas de máquinas de aprendizagem; e as partes de que *estas* são compostas também o são. E como se as caixas de fósforos e as pastilhas comestíveis de uma HER, cada uma individualmente e todas juntas, fossem também máquinas de aprendizagem compostas de partes que são máquinas de aprendizagem, compostas por partes que... Se fosse assim, uma boa parte da influência exercida sobre uma determinada HER não procederia do *exterior* (de nós mesmos, em sua grande maioria), mas do *interior* (em escala bem menor). Isso modifica bastante a ideia de que, se continuarmos a pesquisar cada vez mais porfiadamente, é possível que de repente acabemos por encontrar o projetista.

Para descobrir o que realmente encontramos, vamos nos deter em uma descrição mais precisa de como “os jogos de caixas de fósforos” jogam sozinhos no interior do quarto cérebro humano, dando espontaneamente origem à inteligência, à linguagem, à criatividade, ao gênio - e, da mesma forma, dando origem à loucura.

2. COMO ABRIR OS OLHOS DA MENTE

Não poderia uma pessoa receber permissão para inspecionar a maquinaria da Sabedoria? Sinto grande curiosidade para saber como os pensamentos — os pensamentos verdadeiros — nascem dentro de nós.

- Lady Blandish em *O suplício de Feverel*, de autoria de George Meredith.

No século XVII, pouco após o telescópio ter sido inventado, o grande matemático, cientista da computação e filósofo religioso Blaise Pascal realizou um estudo cuidadoso sobre os movimentos dos planetas. Um dia, mencionou para sua mãe que o planeta Vénus apresentava fases, da mesma maneira que a Lua. Pascal emprestou seu telescópio primitivo para que sua mãe pudesse observar o planeta que, na oportunidade, estava em fase crescente. Embora não fosse cientista, a mãe de Pascal era uma mulher inteligente, com um grande interesse pela ciência. Ela nunca havia olhado antes por um telescópio e, quando o fez, prontamente observou:

- Sim, é claro que Vénus também tem fases, só que são ao contrário do que deveriam ser.

Pascal ficou muito espantado.

- Mas como é que a senhora sabe disso?

Sem dúvida, os telescópios invertiam as imagens, mas como sua mãe poderia saber o aspecto que deveria apresentar *a fase adequada*, já que nunca tivera um telescópio em suas mãos antes - de fato, como poderia saber que Vénus apresentava fases? As fases de Vénus somente foram descobertas após a existência e produção dos telescópios.

- Porque eu também posso vê-las a olho nu.

Pascal ficou mudo. Não sabia o que responder. Ele, com toda certeza, não conseguia enxergar Vénus como qualquer coisa maior que um grande ponto luminoso.

Era porque a visão de sua mãe era mais desenvolvida? Porque ela era mais observadora? Somente 300 anos depois é que iríamos descobrir a resposta. Não era exatamente a visão de sua mãe, e sim a retina humana. Realmente, a retina não é uma “parte” de um olho. E, na realidade, uma extrusão física do próprio

quarto cérebro humano que passa *por dentro* dos olhos. Portanto, do mesmo modo que o restante da matéria cerebral, a retina não é organizada somente para reunir raios luminosos, mas sim *para processar dados de forma inteligente*. É um discriminador e classificador potente, muito poderoso, sofisticado e complexo. Até o ponto em que seja possível referir-se a “máquinas pensantes”, a retina é uma máquina de pensar desmedidamente sutil - um computador biológico de grande poder e beleza, miniaturizado em um volume minúsculo. Imagine, se quiser, um computador pessoal de mesa, apresentando mais ou menos o tamanho, a espessura e a delicadeza de uma pétala de rosa. E quaisquer limitações que tenha são compreendidas, assim, como localizadas *muito abaixo* do limiar de acuidade visual necessária para detectar as fases de Vénus a olho nu e completamente sem o apoio de ampliadores visuais - impossíveis de serem vistas, não apenas pelo olhar humano, mas talvez pela visão não ampliada de qualquer outra criatura terrestre.

Para responder à dúvida de Pascal, daremos crédito aos esforços de um cientista bastante extravagante, Frank Rosenblatt. Rosenblatt foi um pioneiro da *computação neural*— construção de dispositivos eletrônicos que processam informações em desacordo com as regras dedutivas da lógica, seguindo um mimetismo indutivo das experimentações aleatórias da natureza. Seu primeiro aparelho - o Perceptron - está atualmente exposto no *Smithsonian Institution*, ao lado do computador de Von Neumann, que tornou possível a construção da bomba atômica. Quanto à significação deste último, essa é do conhecimento de muitas pessoas. Todos os computadores pessoais que existem no mundo contemporâneo descendem dele; mas poucas pessoas já ouviram falar no primeiro. Sem dúvida, ainda existe uma considerável irritação em alguns círculos pelo simples fato de o Perceptron ter sido colocado em exibição ali. Entretanto, esse é o verdadeiro pai do computador do futuro e foi modelado sobre a estrutura da retina humana.

Pétalas de rosa

Rosenblatt havia desenvolvido uma fascinação feroz e precoce pela busca da inteligência baseada em máquinas, a partir dos primórdios da década de 1940. Parecia óbvio, naqueles dias, que a “inteligência artificial” poderia ser melhor desenvolvida por meio do estudo e da cópia dos processos da inteligência natural. No entanto, a tarefa logo se demonstrou mais difícil do que havia sido previsto. Num prazo de 20 anos, a recém-ciência da computação já tinha abandonado o padrão biológico, com o objetivo de desenvolver o tipo de

máquinas que hoje se encontram em quase todas as escrivaninhas e balcões do mundo.

Assim como muitos jovens cientistas que o seguiriam, a busca apaixonada de Rosenblatt pela computação biologicamente informada foi alimentada por um artigo extremamente inteligente e influente, escrito por dois pioneiros que trabalhavam no MIT - Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Em 1943, Warren McCulloch e Walter Pitts publicaram um trabalho no *Boletim de Biofísica Matemática*, intitulado “A logical calculus of ideas immanent in nervous tissue” [Um cálculo matemático lógico de ideias imanentes no tecido nervoso]. Com certeza matemática, o artigo demonstrou que uma coleção de células nervosas era não só capaz de computar, como, tomada em consideração a maneira como os neurônios individuais se comportavam e a forma como se interligavam uns com os outros - basicamente de forma aleatória -, elas *necessariamente* deveriam computar.

Em particular, eles demonstraram que as “ideias” corporificadas em uma coleção de neurônios não eram explícitas, como nas linguagens humanas de alto nível, porém implícitas (“imanentes”), ou seja, produzidas pela coleção de neurônios como um todo, de forma bastante semelhante ao que acontece no Hexapawn de caixinhas de fósforos, em que nenhuma caixa de fósforos individual contém a “ideia” do jogo, mas em que, após serem treinadas, a montagem total de caixas de fósforos adquire determinado conceito.¹ O artigo de McCulloch e Pitts é pouco conhecido em geral; no entanto, na comunidade das ciências computacionais é universalmente conhecido e admirado, além de ter recebido o crédito de ter dado o impulso inicial para a revolução global dos computadores. Mas sua primeira utilização foi a criação de uma *rede neurah* um conjunto interconectado de elementos básicos de processamento que, em seu todo, poderia vir a desenvolver espontaneamente uma poderosa inteligência.

Quinze anos após a publicação do artigo seminal de McCulloch e Pitts, Frank Rosenblatt criou o Perceptron, uma rede neural baseada no esquema de funcionamento da retina. Por meio do processamento repetido de informações em um sistema de redes — também chamado *processamento distribuído* ou *processamento maciçamente paralelo* -, um grupo de neurônios relativamente simples pode adquirir uma capacidade fantástica de discriminação (do mesmo modo que os conjuntos HER adquirem habilidade estratégica). Esta é a razão pela qual o olho nu pode, de fato, detectar o formato de lua crescente que Vénus periodicamente adquire.

Os elementos de uma rede neural, como os neurônios da retina, operam aproximadamente desta forma: um sinal de entrada (digamos, a intensidade local

da luz) é estimulado por um neurônio detector. Este transforma a intensidade luminosa em um sinal elétrico de força correspondente, que é distribuído a muitos

outros neurônios. Os neurônios detectores existem em grande número, e todos distribuem sua saída individualizada a muitos outros neurônios. Cada um soma suas entradas e, similarmente, converte o resultado final da rede em uma saída conjunta. Em resumo, cada um dos neurônios recebe muitas entradas diferentes, e cada um deles sintetiza uma única saída para distribuí-la aos outros neurônios - este é o significado da expressão utilizada anteriormente: “maciçamente paralelo”.

Porém, se fosse apenas isso, não aconteceria nada. Um sistema assim não teria capacidade de aprender. Todavia, a rede de neurônios possui um mecanismo adicional, que é o equivalente das pastilhas comestíveis da HER. As próprias conexões entre os neurônios têm forças diferentes (em geral, chamadas “pesos”): dependendo desses pesos, as conexões ou fortalecem o sinal que estão transmitindo ou diminuem sua intensidade. Uma vez que, no início, esses pesos diferem aleatoriamente, as redes neurais, a princípio, misturam quaisquer sinais recebidos e transmitem apenas o ruído. No entanto, em um sistema nervoso vivo, o próprio sistema se encarrega de modificar os pesos à luz da experiência: as conexões que transmitem sinais com frequência, especialmente sinais fortes, são logo fortalecidas; as conexões que transmitem sinais com menor frequência ou que repassam em sua maioria sinais fracos, passo a passo se enfraquecem, um mecanismo cuja descrição foi esboçada pela primeira vez em 1949, pelo neuropsicólogo Donald N. Hebb, em um livro que se tornou um marco em seu campo, *The organization of behavior: a neuropsychological theory?*

E quase como um processo de raciocínio estatístico: *“Parece acontecer tão repetidamente que, cada vez que as taxas de juros são reduzidas,, os preços das ações do mercado de capitais sobem. A partir de agora,, cada vez que as taxas de juros forem reduzidas, ficarei entusiasmado com o mercado de ações, mesmo que não disponha de nenhuma teoria em que me basear e que me explique por que os dois eventos devam ter qualquer conexão. Mas eles simplesmente estão conectados -pelo menos, segundo minha maneira de pensar”*.

Com o passar do tempo, a rede diminui as conexões que contribuem principalmente para o “ruído” e fortalece as conexões que, em sua maioria, “funcionam”. Algumas vezes, a rede “memoriza” os padrões de entrada como sendo uma distribuição específica de forças de conexão variadas, da mesma forma que o hospedeiro de HER “memorizava” a estratégia de Hexapawn como sendo uma distribuição de conteúdos de várias caixas de fósforos. Mais do que

isso, desde que a densidade de interconexões entre os neurônios seja suficiente, as próprias conexões podem ser aleatórias. Nenhum “diagrama de fiação” é necessário, do mesmo modo que HER não precisa receber quaisquer instruções lógicas sobre estratégia.

Em um dispositivo artificial, modificamos os pesos manualmente e de fora. Esquemas *biologicamente plausíveis*, como a “Aprendizagem Hebbiana”, constituíram a primeira etapa para uma compreensão de como *sistemas locais e de baixo nível* podem influenciar o comportamento global de um todo composto, sem supervisão externa ou intervenção humana.

Esse processo relativamente simples conforma-se com a estrutura real das redes biológicas de neurônios. De maneira geral, elas têm múltiplos canais curtos de entrada, denominados “dendritos”, e um único e longo canal de saída, chamado “axônio”. O axônio, então, se ramifica, buscando atingir pelo menos um dendrito de muitos outros neurônios.

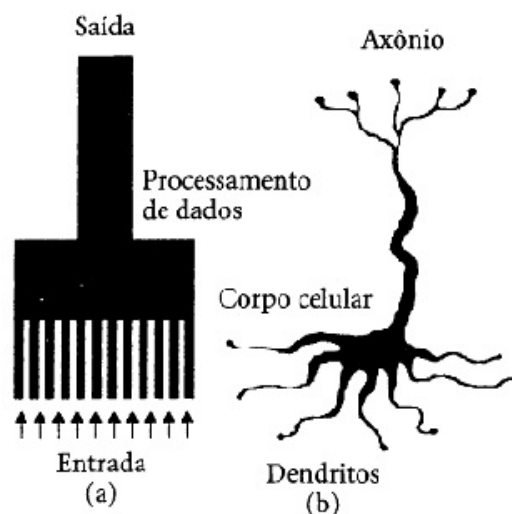


FIGURA 2-1. (a) Esquema de um elemento de processamento neurônico artificial, mostrando sua correlação com a estrutura de um neurônio biológico típico. (b) Um neurônio biológico, mostrando quatro elementos estruturais básicos, que determinam o fluxo e o processamento de dados.

A própria estrutura sugere que o corpo do neurônio combina entradas múltiplas com o objetivo de produzir um total geral (ou médio), que é então transmitido. A Figura 2-1 mostra como elementos de processamento artificial são modelados diretamente sobre esta estrutura biológica.

Não, nós não temos bananas

O modelo mais simples de todos os Perceptrons consiste em um único

neurônio de processamento, que executa uma classificação do tipo sim ou não dos dados que recebe de um conjunto de neurônios detectores. Por exemplo, se uma fruta é uma “banana”, ele apresenta (+1); se é “não-banana”, ele transmite o sinal (-1). Mas, para fazer isso, deve receber e processar (“detectar”) as características do objeto. Podem existir dois neurônios detectores, um que emite um sinal somente quando “vê” a cor amarela, e um segundo que emite um sinal quando vê “um objeto oblongo”. A medida que várias frutas lhe são apresentadas, irá melhorando, cada vez mais, até produzir um sinal (+1) somente quando lhe for apresentada uma banana (que não esteja madura demais).

Lembre-se de que, quando começamos a treinar HER, o robô escolhia movimentos de forma totalmente casual. De maneira semelhante, o Perceptron, a princípio, “adivinha” de forma aleatória se um objeto é ou não uma banana, com uma chance de mais ou menos 50 por 50 de apresentar um resultado correto, *porque inicialmente os seus “pesos” foram determinados aleatoriamente*. Visando a treinar o Perceptron, nós lhe apresentamos muitas bananas e muitas não-bananas diferentes. A aprendizagem ocorre na medida em que ajustamos os pesos em resposta ao número de vezes em que o Perceptron ganha ou perde uma partida de “Eu sou uma banana?”

Mas é aqui que se encontra o desafio: de que forma, exatamente, devemos ajustar os pesos, garantindo que, depois de algum tempo, o Perceptron irá corretamente aprender a maneira de discriminar entre bananas e não-bananas? Ou seja: *qual é a regra de aprendizagem correta?*

Em uma série de artigos e de livros publicados entre 1958 e 1962, Rosenblatt apresentou um elegante esquema de ajuste dos pesos sinápticos, de maneira que garantisse a aprendizagem e, ainda mais importante, fornecesse uma prova matemática - o *Teorema de Convergência do Perceptron* - de que, por meio de seus esquemas de adaptação, o Perceptron sempre *convergir*á, isto é, seus pesos sempre irão alcançar um conjunto de valores que o Perceptron será capaz de classificar corretamente.³ O sistema, basicamente, consiste em: (1) não fazer nada quando o Perceptron adivinhar corretamente; (2) se o Perceptron declarar que alguma coisa é uma banana, quando não for, diminuir os pesos de uma pequena percentagem dos valores de entrada que multiplicam; (3) se o Perceptron aceitar que é uma banana, e realmente for, aumentar os pesos de uma pequena percentagem dos valores de entrada que multiplicam.

Um a partir de muitos (*e pluribus unum*)

Uma questão óbvia que se apresenta a seguir é: “e se houver mais do que

duas classes de dados?” E se o Perceptron for solicitado a discriminar entre bananas, *maçãs* e quaisquer outros objetos?

De fato, a extensão de um Perceptron simples para uma camada perceptrônica - mais uma vez modelada na retina - é tanto sutil como direta. Você precisa simplesmente alinhar tantos Perceptrons quantos forem necessários lado a lado, fazer com que todos recebam dados e os retransmitam paralelamente (de onde vem o nome 'processamento paralelo'). Para cada classe adicional, você apenas acrescenta mais um Perceptron, como ilustrado na Figura 2-2.

Com o Teorema da Convergência demonstrado e a extensão de um único neurônio McCulloch-Pitts para uma camada desses neurônios modelados na retina, uma quantidade imensa de entusiasmo foi gerada em relação ao Perceptron pela seguinte razão: uma variedade de problemas nas áreas de engenharia, ótica, biologia, física e ciências sociais estava crescendo rapidamente e sendo expressa por meio de inúmeras fórmulas simples de uma única como substituto para um pequeno número de equações muito complicadas. Descobriu-se que muitas equações de uma única linha podiam ser convertidas ao comportamento de Perceptrons e, portanto, resolvidas.

Começou a parecer possível que uma camada de Perceptrons complexa o suficiente poderia convergir para a solução de praticamente *qualquer problema*. A máquina *aprenderia* a resolver esses problemas, mesmo que, sozinhos, os seres humanos não fossem capazes de encontrar uma solução.

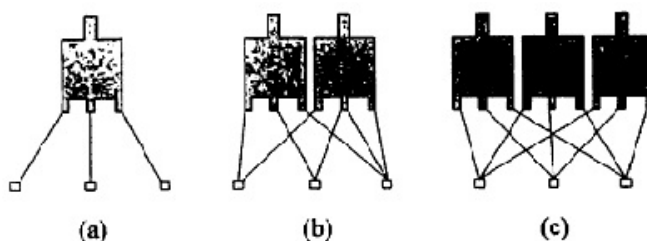


FIGURA 2-2. Perceptrons em paralelo. Esses pequenos neurônios quadrados formam a camada inferior de entrada (*input*). Cada neurônio é sensível a uma única característica de seja lá o que estiver sendo apresentado. A camada seguinte - ou "camada de processamento" - é composta por um, dois ou três neurônios, como nos exemplos (a), (b) e (c), respectivamente. A saída (*output*) emerge do topo desta camada. (a) Perceptron Simples, com três entradas de características e uma saída binária (*on/off*) correspondendo a "sim" ou "não". (b) Dois Perceptrons ligados em paralelo, com três entradas de características para ambos e duas saídas binárias. (c) Três Perceptrons ligados em paralelo. Três entradas de características ligadas a todos os três, com três saídas binárias correspondentes.

Mas um outro fator - muito importante, segundo o ponto de vista dos críticos para o entusiasmo despertado pelo Perceptron, era a personalidade do próprio

Rosenblatt. *“Ele era o ‘sonho’ dos repórteres”, segundo as palavras de um cientista (o que pode ser traduzido precisamente como “o pesadelo de qualquer cientista”), “constantemente predisposto a fazer comentários extravagantes a respeito do desempenho de sua máquina.” Além disso: “Ele era um perfeito curandeiro. Se déssemos ouvidos ao que ele dizia, o Perceptron seria capaz de fazer coisas fantásticas. E talvez até fosse, mas nada poderia ser provado por meio do trabalho de fato realizado por Frank”.*⁴

Assim, bem rápido, o número de cientistas ofendidos pelo estilo de “espetáculo itinerante” de Rosenblatt tornou-se maior do que o número de cientistas conquistados por uma apreciação séria do que ele havia descoberto. E muitos especialistas de grande prestígio em inteligência artificial começaram a suspeitar de que o Perceptron era mais um truque de espelhos e fumaça - que, na verdade, era capaz de fazer bem algumas coisas, mas, sem dúvida, não podia realizar outras importantes. O principal crítico de Rosenblatt era Marvin Minsky que logo afirmaria ser capaz de provar matematicamente que o Perceptron era incapaz de realizar alguma atividade “interessante”. As dúvidas a respeito do Perceptron se transformaram em cólera, à medida que a reputação de Rosenblatt crescia: “Leon Harman, que chegou a trabalhar com a própria máquina de Von Neumann, no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, e que se autodescreve como tendo sido o primeiro operador de um computador verdadeiro, ainda se aborrece profundamente cada vez que entra no *Smithsonian* e descobre que, ao lado da máquina de Von Neumann, é exibido um Perceptron, compartilhando o espaço com a primeira, com se fossem igualmente importantes...”⁵.

Logo, a premissa de que podemos aprender tudo sobre computação a partir da biologia, ou seja, da maneira como os sistemas vivos “pensam”, adquiriu uma “mácula” com o mesmo odor de publicidade enganosa e diletantismo que, atualmente, está relacionado ao “misticismo quântico” da cultura popular. “Minsky duvida que jamais iremos aprender muito a respeito de como operam nossos cérebros por meio do estudo de hardware eletrônico e acredita que as coisas realmente interessantes e potentes que são realizadas pelos computadores existentes em nossas cabeças são inescrutáveis.”⁶

De algum modo, os críticos esqueceram a opinião do próprio Von Neumann:

Frequentemente alegou-se que as atividades e funções do sistema nervoso humano são tão complicadas que nenhum mecanismo ordinário poderia dominar a sua execução.. [...] Tentou-se demonstrar que tais [...] funções, lógica e completamente descritas, são, por sua própria natureza, incapazes de

realizações mecânicas neurais.

O resultado obtido por McCulloch e Pitts colocou um ponto final em tudo isto, demonstrando que tudo quanto possa ser [...] colocado em palavras de forma completa e sem ambiguidades será *ipso facto* realizável por uma rede neural adequadamente finita.^{7,8}

As palavras proféticas de Von Neumann não receberam a devida consideração. Antes da primeira metade da década de 1960, as críticas sobre o Perceptron já encerrariam críticas sobre *qualquer tipo* de computação realizada por máquinas biologicamente embasadas. Essas críticas formais, como veremos mais à frente, pareceram devastadoras, e a direção para o desenvolvimento dos computadores foi drasticamente alterada, tomando-se aquilo que, hoje, todos conhecemos.

Depois de seu breve romance com a fama, mesmo que não com a fortuna que atualmente acompanha os triunfos na área de computação, Rosenblatt foi esquecido, em conjunto com seu Perceptron. No entanto, houve aqueles que repensaram o assunto e não se satisfizeram com sua rápida demissão. Um crítico, que *também é* admirador de Rosenblatt, expôs a questão desta forma: “De fato, ele irritou muita gente, mas encantou pelo menos uma quantidade igual, e eu me encontro entre aqueles que foram seduzidos. Justamente no momento em que se começava a suspeitar de que Frank já não tinha mais nenhum truque na manga, lá vinha ele com outro, e era tão incrivelmente convincente que você simplesmente sabia que ele tinha de estar certo”.⁹

E acontece que estava. Todavia, na época em que suas alegações foram vindicadas, já se havia passado um quarto de século, e Rosenblatt falecera, precocemente, em plena atividade científica.

3. MORTE E NASCIMENTO

Nos dias em que o especialista em inteligência artificial Gerald Sussman ainda era um principiante, Minsky chegou um dia até onde ele se encontrava, como sempre fuçando no computador denominado PDP-6.

- O que você está fazendo? - perguntou Minsky.

- Estou treinando uma rede neural de fiação aleatória para jogar o Jogo da Velha — respondeu Sussman.

- Por que a rede tem fiação aleatória? - perguntou Minsky.

- Porque eu não quero que ela tenha quaisquer preconceitos sobre a maneira como deve jogar — respondeu Sussman.

Minsky fechou os olhos.

- Por que o senhor fechou os olhos ? - indagou Sussman ao seu professor.

- Para deixar a sala vazia.

Foi esse o momento em que Sussman teve sua iluminação interior.

- jargon, node: Some AI Koans.

<http://igwe.vub.be/links/jargon/s/SomeAIKoans.html>

Muitos veteranos no campo da computação recordam como sendo um grande espetáculo desportivo as disputas que Minsky e Rosenblatt tiveram nos palcos de conferências científicas durante o final da década de 1950 e o início dos anos 1960.”¹ Mas o debate Minsky-Rosenblatt foi muito mais que um acontecimento desportivo. Foi um dos grandes embates científicos do século XX, constituído por brilhantes desenvolvimentos na área de engenharia, por concepções matemáticas de brilhantismo ainda maior, tudo colorido pelas imperfeições inerentes às personalidades humanas.

Os lados do debate eram bem claros: de acordo com Rosenblatt, a computação biologicamente inspirada poderia fazer quase qualquer coisa; de acordo com Minsky, não conseguiria fazer praticamente nada. O debate introduziu uma nova era de cérebros artificiais e o surgimento de uma nova aristocracia composta por seres humanos dotados de cérebros naturais. Quando, no final da década de 1960, Minsky pareceu ter finalmente vencido a batalha, os dispositivos neuralmente baseados foram minguando até desaparecerem, e a computação se desenvolveu para o que conhecemos hoje: os chamados “sistemas

especialistas” - processos mecânicos totalmente idiotas que apenas implementam, ainda que com velocidades impressionantes, as instruções “que vêm de cima”, isto é, dedutivas, inseridas por um especialista humano. Era um modelo que se comportava muito bem, de acordo com a visão do mundo dominante nessa era, em que a engenharia social estava em seu auge e a adoração dos especialistas de qualquer miudeza estava rapidamente se acelerando.

Minsky

Depois de deixar a Escola Técnica de Ciências do Bronx, onde o próprio Rosenblatt estudara, Marvin Minsky transferiu-se para Andover e, um pouco mais tarde, para Harvard. Em Harvard, obteve acesso a seus próprios laboratórios, ainda na qualidade de estudante de graduação, em três departamentos diferentes - física, biologia e psicologia -, as três áreas que considerava ser preciso dominar a fim de compreender o funcionamento do cérebro ou, uma vez que, “sendo o cérebro uma mera máquina”, como ele mesmo declarou, construir um pessoalmente.² Como Rosenblatt, também Minsky, quando jovem, foi de início hipnotizado pelo potencial computacional biologicamente baseado do modelo McCulloch-Pitts.

Não demorou muito para que Minsky esticasse a fiação necessária a fim de reunir cerca de 300 válvulas em uma rede neural espantosamente sofisticada, simuladora do comportamento de quatro ratos em um processo de aprendizagem com o objetivo de se evitarem uns aos outros enquanto navegassem em um labirinto - uma tarefa de aprendizagem muito mais complexa do que a de um robô Hexapawn. A sua rede incorporava casualidade e funcionava bem, porém Minsky estava insatisfeito com a teoria que havia desenvolvido, buscando explicar *de que maneira* *eh* trabalhava.

Minsky abandonou sua engenhoca no laboratório quando saiu de Harvard e foi recebido em Princeton, onde inventou o método da chamada “aprendizagem por reforço”, uma área que continua a receber atenção até hoje. Tendo desenvolvido uma teoria um pouco mais satisfatória sobre sua rede, obteve seu doutorado em 1954, defendendo uma brilhante tese baseada no desempenho das redes neurais. Logo foi contratado pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts, onde se tornou uma estrela em ascensão.

Todavia, Minsky estava começando a suspeitar de que a computação adaptativa e baseada nos parâmetros biológicos se mostraria um beco sem saída. Ou, quem sabe, ele simplesmente estava ficando aborrecido pelo tema. “Eu sempre anseio com grande expectativa pelo momento em que poderei abandonar um

projeto. Isso é muito prazeroso, porque assim não preciso nunca mais concluir o trabalho...”³ De qualquer maneira, ele logo se tornou o arqui-inimigo das redes neurais, incluindo o Perceptron. E a oposição de Minsky à computação biológica foi bem mais efetiva, porque ele tinha realizado anteriormente inúmeros trabalhos impressionantes sobre as redes neurais. Assim, ele começou a projetar e a se tornar o campeão da defesa dos sistemas especialistas baseados em lógica. Do mesmo modo que a “máquina de carne” que Minsky projetara pessoalmente, suas máquinas lógicas eram sedutoramente precisas - em contraste com a máquina extravagante de Rosenblatt. Sob sua influência, o termo “inteligência artificial” foi reservado *para não significar* o Perceptron ou as redes neurais semelhantes.

Atingindo o cérebro

As redes neurais são baseadas na premissa de que os neurônios naturais e as redes desses neurônios, que se formam naturalmente, fornecem o melhor modelo possível para o processamento de informações, porque, por meio de milênios incontáveis de experimentação, a natureza evoluiu até tornar-se capaz de tal realização. Entretanto, mesmo que esta seja a maneira segundo a qual os *nossos próprios cérebros* geram a inteligência, será que esse “processamento paralelo distribuído” é efetivamente a maneira por meio da qual aprendemos? Certamente isso não ocorre todo o tempo.

Sócrates é um homem; todos os homens são mortais; portanto...?

...Sócrates é mortal. Isso concluímos por meio da lógica, e não por uma “convergência” de experimentação e erro. Não é simplesmente uma questão de nossos professores baterem sem parar em nossos dedos com uma régua, até que o sofrimento nos leve a declarar a sequência correta dos termos desejados, em uma procura desesperada e aleatória para nos livrarmos da dor.

Além disso, nem Minsky nem qualquer outra pessoa jamais havia visto uma pilha de lixo crescer até se transformar em uma máquina de pensamento. Para que isso acontecesse, ela teria de *ser criada inicialmente por seres humanos inteligentes*, quer fosse construída com caixinhas de fósforos, quer com tubos de vácuo, como ele próprio fizera. O máximo que você pode fazer com qualquer máquina de aprendizagem *real* para que ela dê a impressão de ser espontaneamente inteligente, é ocultar por um nível ou dois a presença factual de um projetista humano em sua origem - como fizemos com nossos superconjuntos embutidos no Hexapawn. Finalmente, Minsky concluiu que era uma presunção tola tratar “redes neurais aleatoriamente interligadas” como se

fossem absolutamente aleatórias: elas tinham sido *projetadas* por pessoas para parecerem assim. Desconsiderar essa realidade era uma auto-ilusão tão deliberada quanto fechar os olhos para fazer com que a sala desaparecesse.

De fato, realmente parecia haver *um único* exemplo de uma pilha de lixo que havia evoluído até se transformar em uma máquina de pensamento: a própria "máquina de carne" humana. Só que isso tinha levado *bilhões de anos* e consumira os recursos do planeta inteiro. Desse modo, Minsky abandonou as redes neurais e começou a projetar máquinas que pudessem pensar, fazendo o que nós mesmos fazemos quando pensamos da maneira correta: avançamos até a resposta por meio de uma sequência precisa de etapas lógicas, e não como um bêbado cambaleante.

Em 1961, Minsky conheceu, em uma conferência realizada na Inglaterra, um teórico de opinião semelhante, cujo nome era Seymour Papert. Eles decidiram que levariam um ano ou dois para resolver a controvérsia do Perceptron de uma vez por todas. Minsky trouxe Papert para o Instituto de Tecnologia de Massachusetts, e juntos começaram a analisar com rigor matemático exatamente o que um Perceptron podia ou não podia fazer.

Porém, à medida que eles atavam um fio solto aqui, aparecia outro mais adiante. Vezes sem conta adiaram a publicação de seus resultados. Finalmente, em 1969, acreditaram estar preparados. Cópias pré-publicadas de *Perceptrons: an introduction to computational geometry* causaram sensação instantânea no mundo da inteligência computacional. O tom do que estava por vir foi estabelecido na página 4, em que eles ofereciam sua avaliação geral da imensa literatura então existente sobre os Perceptrons: *A maior parte destes escritos*", afirmaram eles, **é despida de valor científico**. "Meu Deus, mas como eles trabalharam bem com suas machadinhas!..." foi o comentário maravilhado de um professor de Engenharia Elétrica da Universidade de Stanford.⁵

Minsky foi prontamente convidado a apresentar uma versão preliminar de *Perceptrons: an introduction to computational geometry* em uma sessão da prestigiada

Sociedade Matemática Americana. Ele já havia alcançado uma reputação formidável como palestrante, mesmo que usasse óculos de aro de tartaruga e protetores plásticos em seus bolsos.

A dicção de Minsky é tão precisa como a de um ator treinado, e seus conhecimentos quase universais. Juntamente com os demais "pais fundadores" da inteligência artificial, ele compartilha um apetite onívoro por experiência e conhecimento - de música, medicina, ficção científica, história, engenharia, matemática, política, futurismo, fantasia... Ver Minsky reduzir a fatias um colega

cujas ideias lhe parecem mal concebidas é, ao mesmo tempo, um esporte e um terror, pois, embora sua voz não se altere, as mãos demonstram tensão por meio de um movimento constante, o que é sinal de seu envolvimento emocional.⁶

Por volta de 1969, os desafios de fazer com que as redes neurais funcionassem adequadamente estavam sendo considerados grandes demais e, até mesmo, atemorizantes por muitos cientistas; o ceticismo a respeito das principais alegações de Rosenblatt estava começando a se difundir; os financiamentos do Departamento de Defesa dos Estados Unidos - por meio da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada - DARPA - sempre haviam estado sujeitos a inesperadas mudanças de tendências, e uma dessas transformações relativas à computação já estava em andamento (devido especialmente ao fato de que Minsky já havia obtido excelentes resultados em seus trabalhos com sistemas especialistas). Mas o livro publicado por Minsky e Papert era uma demonstração vitoriosa, um verdadeiro *tour de force* dentro do mais rigoroso embasamento matemático, de todas as coisas cruciais que os Perceptrons *jamais seriam capazes de realizar*. Em particular, certas operações lógicas elementares, essenciais para a consecução de *qualquer* método computacional, estavam além do seu alcance. Por exemplo, um Perceptron não era capaz de administrar uma tarefa de discriminação de padrões simples, como mapear dados em regiões, caso o limite entre essas regiões fosse mais do que uma linha perfeitamente reta. Regiões situadas dentro de outras (como um município dentro de um estado) encontravam-se ainda mais além de suas capacidades - a despeito do fato de que o Perceptron vinha sendo proclamado como um “reconhecedor de padrões” quase universal. Os ouvintes atentos perceberam que estavam assistindo ao anúncio do golpe de misericórdia.

Essa limitação do Perceptron é extremamente profunda pelas seguintes razões: os elementos básicos de *toda* a computação podem ser demonstrados como tendo sido construídos sobre um pequeno conjunto de operações lógicas elementares, tais como os operadores NOT (como em “Os cães NÃO são homens.”) ou AND (como em “Sócrates é um homem E é mortal.”).

Outra importante operação lógica é a exposta pelo operador OR, mas aqui precisamos ter um cuidado maior, porque há de fato dois desses operadores, o OR e o XOR, e eles são diferentes. OR (“ou”) significa “A ou B ou ambos”, como em “se Sócrates é um filósofo OU um homem, então ele é mortal”. XOR (“ou exclusivo”) representa “A ou B, mas não os dois”, como em “Sócrates OU é mortal OU é imortal”. Os dois não podem ser verdadeiros, nem podem ser falsos.

Podemos expressar a mesma ideia em termos mais gerais. Suponhamos que

somente “preto” ou “branco” possam ser as possíveis cores de cabelo e de pele em um determinado país (talvez em Pinguinlândia). Desse modo, CABELO XOR PELE significa que podemos designar para um grupo aquelas pessoas que têm ou pele branca ou cabelos brancos, mas não ambos; e designamos para um segundo grupo as pessoas que apresentam *tanto* pele como cabelos brancos ou *tanto* pele como cabelos pretos. O primeiro grupo será denominado “Branco” e o segundo, “Preto”. (Aqui, dois valores estão sendo condensados em um, de acordo com a regra XOR.) A Figura 3-1 mostra uma tabela dessas possibilidades.

	Pele Branca	Pele Preta
Cabelos Brancos	Grupo Preto	Grupo Branco
Cabelos Pretos	Grupo Branco	Grupo Preto

FIGURA 3-1. XOR: O operador lógico “Ou exclusivo” cria grupos que não são contíguos entre si.

Não existe uma maneira de traçar uma única linha para separar o “Grupo Branco” do “Grupo Preto”. XOR, um dos elementos mais básicos da lógica, se encontra, portanto, além das possibilidades de cálculo do Perceptron. Uma vez que esta fraqueza básica foi exposta, o julgamento foi rápido e seguro: os Perceptrons são totalmente inúteis, a coisa mais distante que se possa imaginar de um “cérebro”.

Talvez pudesse ser útil acrescentar camadas adicionais ao Perceptron? Algum elemento que levasse à criação de uma curva aproximada, a partir de muitos segmentos de linha reta? Minsky e Papert ofereceram seu julgamento intuitivo de que “(...) a extensão para sistemas de camada múltipla se demonstrará estéril”^{*1} (com o que Minsky queria dizer que “não iria gerar nada que pudesse ter valor real”).

A fascinação juvenil de Minsky pela computação baseada na biologia havia terminado, do mesmo modo que qualquer outra necessidade de competição com Rosenblatt. Durante os anos seguintes, Minsky se tornaria o representante mais eminente da computação genuinamente *simbólica*. A fascinação das agências distribuidoras de subsídios com a computação baseada na biologia também havia terminado, em particular o apoio crucial fornecido pela DARPA. A enxurrada de dólares foi, aos poucos, desaparecendo das ilhas cada vez mais isoladas de pesquisas sobre redes neurais, voltando-se para a subvenção do novo mundo da computação: as amplas praias da inteligência artificial de Minsky.

Alguns anos depois, Rosenblatt afogou-se quando navegava em seu pequeno barco a vela em um lago. Persistem rumores até hoje a respeito de seu estado de espírito naquela época, as razões e os meios que o levaram à morte, mas seus colegas mais íntimos insistem em dizer que foi apenas um acidente inesperado. O vento soprou a vela em sua direção sem que ele percebesse, tendo sido atingido pela haste inferior, e jogado inconsciente por sobre a amurada. Seu epitáfio? *Não teve valor científico.*

Morte Xor ressurreição: o segundo surgimento das redes neurais

No entanto, nem todos estavam convencidos de que o Perceptron e outros sistemas que partiam do particular para o geral (indutivos) tinham recebido o golpe de misericórdia, como a maioria acreditava. Em alguns laboratórios universitários, por todo o mundo, o trabalho nessa área prosseguia. Apenas era prejudicado pela falta de subvenções e, ao mesmo tempo, estimulado por isso - aqueles que continuavam a trabalhar na área estavam totalmente convencidos de seus méritos, tinham mentalidades independentes e se achavam muito motivados.

Bernard Widrow, da Universidade de Stanford, por exemplo, tinha desenvolvido um dispositivo semelhante a um Perceptron, que denominara “Adaline”, uma abreviatura de *Adaptive Linear Element* [elemento linear adaptativo], referindo-se o “linear” à limitação da linha reta que discutimos anterior mente. Quando recebeu uma cópia do livro *Perceptrons*, “chegou à conclusão de que Minsky e Papert teriam se inspirado a escrever a obra realmente em um período anterior ao presente estado de desenvolvimento, e que sua intenção tinha sido a de esmagar o campo, de fazer tudo o que estava a seu alcance para espetar alfinetes no balão”. Tudo o que os autores haviam realizado havia sido definir a computação neural da forma mais limitada possível, “para que pudessem provar que não era capaz de fazer praticamente nada”. Em particular, a asserção tão ativa de Minsky - a um ponto que nem se dera ao trabalho de tentar provar o que afirmava de que as redes neurais de camada múltipla se demonstrariam “estéreis”, era visivelmente errada. O problema da “separabilidade linear” do XOR, como vinha sendo chamado, já tinha sido resolvido há muito tempo, justamente por meio dessa técnica, conforme observou Wi-drow, só que ninguém estava disposto a prestar atenção.⁸ Ele próprio havia desenvolvido um novo aparelho, chamado “Madaline”, composto por *muitos* Adalines.

Fora da caixinha

“Toda essa história de viagens espaciais é um total absurdo.” Era nisso que insistia o astrônomo real britânico Richard Wooley, em 1956, menos de um ano antes que os soviéticos lançassem o seu Sputnik. Treze anos depois, o Apollo XI pousava na Lua. E assim que ocorre na ciência. A maneira “óbvia ululante” de superar as limitações aparentes do Perceptron⁹ encontra-se em uma compreensão levemente mais sofisticada do operador XOR, entendimento esse que, já na década de 1960, era conhecido pelos lógicos e pelos primeiros cientistas da computação que, naturalmente, precisavam dessa função para a programação padronizada. Essa interpretação era “*XOR pode ser construído por duas das três operações lógicas elementares, AND e NOT. Veja como.*”

XOR significa, mais precisamente, “nem ambos, nem nenhum”. Agora “(NOT (A AND B))” [não é A e B] significa “não é ambos”, ao mesmo tempo que (NOT (NOT A AND NOT B)) [não é não-A e não é não-B] significa “não é nenhum”. Se você insistir que ambas as proposições são verdadeiras ao mesmo tempo, colocando outro operador AND entre as duas, você terá $XOR = (NOT (A AND B)) AND (NOT (NOT A AND NOT B))$ [não é A e B e não é não-A e não-B]. Ora, esta proposição final pode ser perfeitamente implementada por Perceptrons, se eles forem empilhados em camadas, de tal modo que passem a processar “em paralelo”, conforme é ilustrado pela Figura 3-2a.

As forças de conexão variáveis são representadas por letras “w” são limiares em cada neurônio e determinam se ele irá disparar ou não, dependendo da entrada da rede. O problema se reduz a isto: sem lhe dizer especificamente o que fazer, podemos conseguir que essa rede faça com que seu neurônio superior produza um sinal (“1”) quando o alimentarmos com “1” e “0” ou com “0” e “1”, mas que não produza nada (“0”), caso lhe enviemos dois “1” ou dois “0”?

A resposta é sim, desde que os padrões dos pesos, na maioria das vezes, convirjam para um entre um determinado número de configurações administráveis. O número 14 da revista de computação popular *Byte* ofereceu aos leitores a solução mostrada na Figura 3-2b.¹⁰

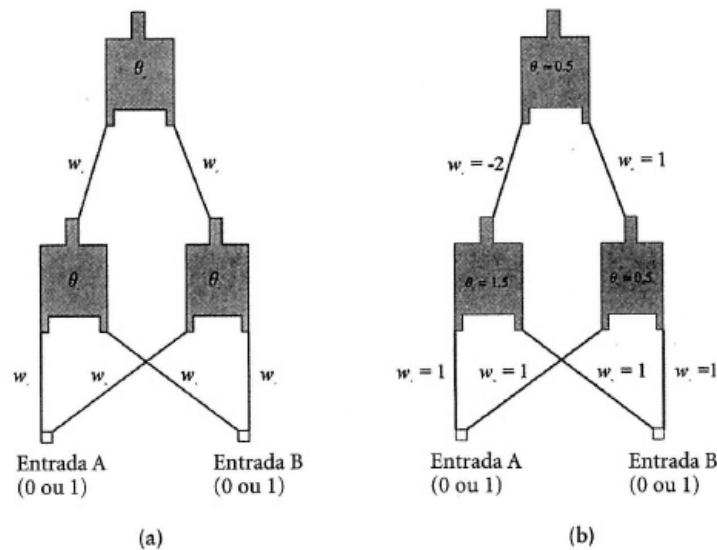


FIGURA 3-2. (a). Perceptron de Camadas Múltiplas, preparado para receber o problema XOR.
(b) Perceptron de Camadas Múltiplas, depois de ter resolvido o problema XOR.

Por exemplo: vamos supor que a entrada seja $A = 0$ e $B = 1$. Uma vez que este é um caso em que “uma das entradas é igual a 1, mas não ambas”, esperamos que o Perceptron produza “1”. Pegamos cada uma das duas entradas, multiplicamos pelos pesos intervenientes e distribuimos os resultados como entradas para os dois neurônios médios. Uma vez que $A = 0$, não se vai distribuir nada, e isso pode perfeitamente ser ignorado. Com $B = 1$ e ambos os pesos entre B e a camada média também sendo 1, ambos os neurônios da camada média recebem $1 \times 1 = 1$ de B (e 0 de A).

Porém, o neurônio médio, que fica mais à esquerda, apresenta um limiar de $= 1,5$. Isso significa que, se a entrada total que receber for de 1,5 ou maior, ele retransmitirá 1; caso contrário, irá mostrar um 0. Sua entrada total é 1 (de B) + 0 (de A) = 1, que é menor que 1,5. Assim, esse neurônio apresenta somente 0.

O neurônio médio, que fica mais à direita, apresenta um limiar de $= 0,5$, significando que, se a entrada total que receber for de 0,5 ou maior, ele retransmitirá 1; caso contrário, irá mostrar um 0. Sua entrada total é 1 (de B) + 0 (de A) = 1, que é maior que 0,5. Desse modo, o neurônio transmite o valor de 1.

A saída do neurônio médio, que fica mais à esquerda, é 0 com peso -2 e $0 \times -2 = 0$. Esse valor é enviado como entrada para o neurônio superior. A saída do neurônio médio, que fica mais à direita, é 1 com peso 1 e $1 \times 1 = 1$. Esse segundo valor também é enviado como entrada para o neurônio superior. O neurônio superior soma suas duas entradas: $0 + 1 = 1$. Seu limiar é $= 0,5$. Uma vez que a entrada total é maior do que esse limiar, o neurônio superior mostra um resultado final de “1”, como se esperava.

Se você quiser ter uma sensação concreta de como as redes neurais de todos os tipos funcionam, pode pegar uma folha de papel e um lápis, assinalar todas as demais entradas possíveis - (0.0), (0.1), (1.0), (1.1) - e acompanhar o fluxo de números para ver que as saídas corretas sempre são geradas. Caso contrário, pode acreditar na minha palavra de que funcionam - as entradas (0.1) e (1.0) geram “1”; as entradas (0.0) e (1.1) geram “0”.

Assim, se parte do poder da crítica dos Perceptrons por Minsky e Papert consistia em mostrar o que, em retrospectiva, parece ser uma solução óbvia para o problema - o que é uma característica típica das exposições matemáticas elegantes -, parte de sua fraqueza foi ter falhado em descobrir a solução para o problema, igualmente elegante e óbvia.

Computação paralela versus computação serial

Logo depois que a crítica de Minsky e Papert foi publicada, a opinião predominante nos círculos científicos e computacionais sensatos tornou-se a de que a computação paralela era um beco sem saída, pois não tinha capacidade para fazer nada de “interessante”, como Minsky e Papert tinham declarado. Assim, vale a pena apresentar o seguinte fato: a verdade é que *qualquer coisa* que você possa fazer programando um computador não-paralelo (denominado “serial”) de cima para baixo, ou dedutivamente, um computador paralelo biologicamente modelado pode aprender a fazer de baixo para cima, ou indutivamente, como Rosenblatt acreditava, e também Von Neumann antes dele. A razão é simples: *toda computação consiste da reunião das operações lógicas elementares*. Qualquer sistema que consiga reunir e processar essas operações, por mais desajeitado ou ineficiente que pareça ser, pode eventualmente tornar-se um “computador universal” e computar qualquer coisa que possa ser computada.

Isso não é intuitivamente óbvio (você pode verificar, se quiser), mas NOTXOR [não é ou exclusivo] se traduz em português por “se e somente se”, como em “ela é minha esposa se e somente se eu for o marido dela”, significando que “se um é verdadeiro, então o outro é verdadeiro e *vice-versa*”. Se colocarmos um lote de redes NOT XOR juntas, teremos em nosso poder um dispositivo que não apenas *pode realizar* operações lógicas de alto nível, na medida em que for instruído, como pode pesquisar e encontrar as condições necessárias e suficientes para que alguma coisa seja verdadeira, podendo realizar essa atividade sozinho, não importa quão complexas sejam, quer os projetistas humanos da rede tenham descoberto essas condições por si próprios ou não. (não chegamos a demonstrar como um Perceptron converge para a solução do Problema XOR, nem que ele invariavelmente deva convergir para ela; simplesmente mostramos que existe uma solução. Tanto o método como a prova existem, mas se encontram além do escopo deste livro).

Desse modo, por que as redes neurais de camadas múltiplas não substituíram inteiramente as formas padronizadas de computação? Porque, para os processos *que já foram aprendidos* e que *podem* ser expressos na forma de uma regra explícita, é muito mais eficiente fazer uso direto desse conhecimento “especialista” do que treinar uma rede inteira até que esta se torne capaz de executar o processo. Estas são as barganhas que se acham em funcionamento em nossos próprios “quartos cérebros”: as funções de suas redes aprendem uma tarefa; assim que esta foi aprendida, o algoritmo completado para sua execução é tacitamente armazenado. Se você tomar a regra explícita, pode depender dela para que o proteja contra futuros erros. E assim que adquirimos uma linguagem específica:¹¹ primeiro vem o treinamento, depois surgem as regras. (Em um capítulo posterior, veremos em maiores detalhes como uma rede neural adquire um aspecto da linguagem, a pronúncia natural.) Aprendemos a pensar criticamente não por meio da aprendizagem das regras do “pensamento crítico”, mas nos expondo inúmeras vezes a situações em que pensar é crítico! Se você repetir: “*Sócrates é mortal*” um número suficiente de vezes, junto com uma porção de outros silogismos, de fato começará a compreender as regras da lógica. Desse modo, quando alguém lhe explicar quais são, elas irão parecer “intuitivamente” óbvias.

A computação-padrão e a computação em rede se complementam. A intuição de Minsky e Papert de que os Perceptrons de camada múltipla se demonstrariam estereis era apenas uma intuição... que se demonstrou incorreta. Nunca houve uma necessidade real para os proponentes de uma abordagem tentarem esmagar os proponentes da outra...

Certo? Errado. O antagonismo humano endêmico na comunidade científica é um “algoritmo de aprendizagem competitiva”. Algumas vezes torna-se doloroso para os “elementos de processamento” individuais, porém, em longo prazo, beneficia a rede mais ampla da humanidade como um todo. Conforme declarou um cientista: “A falta de misericórdia para com os erros alheios sempre foi uma das molas mestras do empreendimento científico”.¹² Pelo que sei, Marvin Minsky jamais ficou aborrecido por demonstrarem que estivera errado - afinal de contas, é assim que se aprende espontaneamente. Talvez seja por isso que, com referência a outras questões, provou-se diversas vezes que ele estava certo.

4. COMO ENSINAR VELHOS TRUQUES A UM FILHOTE DE CACHORRO

Esta é a lição: nunca desista — nunca, nunca, nunca, nunca.

- Winston Churchill *em uma palestra aos estudantes da Escola Preparatória de Harrow*, 29 de outubro de 1941.

Richard Feynman foi uma típica criança-prodígio. Quando ele encontrava alguma coisa que despertava seu amor, nunca se cansava de repeti-la, de novo e mais uma vez, um número espantoso de vezes. Esta *não é* a altamente romântica noção da genialidade, nem encontra uma recepção favorável entre a obsessão educativa da *avant-garde* didática, dedicada a ensinar diretamente “habilidades de pensamento crítico”. Mas se coaduna muito bem com a famosa definição do gênio apresentada por Dickens: “A infinita capacidade para se esforçar e sofrer”. Desse modo, na época em que chegou ao ensino médio, Feynman já havia descoberto sozinho seu caminho por meio da maioria dos problemas contidos nos textos de cálculo de nível universitário. Quanto se formou na universidade, já havia repetido vezes sem conta, calculando, por assim dizer, com a ponta de seus dedos mentais, milhares e milhares de alternativas para quase todos os tipos de problemas físicos e matemáticos conhecidos.

Quando menina, Joan, a irmã mais jovem de Feynman, também queria se dedicar às ciências. Mas sua mãe acreditava que as meninas eram fisiologicamente incapazes de aprender ciências e a desencorajou de uma maneira tão veemente, que ela passou a evitar essa área do conhecimento. Entretanto, quando Joan completou 13 anos, Feynman lhe deu um livro de astronomia universitária. Quando abriu o presente, viu que o irmão havia escrito seu nome na parte interna da capa. Ela ficou profundamente comovida, mas começou a preocupar-se enquanto folheava as páginas.

- Como é que eu vou ler isso? É tão difícil...

Sua resposta foi uma descrição perfeita de como o quarto cérebro - uma rede neural enormemente poderosa melhor aprende, sem medo de fracasso, sem desanimar com as repetições e sem se deixar seduzir por modismos e atalhos acadêmicos:

- Você principia pelo começo e vai lendo em frente até onde conseguir chegar sem se perder. Aí, você volta de novo para o princípio e lê tudo de novo e

continua assim até conseguir entender o livro inteiro...

Em 1958, Joan concluiu seu doutorado em Física.

Tente você seguir o conselho que Feynman deu à sua irmã, mas mantenha um registro desapaixonado sobre seus próprios processos mentais. Na medida em que você repetidamente bater com a cabeça na mesma parede, comece a perguntar: *o que é que eu estou perdendo?* Mentalmente ou, se quiser, em uma folha de papel, comece a brincar com as diferentes interpretações possíveis do ponto em que você ficar encalhado. Quando finalmente *topar* com a explicação correta, a barreira que impedia seu avanço desaparecerá e você poderá seguir em frente - até se deparar com a próxima barreira. Se mantiver um registro de seus progressos, vai descobrir que você avança por saltos e arrancadas súbitas. Um movimento significativo em frente vem logo depois de uma série de erros, *durante os quais a culpa é devidamente atribuída à sua causa*.

Marvin Minsky e outros críticos das redes neurais eram tão céticos em relação até mesmo aos Perceptrons "de camada múltipla" porque ele, como também os demais, sentia-se intimamente convicto de que *não existe maneira para uma rede neural determinar adequadamente a "culpa" por seus erros a seus vários neurônios*, em especial se houver um grande número deles em camadas apertadas, como se fosse um recheio de sanduíches entre a entrada e a saída.

Algumas vezes dois erros justificam um acerto

Aqui está um exemplo de uma dessas redes de camada múltipla - um exemplo, de fato, bastante simples e para o qual diversas redes já foram treinadas, ou seja, mostrou-se a cada uma dessas redes muitas bananas e maçãs, e seus pesos de conexão foram *automaticamente ajustados* (iremos descrever a seguir de que maneira) como resposta ao problema. Agora, eles são justamente o que precisam ser para que a rede possa descrever corretamente quando "vê" uma maçã e quando detecta uma banana.

Em vez de um neurônio ser completamente "ligado" (isto é, excitado ou "negro"), objetivando produzir um "1", ou "desligado" por completo (tranquilo ou "branco") e representar um "0", esses neurônios se assemelham um pouco mais aos vivos e, desse modo, possuem uma escala de possíveis estados de excitação, que abrangem do negro, por meio da escala de cinza, até chegar ao branco. Vemos a rede em dois estados: uma vez em que lhe apresentam uma banana (esquerda) e uma vez em que lhe apresentam uma maçã (direita). As forças de conexão encontram-se finalizadas de tal modo que permanecem iguais

em ambos os casos. Mas quais são os neurônios que ficam excitados e em que grau dependem de duas coisas: se os dois neurônios de entrada da camada inferior, que são sensíveis às características das bananas, forem estimulados ou se os outros dois neurônios da camada inferior, sensíveis às características das maçãs, é que forem os estimulados? Quais dos três neurônios da camada média e quais dos dois neurônios da camada superior vão ser estimulados, e em que grau, também irão depender dos padrões particulares de pesos que afetarem as conexões entre todos os neurônios de uma camada e da camada seguinte. Os neurônios da camada média são chamados “ocultos” porque não possuem interações com “o mundo exterior”, da mesma maneira que os neurônios das camadas superior e inferior. Os neurônios da camada oculta e da camada de saída são “neurônios computacionais” porque somam suas entradas e aplicam um valor-limiar - ou um conjunto de valores-limiar -, a fim de determinar qual o sinal que devem apresentar. Os neurônios da camada de entrada são chamados “neurônios sensoriais”, mas não computacionais, porque cada um fica excitado em resposta a uma característica exclusiva que lhe for apresentada (como neurônios especializados em calor e neurônios especializados em pressão se encontram na ponta de nossos dedos) e transmitem um valor que diretamente reflete “quão intensa” é a característica que detectou (veja Figura 4-1).

Se for apresentada uma maçã à rede (esquerda), os neurônios detectores de “vermelho” e de “redondo” da camada inferior se acenderão; se for apresentada uma banana (à direita), serão os neurônios detectores de “amarelo” e de “longo” os acionados. Os diagramas ilustram um padrão de conexões fracas (linhas tracejadas) e de conexões fortes (linhas cheias), de tal modo que o neurônio da “maçã”, na fila superior, fique mais excitado que o neurônio da “banana”, no instante em que a rede “vir” alguma coisa que pareça arredondada e avermelhada, enquanto o reverso é apresentado quando surge algum objeto amarelado e mais longo. O padrão de forças de conexão “codifica” as características detectadas de maçãs e bananas. Utilizadas em conjunto (superpostas, por assim dizer) e distribuídas por meio da rede como um todo, essas codificações constituem a “imagem” ou a “memória” dos dois objetos.

Sem dúvida, esse problema não é difícil, mas durante décadas a maioria dos cientistas da computação esteve convencida de que, devido à mistura de sinais que ocorre em nível médio, na camada “oculta”, e porque esses neurônios não podem receber uma retroalimentação direta (de nós, por exemplo), então *não haveria maneira de fazer com que as conexões modificassem a si mesmas automaticamente, com o intuito de produzir a distribuição acima* (ou uma equivalente) *de elos fortes e fracos*. Essa codificação precisava surgir de fora,

feita por um especialista em frutas externo, segundo afirmava a sabedoria popular.

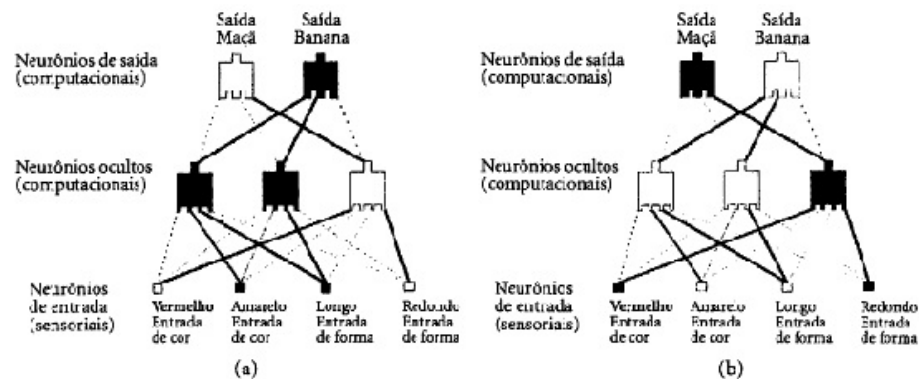


FIGURA 4-1. (a) Banana (b) Maçã.

Assim que o “Problema XOR” foi resolvido, poder-se-ia corretamente afirmar que o Perceptron de Frank Rosenblatt tinha ganho o direito a um lugar na sala de exposições no *Smithsonian*. Entretanto, sem um método relativamente direto de se comprovar que, em grandes redes neurais de camada múltipla, a culpa de um erro poderia *ser sempre* localizada, a teoria inteira das redes neurais continuava em risco de ser mais uma vez atingida por outra prova de impossibilidade, a qual, mesmo estando outra vez incorreta, atrasaria o campo de estudos por mais 20 anos. Por fim, ninguém estaria interessado em um computador que *poderia* lhe dar a resposta certa.

De fato, em 1974, esse problema já havia sido resolvido - por meio de uma tese de doutorado em Física¹ - e, durante a década seguinte, recebeu várias outras soluções.² No entanto, nessa época os pesquisadores estavam trabalhando em tantas disciplinas díspares — física, engenharia, matemática pura, neurociência, computação - que somente na década de 1980 começaram a conhecer os sucessos obtidos pelos colegas. Em sua forma final, a resposta passou a ser conhecida como *error back-propagation algorithm* [algoritmo de retropropagação de erros] ou, abreviadamente, *back-prop*, e representou um marco importantíssimo no desenvolvimento da computação biologicamente modelada.

A ideia básica é a seguinte: o grau em que a rede está incorreta deve ser *automaticamente propagado de volta pela rede [até a origem do erro]*. A pessoa que constrói a rede não decide quanto deve enfraquecer a força de cada conexão, mas formula uma regra fixa que diz o quanto a rede se acha incorreta (por meio de uma fração entre 0 e 1). A rede é construída de tal modo que esta fração seja

retroenviada por meio das conexões, enfraquecendo seus pesos em uma quantidade proporcional, na medida em que localiza as conexões responsáveis pelo resultado errôneo. Uma vez que diferentes neurônios são ativados em intensidades diferentes, dependendo tanto das forças de conexão como das diversas entradas, as conexões fortes entre neurônios muito ativos que geram más respostas irão suportar o peso da culpa e serão “punidas”. E como se um general que perdeu uma batalha distribuisse por todos os seus comandados a mensagem: “Seu desempenho foi *terrível*”. Os oficiais no comando dos batalhões que participaram da batalha têm imputada a culpa. Se a regra for: “Nenhuma promoção e dois rebaixamentos de posto por batalhão, em consequência de uma terrível derrota”, então nenhuma promoção será conferida, e logo serão determinados dois rebaixamentos nesse batalhão em particular. Porém, nessa hipótese, os batalhões que não estiveram envolvidos na derrota permanecem intocados.

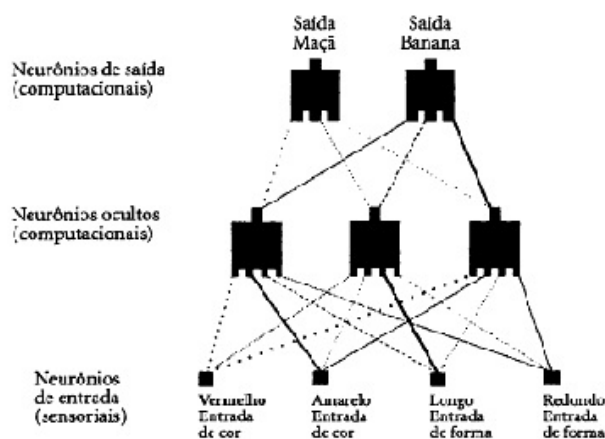


FIGURA 4-2. Rede neural de nove neurônios e 18 conexões (sinapses) para resolver o problema de discriminação entre bananas e maçãs.

Dando a uma rede neural milhares de exemplos semelhantes, e forçando-a, pela repetição incansável, a assimilar, ela irá acabar por aprender a detectar padrões nos dados que poderiam permanecer invisíveis até mesmo para um sofisticado especialista humano. Considere isto: a Figura 4-2 apresenta a rede neural para bananas e maçãs antes que tenha sido treinada a discriminar entre bananas e maçãs.

No começo, todos os neurônios da rede estão inativos (em negro) e suas forças de conexão são aleatórias, mas todas próximas de zero (linhas densamente pontilhadas para um pouco abaixo de zero, Unhas cheias, mas finas, para um pouco acima de zero). Apresentamos à rede um conjunto de treinamento de, digamos, 50 bananas e 50 maçãs. Vamos ser generosos com nossa rede-bebê e

evitar uma grande proporção de frutas que possam causar confusões, tais como maçãs amarelas e bananas avermelhadas -, do mesmo modo que iremos ter muito cuidado ao ensinar os princípios básicos de qualquer área para crianças pequenas.

Vamos supor que a primeira coisa que iremos mostrar à rede será uma maçã. Os neurônios para “vermelho” e “redondo” se acendem - na Figura 4-3a, estamos captando o seu estado antes que tenham oportunidade de passar sua excitação para os neurônios médios e “ocultos” [*hidden*].

Esta ação faz com que os neurônios ocultos e, a seguir, os neurônios de saída [*output*] entrem em atividade em vários graus, dependendo das forças de conexão aleatórias [*randorn*] com que estão interligados. (Veja a Figura 4-3b.)

Devido à forte conexão entre o neurônio oculto mais à esquerda e o neurônio de saída mais à direita, a rede produz um sinal para "banana" mais forte do que para "maçã". O grau exato do erro - até que ponto o neurônio se excitou (intensidade da luz) erroneamente - é propagado de volta por meio da rede e, assim, as forças de conexão são ajustadas. Eventualmente, a rede "converge" para uma distribuição de forças de conexão (que podem ser muitas), como a mostrada na Figura 4-3b, que é capaz de distinguir corretamente entre maçãs e bananas.

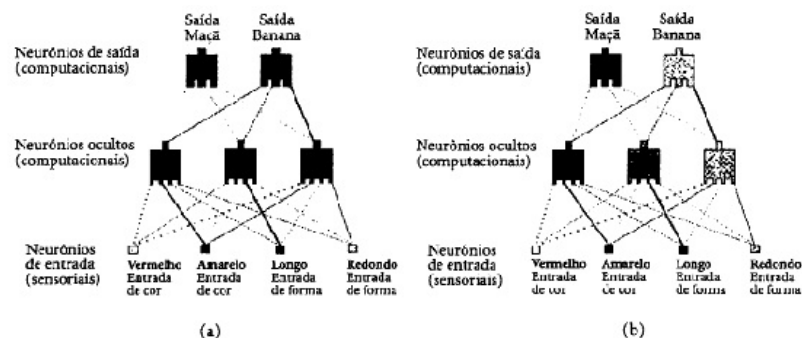


FIGURA 4-3. (a) Uma maçã foi apresentada à rede. Portanto, os neurônios de detecção das características “vermelha” e “redonda” (*inputs*) são ativados. As excitações desses neurônios ainda não atingiram os neurônios ocultos (*hidden*) e os de saída (*output*). (b) Os neurônios de detecção das características “vermelha” e “redonda” (*inputs*) excitam os neurônios ocultos (*hidden*) e estes, por sua vez, excitam os neurônios de saída (*output*). O nível de ativação é uma função de (1) até que ponto os neurônios precedentes são ativos e (2) de qual é o grau de energia de suas forças de conexão.

O catálogo do cérebro holográfico

Sem que jamais tivesse sido “ensinada” de que “bananas são longas e amarelas e maçãs são vermelhas e redondas”, a rede “deduziu” a regra sozinha.

A palavra "deduziu" deve ser colocada entre aspas porque, de fato, a regra não é explicitada em lugar algum: é apenas embutida *tacitamente* no padrão final de forças de conexão (pesos). Entretanto, as *imagem* de bananas e de maçãs foram *memorizadas* pela rede - da mesma maneira (ou de forma muito semelhante) àquela com que nós memorizamos as imagens de tudo o que existe, de modo a podermos identificar o seu aparecimento da maneira adequada.

Onde são armazenadas as imagens de maçãs e de bananas? Em parte alguma e em toda parte. Cada uma dessas imagens *é distribuída em paralelo ao longo da rede tomada como um todo* por isso, o designativo "processamento distribuído paralelo", que obscurece as origens biológicas [e humanas] do método. Ambas as imagens "ocupam" a mesma rede de sinapses e nenhuma pode ser localizada em um único ou exclusivo ponto da rede.

De uma maneira geral, à medida que a rede memoriza as diferenças entre maçãs e bananas, passa a cometer progressivamente menos erros. Assim como ocorria com HER, algumas vezes, porém, ela apresenta retrocessos. Mas quanto mais vezes retroceder, mais forte será a mensagem de erro e mais depressa ela seguirá em frente. *Recueillez pour mieux sauter*; como dizem os franceses: "Recue para saltar melhor" ou para avançar melhor. Com o decorrer do tempo, o erro médio pode ser o descrito pela Figura 4-4.

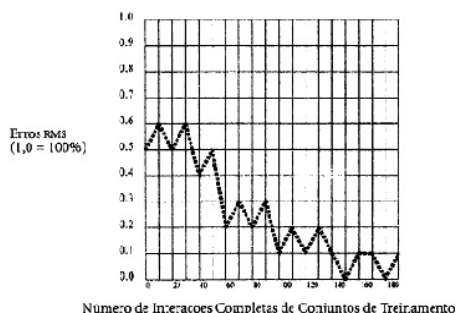


FIGURA 4-4. Erros RMS durante o treinamento (RMS = *Register Management Service* = serviço de gerenciamento de registros, um conjunto de rotinas).

A escolha dos vencedores

Cada cidade de tamanho médio nos Estados Unidos tem, pelo menos, uma agência de corretores de ações. Em qualquer dia útil, pode-se entrar em uma dessas agências e assistir a uma cena que mudou muito pouco por mais de um século: sentado em uma fila de cadeiras ou poltronas está um grupo de aposentados. Eles ficam sentados ali durante horas, conversando a respeito de suas vidas, seus filhos e seus netos. Mas, enquanto conversam e riem, seus olhos estão constantemente vigiando uma linha de movimento rápido, formada por

letras e números eletrônicos.

Esses são os novos “leitores de teletipo” americanos - amadores que investiram as economias guardadas para sua aposentadoria em ações da bolsa e que tomam decisões independentemente da “teoria do portfólio”, das “proporções de lucros dos preços” ou de “apostas no valor de mercado”, e se concentram horas e dias na observação de símbolos velozes que correm diante das “camadas de entrada” de sua retina diretamente para o quarto cérebro.

O processo de entrada quase nunca perturba a amável troca de histórias. Há muito tempo, cada um desses homens designou a um subconjunto de neurônios a tarefa de coletar os dados e realizar sua classificação e seu processamento. Eles “lêem” as cotações do mercado de ações do mesmo modo que dirigimos automóveis - sem pensar, com habilidade, quase inconscientemente, com nossas “mentes” ligadas em outro pensamento qualquer.

Em seu conjunto, esses jogadores são bastante astuciosos. Raramente enriquecem (e são espertos o bastante para não tentar), porém, frequentemente transformam aposentadorias que mal dão para viver em rendas bastante confortáveis. Como é que conseguem?

Vamos dar uma rápida espiada em uma versão resumida das redes de investimentos reais que se encontram atualmente em uso em cada agência de investimentos, redes que imitam a “intuição” baseada na experiência, e não em teorias de nossa fila de “jogadores”. A rede é composta por 28 neurônios, 20 na camada de entrada, sete ocultos e um único neurônio de saída. Todos os neurônios da camada de entrada se ligam diretamente à camada de saída individual, da mesma maneira que se ligam a todos os neurônios ocultos. Desse modo, *todos os neurônios* estão interconectados uns com os outros. Os 28 neurônios são, assim, conectados por um total de 167 pesos modificáveis.

A cada entardecer, colocamos os valores de conclusão das operações dos 20 dias anteriores, conforme os índices S&P 500 (Ações e Preços) em seus 20 neurônios de entrada. O neurônio de saída prediz quanto o valor de encerramento do dia seguinte irá diferir do final do último dia registrado pela entrada. Não ensinamos *nada* à rede sobre estratégias de investimentos, regras de economia ou administração de empresas. Simplesmente lhe fornecemos uma sequência única das conclusões controladas pelo sistema S&P 500 durante os últimos 20 dias e deixamos que ela adivinhe quais serão os valores ao final do dia seguinte. Então, comparamos os resultados obtidos por meio da adivinhação com os resultados finais e a retroalimentamos com os valores dos erros cometidos. Sua resposta aos erros é uma alteração dos pesos, de acordo com o algoritmo de retropropagação de erros. Mais uma vez oferecemos uma nova sequência e, depois, os novos valores de erros. Repetimos o processo até que a

rede tenha absorvido seja lá o que for que subjaz às mudanças de valores dos índices.

Para ser o mais exato possível, o que iremos fazer será alimentar a rede durante 760 períodos consecutivos de operações com os resultados de encerramento do S&P 500, de 4 de agosto de 1989 até 2 de julho de 1992 - em outras palavras, 760 conjuntos de 20 dias de dados = 15,2 mil entradas totais por conjunto. Este conjunto completo de dados será colocado 50 mil vezes na rede. Dessa maneira, a rede terá absorvido e processado, sem receber quaisquer instruções, apenas o retorno positivo ou negativo sobre como está sendo realizado um total de 760 milhões de conjuntos de dados. Devido à velocidade dos computadores modernos, todo esse treinamento irá requerer um tempo de 40 segundos, no total - o que é um pouco mais rápido que os cérebros de nossos aposentados.

Para que consigamos lhe comunicar uma impressão sobre a complexidade da capacidade de interconexão de uma rede dessas - e para a esmagadora quantidade de sinalizações que ocorrem dentro dela a Figura 4-5 mostra um esquema simplificado do aspecto da rede.

Depois que o treinamento foi concluído, os pesos já terão sido estabelecidos em algum tipo de padrão final, o que acontece porque a rede "converge", ou seja, os erros vão pouco a pouco diminuindo e, desse modo, também diminui a necessidade de ajuste de qualquer peso. Quando quaisquer futuras modificações nos pesos se demonstrarem insignificantes, damos liberdade à rede e permitimos que prediga o encerramento do próximo dia 21 depois de uma entrada de um novo conjunto de 20 dias consecutivos, durante um total de 240 dias, começando 20 dias depois do encerramento de seu período de treinamento (aqui, 22 de julho de 1992), encerrando esta segunda fase 240 dias de operações mais tarde (23 de junho de 1993).

Observe que, nessa oportunidade, *a rede deve basear suas previsões sobre dados que nunca viu antes* tendo como base apenas sua experiência anterior. Se a treinarmos uma única vez - sem forçá-la para que tenha uma "educação continuada" -, os dados do treinamento irão se tornando cada vez mais obsoletos. Se os relacionamentos "intuídos" pela rede entre os desempenhos passados e futuros do mercado forem lentamente se modificando no decorrer do tempo, suas predições se tornarão progressivamente menos acuradas.

A Figura 4-6 mostra os resultados. Primeiro, podemos observar uma medida-padrão usada pelos corretores para suas próprias adivinhações sobre as tendências do mercado, a chamada "média móvel", e a comparamos com os preços reais na conclusão dos índices S&P 500 para o nosso período de 240 dias de operações de teste. A média móvel consiste simplesmente da média numérica

dos 20 dias de operações precedentes, utilizados como base para a predição dos resultados para o 22-dia, média que é cotejada contra as previsões da rede neural, comparadas com os dados reais.

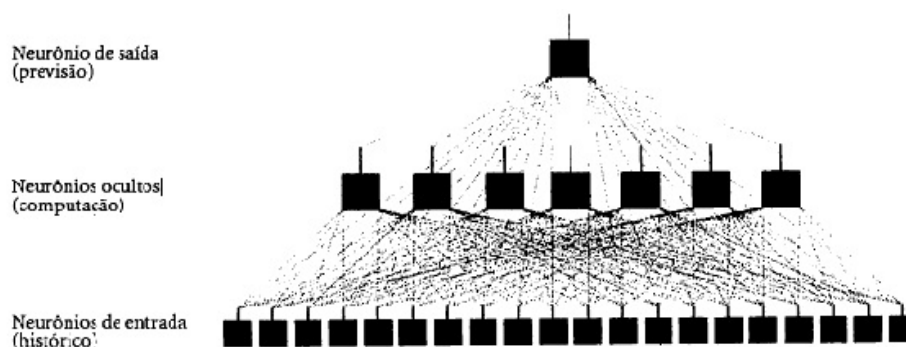


FIGURA 4-5. Rede de previsão para os preços de mercado S&P 500.

Os resultados da rede neural são claramente superiores ao da média móvel, em especial nos primeiros dias. Depois de 90 dias, entretanto, as previsões da rede começam a divergir de maneira considerável dos índices reais do mercado de ações. Não importa quais sejam as regras tácitas que nossa rede tenha inserido nos padrões de seus pesos, não são regras fixas - mudam no decorrer do tempo, e os padrões assimilados pela rede vão ficando, em consequência, superados.

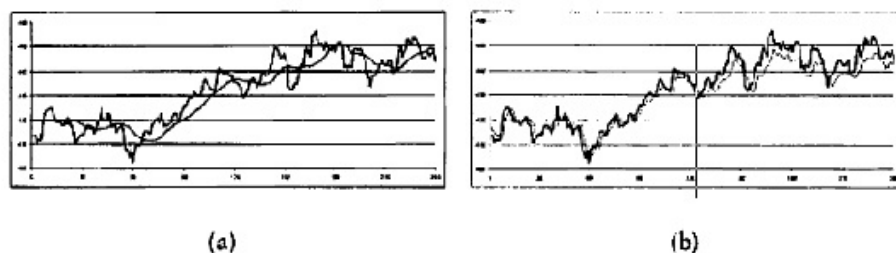


FIGURA 4-6. (a) Índice de Ações S&P 500 (linha grossa) versus a média móvel durante 20 dias (linha fina). (b) Índice de Ações S&P 500 (linha grossa) versus previsões mostradas pela rede durante 20 dias (linha fina).

Como a rede pode se adaptar a essas mudanças nas regras ocultas que governam as alterações dos preços do mercado de ações? Da mesma maneira que nossos investidores aposentados fazem: eles não passam alguns anos treinando com o teletipo para depois ficar aplicando o que absorveram sem qualquer treinamento ulterior. Ao contrário, depois de (talvez) um período inicial de investir em maus papéis, continuam a aprender por meio de seus erros. E isso

que acontece também com as redes artificiais realmente em uso pelos investidores para suplementar as redes biológicas contidas em suas próprias cabeças. A cada noite, depois do fechamento do mercado, a rede é retreinada nos (digamos) quatro últimos anos de dados precedentes, *excluindo-se um dia do começo e adicionando-se os dados do último dia*.

A rede típica, que vem sendo utilizada para previsões do mercado (e outros ambientes financeiros), reprocessa diariamente pelo menos os dados de cem encerramentos. Por que não mil dias? Porque descobriu-se que pelo menos cinco pontos de dados de treinamento são desejáveis por conexão e, em uma rede de cem neurônios de entrada, existem, portanto, mais de 5 mil conexões. Para evitar a realização de inferências espúrias (a marca registrada de um baixo nível de inteligência!), uma rede de operações de mil dias deveria ser treinada em, pelo menos, 12 mil encerramentos *acurados* do mercado. Isso representa informações de grande qualidade durante 50 anos, coisa que nem sempre é fácil obter.

Presumindo que essa quantidade de dados possa ser obtida, a rede deve processar novamente, a cada noite, aproximadamente *60 bilhões* de peças de informação, e, para conseguir estar retreinada antes que o mercado inicie suas atividades na manhã seguinte, deve processar esses dados mais de 30 vezes o número de conexões percorridas pelo nosso previsor de resultados da bolsa anteriormente modelado.

Há alguns anos, apenas as maiores empresas de investimentos dos Estados Unidos e do Japão dispunham dos recursos para realizar esse tipo de computação maciça (do mesmo modo que um punhado de investidores individuais muito habilidosos teve a visão de adquirir velhos modelos de supercomputadores, cujo valor de venda diminuiu violentamente assim que os novos modelos entraram no mercado). Hoje, um computador de 700 MHz pode cumprir a tarefa em cerca de 20 horas - o que serve bem para um fim de semana, mas é lento demais para os dias úteis. Desse modo, tanto nos Estados Unidos como no Japão, projetos em grande escala estão sendo executados, buscando criar imensas redes neurais *baseadas em hardware*., em que os “neurônios” não são modelados via software, mas sim impressos em circuitos eletrônicos especialmente projetados. Esses circuitos neurais serão capazes de realizar a tarefa pelo menos mil vezes mais depressa que um supercomputador-padrão.

Como um exemplo do que pode ser realizado utilizando-se apenas redes neurais implementadas como software em computadores pessoais do tipo *desktop*, considere uma rede desse tipo que foi treinada para operar com *commodities* em base diária. Depois de nove meses, havia retornado 103 dólares para cada dólar do investimento inicial³, um resultado geral melhor até mesmo

que o da mal-afamada rede de conexões de Arkansas [usada para influenciar o mercado].

NetTalk

Um dos grandes marcos no desenvolvimento prático da tecnologia de redes neurais, *e também* em nossa compreensão do cérebro humano como sendo uma rede neural, foi um sintetizador de fala apresentado em 1987, denominado *NetTalk*,⁴ O NetTalk foi o primeiro dispositivo computadorizado capaz de ler textos redigidos em inglês e de pronunciar as palavras corretamente. Esta é uma tarefa extraordinariamente difícil. Mesmo as *regras formais* da pronúncia inglesa, da maneira como são escritas no começo de um dicionário, são altamente inconsistentes e cheias de exceções. No entanto, as regras reais e *tácitas* - ainda que um falante nativo do inglês possa reagir instantaneamente à violação das regras formais - são de fato complexas demais para jamais terem sido explicitadas. Os computadores convencionais nunca chegaram a parte alguma no que se refere à sintetização da fala porque, simplesmente, não existem “especialistas” que consigam codificar essas regras e possam, assim, realizar metade da tarefa de forma mais ou menos decente. Todavia, após alguns anos, ainda na primeira infância, qualquer criança as aprende perfeitamente.

O desafio inerente à sintetização da fala é que o som correto de uma letra ou de uma combinação de letras depende de uma feição extremamente complicada das letras que a precedem ou a seguem. (algumas pronúncias também dependem do significado da palavra, porém os pesquisadores logo raciocinariam que o significado se correlaciona quase sempre com o conjunto de letras imediatamente anterior ou posterior - tomado como um conjunto. As exceções envolvem longas séries com hete-rônimos múltiplos, tais como read [ler {rid}] ou leitura {réd}], sow [semear {sôu}] ou porca [sáu]], bow [curvar-se {bôu}] ou laço (báu)] ou tear [rasgar {tér}] ou lágrima [tíar]]. Por exemplo, na sentença: “You know, the lead is a really big problem”, você não pode dizer imediatamente se vai pronunciar “led”, um metal mortífero [você sabe, o chumbo é realmente um grande problema] ou “lid”, um ator mortífero em um sentido bem diferente [você sabe, o protagonista é realmente um grande problema]. Você precisa de um contexto maior do que as letras imediatamente anteriores e posteriores). Considere a sentença: “This chair is a chaise” [Esta cadeira é uma *chaise*]. As letras *Y* em *this* e em *is* são pronunciadas de maneira diferente, embora ambas pertençam à mesma sequência de letras “*is*”. Os “*ch*” de *chair* e de *chaise* também possuem pronúncias diferentes, embora esse grupo consonantal, nos dois casos, forme as duas primeiras letras da mesma sequência de quatro letras “*chai*”. De modo semelhante, o grupo vocálico “*ai*” da sequência “*chai*” é pronunciado de maneira diferente em *chair* e em *chaise*. Entretanto, uma criança de 6ª série, razoavelmente educada, não deverá ter qualquer dificuldade em pronunciar palavras ainda mais complexas, como

“Sherry, this cherry-colored chair is a chaise”. Mas, durante décadas, os programas computadorizados de sintetização de voz eram desajeitados e soavam com uma pronúncia estranha. Deles apenas podíamos esperar que as palavras fossem reconhecidas, mas não como sons produzidos por seres humanos. Então, surgiu Terence Sejnowski.

Depois de se formar na Universidade Case Western, como o primeiro aluno da classe, Sejnowski transferiu-se para Princeton. Ali se curvou sob o encanto das redes neurais, enquanto era esperado que estudasse para seus exames de qualificação em Física. Essa mudança não foi tão estranha como possa parecer, porque a física teórica e a teoria das redes neurais na prática se mostram intimamente relacionadas.

Em 1985, antes de sair de Princeton, Sejnowski realizou uma conferência em que fez disparar a imaginação de Charles Rosenberg, um estudante de graduação em Psicologia, que também era um *expert* em programação. Rosenberg procurou Sejnowski em busca de orientação para um projeto de verão, de preferência alguma coisa que tivesse a ver com a linguagem. Sejnowski sentiu-se atraído pelo desafio de sua proposta e decidiu-se a orientar e participar do projeto. Rosenberg construiu uma rede de retropropagação de erros, mas não a programou com regras de pronúncia ou de ortografia. Seu “método” foi exatamente o que costuma ser utilizado para crianças. O engenho cometeu muitos erros ingênuos, repetiu a rotina e, devagar, foi cometendo menos erros, e os que ainda escapavam iam se tornando pouco a pouco menos ingênuos.

Os projetistas do NetTalk adotaram o conjunto de fonemas mais típico do inglês americano padrão. A camada de entrada da rede foi alimentada por uma série de textos, incluindo pontuação e espaços. Depois, foi acrescentado um caractere final para cada letra, e estas foram introduzidas como entrada em um gerador de som. Acontece que as pistas essenciais sobre a maneira como uma letra deve ser pronunciada se encontram no contexto; uma letra sozinha não é suficiente em parte alguma da fala. Assim, Rosenberg e Sejnowski escolheram “janelas” sucessivas de sete letras como entrada básica, deslizando a janela ao longo do texto disposto como uma fita: em outras palavras, as três letras precedentes, a letra em questão e as três letras seguintes.

No começo, os sons que a rede gerava para cada letra que estava “lendo” eram selecionados de forma aleatória. Sejnowski e Rosenberg haviam projetado uma regra de aprendizagem que designava um valor, de acordo com o grau de deficiência com que a rede pronunciava de maneira errônea as letras centrais das janelas. Para cada sequência de sete letras, o valor do erro era automaticamente calculado e retropropagado por meio das conexões. (Todavia, a rede nunca recebeu informações sobre qual seria a pronúncia correta.) Essas conexões foram

sendo modificadas de acordo, e a rede, lentamente, seguiu em frente, caindo com tropeços e se levantando, até adquirir uma pronúncia cada vez melhor.

Que tamanho tinha a NetTalk? Para cada letra sucessiva encontrada no texto, a rede recebia um total de sete letras: a própria letra, as três letras antecedentes e as três letras posteriores. Considerando-se que o alfabeto inglês tem 26 letras, mais o espaço, a vírgula e o ponto, todos estes vezes sete, a rede utilizava um total de $29 \times 7 = 203$ neurônios de entrada. A cada apresentação de uma letra ou caractere, sete neurônios de entrada eram ativados.

A camada oculta era constituída por 80 neurônios, (o número ideal de neurônios na camada oculta de uma rede de retropropagação de erros é também determinado por um processo de tentativa e erro, informado por uma série de regras de bolso que se demonstraram importantes no decorrer dos anos. Frequentemente, seu número é ditado pela quantidade de dados de treinamento confiáveis que se acham disponíveis e qual a quantidade desses dados que pode ser de fato processada pelo emprego dos recursos disponíveis dentro do tempo disponível) e a camada de saída, por 26. Vinte e três dos neurônios de saída eram dedicados à geração de sons individuais e três dedicados à acentuação silábica. O sinal líquido de saída consistia de várias *combinações* das saídas individuais desses 26 neurônios. O sinal de saída individual que apresentasse maior peso era alimentado como entrada em um conversor digital, a fim de produzir um sinal audível.

A rede tinha aproximadamente 4 mil conexões, que poderiam variar, de acordo com o treinamento. Era uma rede extremamente simples, se comparada com aquelas que funcionam no quarto cérebro humano. A Figura 4-7 lhe dará uma sensação melhor das extraordinárias complexidade e densidade das conexões que se encontram por trás da inteligência e do comportamento humanos.

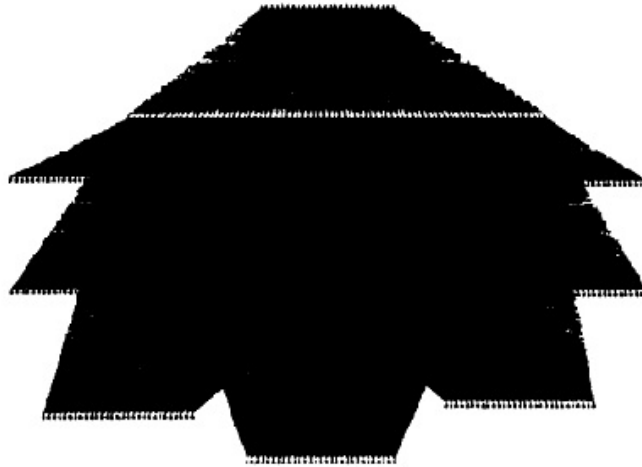


FIGURA 4-7. Apresentação esquemática da NetTalk, mostrando os neurônios como sendo minúsculos quadrados negros com pequenas projeções verticais, representando os axônias (como nos esquemas anteriormente apresentados, porém em escala muito menor). Todas as conexões foram desenhadas, utilizando-se finas linhas pontilhadas individuais em escala cinza. A cor sólida resultante se deve ao grande número e à proximidade dessas linhas, até 203 para cada neurônio de entrada. (Os neurônios de entrada foram segregados em sete grupos, buscando melhorar a visibilidade de suas conexões.) Compare com o quarto cérebro humano, em que cada neurônio pode, ao mesmo tempo, projetar ou receber até 10 mil conexões.

A NetTalk realmente alcançou sucesso em aprender a pronunciar a língua inglesa, conforme se esperava. Mas a característica mais impressionante de seu desempenho, notada por muitos observadores, era *a maneira* de seu progresso, que dava a impressão de *ser exatamente a mesma maneira com que as crianças progridem*. “A rede começou balbuciando [...]”, escreveu um autor, mas “a distinção entre vogais e consoantes foi estabelecida bem no começo. Um segundo estágio ocorreu quando os limites entre as palavras foram reconhecidos. Nesse ponto, a saída já soava como pseudopalavras”⁵, um estágio reconhecível por qualquer pai ou mãe de uma criança que estivesse começando a aprender a falar, um bebê que ainda fica deitadinho, feliz em seu berço, “fingindo” que fala.

Depois de ter sido introduzida 50 mil vezes a uma seleção de 1.024 palavras, a NetTalk já se demonstrava correta 95% do tempo quando testada, empregando-se o conjunto de treinamento. Quando lhe apresentavam palavras que nunca havia visto antes, sua pronúncia passava a ser 80% correta. Compare esses resultados com os de uma criança no primário que lê uma palavra nova - com que frequência lê essa palavra corretamente, sem precisar de qualquer correção?

Entretanto, tão complexas e capazes como se demonstraram as redes neurais artificiais, essa complexidade empalidece em comparação com o quarto cérebro humano sobre o qual foram modeladas. E para isto que nos voltaremos a seguir.

5. A REDE UMIDA

Mente: uma forma misteriosa de matéria secretada pelo cérebro. Sua principal atividade consiste em um esforço para identificar qual é a sua própria natureza, uma tentativa cuja inutilidade se deve ao fato de que ela não dispõe de nada, a não ser ela mesma, para conhecer a si própria.
- Ambrose Bierce, *O dicionário do diabo* (1906).

Em 1913, um histologista espanhol de 54 anos, Santiago Ramón y Cajal, da localidade de Petilla de Aragón, na Espanha, recebeu o Prêmio Nobel de Medicina por sua “doutrina dos neurônios” - a hipótese de que a célula nervosa é a unidade fundamental do sistema nervoso. A Figura 5-1 apresenta um de seus desenhos, hoje famosos, de uma fina secção do tecido cerebral, tingida com nitrato de prata para salientar os neurônios.

Embora a secção apresente a aparência emaranhada típica dos tecidos orgânicos, revela uma evidente quantidade de ordem. Dezenove neurônios piramidais são arranjados em mais ou menos duas camadas, a primeira consistindo de oito células maiores, e a segunda de 11 um pouco menores. Todas parecem orientadas de tal forma que seus vértices apontem para cima, enquanto são projetados desses vértices, também verticalmente, longos filamentos grossos que, após algum tempo, se dividem horizontalmente. Entrando (ou saindo) dos cantos da base das pirâmides, estende-se uma imensa quantidade de projeções mais finas, que apresentam ramificações. E a mesma estrutura utilizada nas redes neurais artificiais, uma projeção saindo e uma entrando em cada neurônio, do mesmo modo que ocorria com nossa rede identificadora de bananas e maçãs.



FIGURA 5-1. Córtex visual humano tingido com nitrato de prata, desenho de Ramón y Cajal, datado do princípio da primeira década do século XX.

Acontece, no entanto, que o desenho minucioso de Cajal corresponde a uma fração inacreditavelmente minúscula do córtex cerebral - captura menos de um bilionésimo do número de células que compõem o quarto cérebro. Será que realmente seria possível que *20 bilhões* de neurônios possam se achar interligados, de acordo com um esquema fixo, conforme os neurocientistas (até recentemente) vêm insistindo já há tanto tempo? Isso se encontra além das possibilidades, uma vez que percebemos que os corantes de Cajal apagaram tanto o tecido conjuntivo não-neurônico que rodeava o sistema desenhado por ele (a sua grande realização histológica) como também eliminaram a maioria das conexões existentes entre os neurônios. Em um cérebro vivo, cada célula cerebral *possui mil vezes mais conexões* que as que aparecem na figura. O desenho de Cajal captura de forma nítida (e acurada, como se comprovou posteriormente) apenas o *padrão geral* de conectividade entre os neurônios, mas distorce completamente a *densidade real* das conexões que existem em profusão no cérebro vivo. Essas conexões formam uma rede tridimensional de densidade quase inconcebível, por meio da qual é formada uma teia de elos e ligações entre os neurônios.

No quarto cérebro humano, *cada neurônio envia e recebe até 10 mil conexões*. Assim, apenas até o ponto em que o nível de complexidade permanecia insuspeitado foi possível pensar no cérebro humano como se tivesse uma fiação semelhante à de um rádio ou de um computador convencional.

Um punhado de neurônios artificiais, com pouco mais de uma dúzia de conexões cada um, pode aprender a identificar as diferenças entre maçãs e bananas; uma dúzia, com algumas dezenas de conexões, pode ser ensinada a jogar Hexapawn ou o Jogo da Velha, de uma maneira perfeita e em questão de segundos. Cinquenta e poucos, interligados por cerca de 1,2 mil conexões, têm, na realidade, obtido maior sucesso na diagnose de ataques cardíacos em uma

sala de emergência hospitalar do que uma equipe especializada de cardiologistas. Cem neurônios, com alguns milhares de conexões, podem ganhar dinheiro - de fato, muito dinheiro - em um mercado notoriamente volátil. Algumas centenas podem imitar o desenvolvimento da fala humana. Desse modo, de que seriam capazes os multiquatrilhões de conexões de 20 bilhões de neurônios naturais existentes em cada cérebro humano? Vamos apresentar a questão de maneira diferente: existe alguma coisa, que já *saibamos* que pode ser realizada pelo cérebro humano, que *não se encontre* ao alcance de uma rede neural completamente mecânica de tamanho suficiente? Só poderemos responder a esta questão depois de considerar certas sutilezas adicionais do cérebro que puderam ser incorporadas com sucesso às redes artificiais, a fim de fazer com que funcionassem ainda melhor.

Sim, gentilmente na noite

Hoje, nossas vidas estão repletas de circuitos de computação miniaturizados. Esses circuitos regulam a velocidade de nossos automóveis, a temperatura dos prédios de escritórios, os sistemas de alarme que guardam nossas propriedades - e milhares de outros exemplos, numerosos demais para serem incluídos em uma lista. A maioria desses circuitos [*chips*] emprega uma programação que tem como base regras padronizadas que foram gravadas nos próprios circuitos. Eles são formados por centenas e, até mesmo, milhares de pequenas subunidades ligadas entre si por uma fiação determinada por um plano preciso. Se apenas uma dessas subunidades falhar ou se apenas um dos minúsculos fios de ouro inscritos em uma placa de circuitos quebrar, o dispositivo inteiro falha.

Um dos enigmas dos primeiros anos da neurociência era a chamada “tolerância a falhas” do cérebro humano. Os pesquisadores sabiam muito bem da existência de casos extremos - trauma craniano, infecções, doenças degenerativas (por exemplo, Alzheimer) — em que *milhões* de neurônios podem morrer e, portanto, *bilhões incontáveis* de conexões podem ser seccionadas, sem que qualquer efeito aparente seja detectado. Devido à natureza biológica do cérebro, muitos milhares de neurônios devem morrer no decurso normal dos eventos, sem que possa ser detectada a mais leve perda de função. Como isso pode ocorrer? A resposta é simples e apresenta a elegância prática que é a marca registrada das soluções encontradas pela natureza no enfrentamento de desafios. O cérebro utiliza aleatoriedade - e um computador que funciona *dessa maneira* não se importa muito se as suas entranhas ficarem um pouco misturadas, pois elas já são misturadas desde o *início*.

Veja como funciona: até aqui, descrevemos redes em que *todas* as conexões permissíveis entre camadas de neurônios podem ser ativadas. O que aconteceria caso, aleatoriamente, eliminássemos algumas? Seria a mesma coisa que colocar desde o início a fiação de uma rede, não somente com uma distribuição inicial de forças de conexão aleatoriamente distribuída (“inicializada”, como se diz), mas com um conjunto de conexões também ligadas de forma casual. Veja um exemplo: treinamos uma rede de 28 conexões (que classifica flores), observamos o erro final, aleatoriamente apagamos duas de suas conexões, reiniciamos o sistema e repetimos o processo até que não reste qualquer conexão. A Figura 5-2 representa cada um desses experimentos, com o pequeno triângulo mostrando com que frequência a rede está incorreta, depois que o treinamento estiver completo.

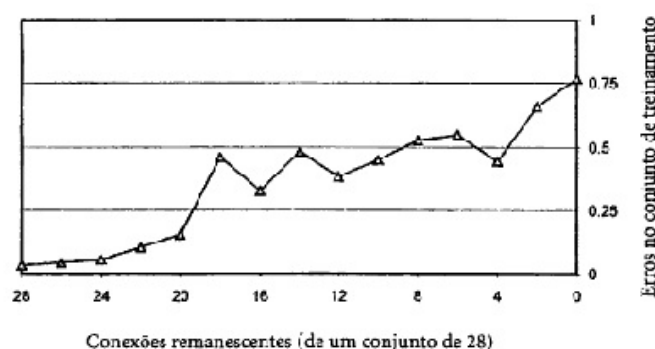


FIGURA 5-2. Raiz quadrada média do índice de erros de uma rede, apresentando, no entanto, números diferentes de conexões casualmente selecionadas entre 28 possíveis.

Verificamos que a rede só começa a demonstrar sinais significativos de perda de inteligência depois que mais ou menos 25% das conexões desapareceram - o que é indicado por uma diminuição de sua capacidade de aprendizagem. Além disso, percebemos que ela não perde inteligência de uma hora para outra, como teria acontecido com um circuito pré-programado, e sim de forma gradual - "degradação graciosa" é o termo utilizado na linguagem técnica tanto da informática como da neurociência. Expandindo o eixo horizontal não apenas por 28, mas por 10^{14} conexões, consegue-se entender perfeitamente por que o quarto cérebro é tão resistente. A perda de neurônios reais produz os mesmos resultados; se quiser, pode pensar na perda de um único neurônio como sendo equivalente à perda de todas as suas conexões.

Podemos usar essa percepção para entender o surgimento insidioso e o curso típico de doenças degenerativas como Alzheimer. O mal de Alzheimer avança silenciosamente durante muitos anos, antes que a perda de neurônios se torne grande o suficiente para provocar uma degradação cognitiva perceptível.

Todavia, a essa altura, a perda de tecido nervoso já é tão pronunciada que pode ser vista na escala relativamente grosseira de uma tomografia computadorizada (CT) do cérebro ou percebida por uma varredura de imagens por ressonância magnética (MRI).

Se observarmos o mesmo fenômeno de um ponto de vista levemente diferente, podemos entender outra das características que causam tanta perplexidade com relação ao mal de Alzheimer: a perda da chamada *memória de curta duração*, que é, na verdade, outra forma de descrever uma *diminuição da capacidade de aprender* (que, nos casos extremos, é totalmente perdida). (Para ver sua equivalência, pense em uma piada de humor negro que corre nos círculos dos profissionais da área de saúde ou nas revistas especializadas em demências degenerativas: “Sabe, Alzheimer não é assim tão ruim. Pense em toda essa gente que você vai conhecer todos os dias”...).

Mas tudo isso tem ainda um outro aspecto. Em geral, Alzheimer é uma doença associada à velhice. Os neurônios (e suas conexões) perdidos para a doença são aqueles que fazem parte *de uma rede que já “convergiu”*, ou seja, que se transformou no conjunto de soluções, respostas e memórias que constituem a personalidade individual de uma pessoa. A essa altura, muitas das conexões que existiam na juventude já estariam enfraquecidas de qualquer maneira, como parte de uma vida inteira em que aprendemos por meio da experiência. No entanto, existem outras que se fortaleceram e exercem funções críticas. Sua perda é devastadora. Mas a perda de conexões *antes da convergência* - quer dizer, na juventude - pode não ser assim tão ruim. De fato, como se descobriu, uma *poda cuidadosa* de conexões selecionadas, em períodos de tempo cuidadosamente determinados, de fato apressa a convergência para o ponto do “erro zero”. Somente se a poda for excessiva ou fora de época é que prejudica ou destrói a inteligência da rede, como veremos na Figura 5-3.

A poda é, de fato, um processo normal do quarto cérebro, que se acelera de maneira intensa durante a adolescência. É fácil de entender por que acontece. A aprendizagem consome tempo e energia. Uma redução do número de conexões se traduz por uma “economia de custos” significativa, o que representa mais tempo de **CPU** - unidade de processamento central [*central processing unit*] para os cálculos em redes artificiais ou mais energia disponível para todas as tarefas que o cérebro humano como um todo executa (já que este normalmente gasta espantosos 25% de toda a energia que consumimos, ainda que em somente 2% da massa de tecidos que compõem todo nosso corpo).

A maneira *como* essa poda acontece novamente revela a sutileza das soluções biológicas. O estudo do mal de Alzheimer nos informa que, se as

conexões estabelecidas têm de ser *aleatoriamente reduzidas*, o melhor é que isso não aconteça *após* o treinamento. Porém, e se houvesse um meio de identificar as conexões relativamente *desnecessárias*, em particular as que se enfraqueceram no decorrer do tempo?

Estas poderiam ser eliminadas sem riscos. Em um primeiro momento, poderia dar a impressão de que algum tipo de intervenção interna seria necessário. Mas, de fato, tudo o que é necessário é que as conexões neuralmente fracas se tornem fisicamente fracas também. Desse modo, se tornariam vulneráveis a influências de caráter geral - álcool, trauma, infecções, febres, fluxos hormonais -, que não conseguem ter efeito sobre conexões mais fortes. E é justamente isso que acontece no cérebro humano, em especial sob o influxo violento de hormônios que são liberados durante a adolescência. Em sistemas biológicos (contrastando com os modelos matemáticos), não existe nenhuma necessidade para um apagamento deliberado e cuidadoso - os fracos perecem sozinhos. A “força de conexão” em neurônios vivos não é apenas um mero número dentro de uma linha de código. Ao contrário, é uma medida da robustez e densidade físicas reais de certas estruturas do tecido nervoso - as sinapses.

Como sempre, entretanto, não existe um lanche gratuito na natureza. A poda de uma rede tende a “fixar” uma rede que já se encontra adaptada, quer natural, quer artificial, nos problemas e dados específicos para os quais foi treinada. Se lhe pedirmos para se modificar - adaptar-se a um novo conjunto de dados ou aprender algumas novas categorias, além das antigas -, ela será muito menos capaz de cumprir as instruções do que uma rede que ainda possua seu complemento total de conexões. Passada a adolescência, nossos cérebros nunca mais serão tão flexíveis como na época de nossa infância. De fato, “a juventude pode ser desperdiçada com os jovens”, mas “não existe maior tolo que um velho tolo”.

Os efeitos da poda: normal e patológica

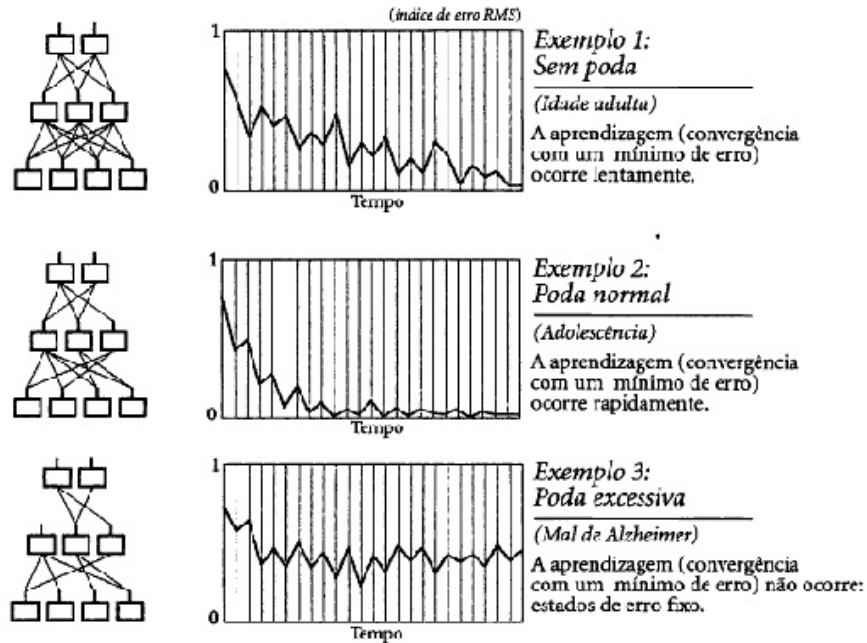


FIGURA 5-3. A poda é uma faca de dois gumes: tem efeitos benéficos sobre a velocidade de aprendizagem de tarefas novas, mas que são relacionados. Entretanto, se for levada longe demais, na melhor das hipóteses a rede passa a ter dificuldades de aprendizagem, uma situação que piora de maneira progressiva, à medida que o corte de conexões prossegue.

Então, como novos truques são ensinados a um cachorro velho?

Isso significa que é impossível aprender algo novo, ao mesmo tempo em que se *desaprende* algo velho? Existe um elevado número de experiências diárias que nos dizem exatamente isso. Os bebês aprendem as nuances de uma língua em uma proporção absolutamente assombrosa, com um grau de perfeição que jamais poderá ser atingido de forma idêntica quando aprenderem uma segunda língua, em um período posterior de sua vida; as crianças em idade escolar absorvem disciplinas novas em um ritmo vertiginoso e também semelhante, aprendendo os hábitos e os elementos essenciais de uma civilização inteira em quase uma década; pessoas com mais idade que retornam à escola, depois de uma longa ausência, realizam seu ajustamento de uma forma bem mais difícil; uma ideia comumente associada aos físicos, matemáticos e compositores é a de que realizam seus melhores trabalhos na idade de 20 ou 30 anos, para depois marcar passo ou, até mesmo, declinar.

Sem dúvida, a premissa básica da indústria da psicoterapia é a de que os padrões básicos de pensamento, emoções e comportamento são assimilados

durante a infância. Alterar esse tipo de comportamento requer um investimento maciço em dinheiro, que conduz a uma misteriosa “transformação”. (A indústria das clínicas de repouso naturalmente discorda — por razões pecuniárias semelhantes.)

Existe uma impressão muito difundida, embora em geral tácita, de que esta “mudança” significa libertar-se de velhos padrões e substituí-los por novos. Qualquer coisa que não corresponda a uma substituição total é considerada como uma destas duas situações opostas entre si: ou “a condição é desesperadora” ou “a condição é normal”, dependendo do modismo ou dos incentivos financeiros do momento.

A operação das redes neurais lança luz sobre todas essas noções errôneas e pode ter algumas implicações desconfortáveis com relação ao que podemos esperar de *nós* próprios e dos demais. Em resumo, com certeza *é possível* ensinar novos truques a um cachorro velho; apenas será mais difícil e dependerá de quais são os velhos truques que já tenha aprendido antes, além de ser necessário descobrir se esse cão tem ou não o tipo de personalidade que se dispõe a realizar um grande esforço para recomeçar, sem desistir. A transformação psicoterapêutica, fundamentalmente, é pouco diferente da mera aprendizagem (Freud, Jung e os outros que me perdoem), principalmente porque compartilha com a aprendizagem os mesmos tipos de obstáculo: preguiça, busca por novidades, desejo de gratificação instantânea e, muito especialmente, o impulso para *evitar* o fracasso. Não queremos nos lembrar dos homens e mulheres famosos que tiveram de cair para se erguer de novo, porque isso sugere inicialmente que, para enfrentar os nossos próprios desafios, precisaremos passar pelo mesmo processo.

A solução do problema do cachorro velho é simples e prática: repetição, perseverança, coragem, disposição para recomeçar tudo do princípio. Novos padrões podem ser envolvidos em uma nova rede com relativa rapidez. Porém, quando uma rede já convergiu para um conjunto específico de padrões e foi parcialmente podada, serão necessárias mais repetições para lhe “superpor” um novo padrão, em especial se for contraditório a um dos que já tinham sido aprendidos.

Além disso, do mesmo modo que uma rede armazena imagens segundo o mesmo processo de um palimpsesto, ou seja, “uma por cima da outra”, armazena também padrões adquiridos de forma semelhante mais tarde. Se o novo padrão for repetido deliberada, diligente e frequentemente, e se o velho padrão for voluntariamente evitado por um longo tempo (por mais que o velho padrão nos pareça ser natural, a descrição exata é a de uma *segunda* natureza, não a

primeira)’, então, mesmo antigos hábitos entranhados de pensamentos, sentimentos e ações enfraquecerão à medida que os novos se fortalecerem. Todavia, pensar que os antigos costumes jamais desaparecerão - ou insistir em que, para existir uma “cura completa”, eles deverão realmente sumir - estabelece expectativas que, sem dúvida, acabarão por ser desapontadoras. E isso ocorre porque, considerada a maneira como o cérebro de fato funciona, o “perfeito” é verdadeiramente “o inimigo do bom”. Para melhorar sempre, devemos repetir sempre, mas para estar disposta a repetir sempre, uma pessoa também deve estar disposta a fracassar inúmeras vezes. Por trás de muitos modismos terapêuticos e educacionais fantasiosos, encontra-se um vício oculto e muito humano: o desejo feroz de evitar o fracasso, a qualquer preço. Esta é a razão real por que “decorar” e “fazer exercícios” vêm adquirindo uma reputação tão ruim. No entanto, são essas tarefas mundanas que transformam o quarto cérebro de uma massa de aleatoriedade “randômica” em um intelecto de capacidade fulgurante. “O gênio”, de acordo com Thomas Alva Edison, é composto “por 1% de inspiração e 99% de transpiração.” Ele nunca disse nada a respeito de desenvolver “habilidades de pensamento crítico”.

Você vai ter de entrar sozinho

Entretanto, quando a década de 1970 já havia se iniciado, há tempos, a ideia de que o cérebro poderia ser uma rede neural fantasticamente complexa estava sendo ridicularizada nos círculos acadêmicos. Esse fato ocorria porque, mesmo que as redes neurais de retropropagação fossem capazes de computar, a hipótese do “cérebro humano como rede neural” requeria um salto sobre um profundo abismo: *todas as redes neurais conhecidas requerem orientação externa*. O robô Hexapawn, a **HER**, precisa de que *nós* determinemos o que consiste uma vitória e o que significa uma perda; neste sentido, é a *nostra* compreensão das regras do jogo que lhe permite aprender. As redes de análise do mercado de ações, e também as redes destinadas a transformar em fala um texto escrito, todas necessitam da presença de alguém de fora da rede para *decidir* em que consiste um erro da rede e, então, tenha capacidade para projetar a máquina inteira, de modo que esse erro seja propagado *retroativamente* por meio das próprias conexões que executaram o processamento. Nunca se descobrira que um neurônio vivo fosse, na verdade, ainda que remotamente, capaz de realizar uma ação dessas.

Em resumo, as redes de retropropagação aprendem *sozinhas* da mesma forma que uma criança descobre um objeto brincando de “tá quente ou tá frio?” Você sabe onde escondeu o prêmio, mas sua filha não. Desse modo, que

importância existe se você não lhe põe na mão um mapa em que um grande “X” indica o ponto em que o tesouro foi escondido? A sequência de “temperaturas” que você vai indicando em resposta à evolução de sua busca, cujo caráter inicial é totalmente “randômico” (frio, mais frio, quente, mais quente, superquente!), corresponde exatamente à entrega de um mapa - apenas sua codificação é diferente. A criança não *adivinha* realmente sozinha. Mas, para ela, é como se realmente houvesse descoberto assim, porque é ainda uma criança. Sua aprendizagem, do mesmo modo que a de uma rede de retropropagação, é “supervisionada”.

A espantosa relação que as máquinas de aprendizagem demonstram com o processo da aprendizagem humana de fato tem pouco a ver com a maneira como o cérebro pode, de uma maneira real, operar na escala detalhada de sua teia de neurônios. Os Perceptrons ou os Perceptrons de Camada Múltipla e todas as demais redes neurais complexas são modelos de uma aprendizagem de tentativa e erro que, mesmo sendo de alto nível, ainda é bastante corriqueira.¹ No entanto, *dentro* do cérebro humano, os neurônios individuais que formaram redes dentro do tecido nervoso *não recebem* uma retroalimentação direta com relação ao que estão fazendo. Todavia, uma grande proporção daquilo que o cérebro aprende a fazer por meio do processo de tentativa e erro - direcionamento e coordenação do processo de engatinhar, por exemplo -, é realizada sem qualquer tipo de supervisão.

O cérebro, em outras palavras, é realmente capaz de aprender espontaneamente e, mesmo assim, não necessita de qualquer método fantasioso, segundo parece, para lidar com seus erros. As redes neurais podem *até parecer* que funcionam exatamente da maneira como os elementos do cérebro são interligados, mas é óbvio que são completamente diferentes.

Entre o ataque contra as redes, executado pela comunidade da informática, e suas falhas óbvias como modelos verdadeiramente biológicos, foi necessário que uma pessoa muito centrada em sua verdade e também muito corajosa insistisse firmemente em seu trabalho com as redes neurais durante os anos 1970, justamente a época em que a ciência da computação e as pesquisas neurológicas sobre o cérebro muito se expandiam. Foi esta a era em que os alicerces do destino das grandes redes de informações e da biotecnologia estavam sendo construídos. Se você fosse um fã de redes neurais, “(...) a coisa funcionava mais ou menos desse jeito: você começava a falar com alguém a respeito de seu trabalho e esse visitante, ou seja lá quem for com que você estivesse falando, lhe diria claramente: ‘Mas então você não sabe que esse campo de estudos está morto?’”²

Os poucos que fincaram pé firme e continuaram a trabalhar nessa área não eram cientistas da computação nem neurocientistas; em sua maioria, eram físicos com formação matemática que, do mesmo modo que John von Neumann antes deles, sentiam-se dominados por uma convicção profunda e intuitiva de que, por mais improvável que isso parecesse na época, por meio do estudo das redes neurais seria possível descobrir algum grande segredo sobre a inteligência humana - talvez, até mesmo, o segredo da vida. Eles também sabiam que, para que as redes neurais fossem levadas a sério, seria necessária a introdução de um elemento totalmente novo: *uma rede neural que fosse capaz de organizar a si própria sem supervisão externa*. E seus neurônios teriam de realizar essa tarefa sem qualquer sistema postigo de retroalimentação que não pudesse ser encontrado na natureza. Se esse objetivo pudesse ser realizado, os resultados seriam dois: as redes neurais seriam vindicadas como um novo método de “programar” computadores - porque elas, efetivamente, se programariam sozinhas; e as redes neurais também comprovariam uma explicação para a forma como o cérebro humano realmente funciona, *organizando-se a si próprio*. Esse cofre tinha uma fechadura muito difícil de arrombar, mas acontece que a chave já estava disponível havia quase meio século.

Mapas computacionais

Os cuidadosos desenhos do tecido cerebral executados por Cajal (veja Figura 5-1) haviam quase se transformado em um logotipo do campo da neurociência e dos mistérios dos circuitos cerebrais. Seguindo suas pegadas, no final da década de 1930, outro grande neuroanatomista espanhol, Lorente de Nó, começou a pesquisar padrões naqueles emaranhados de conexões. E conseguiu descobrir um. Ele demonstrou que, de fato, por meio do quarto cérebro, um padrão típico de “fiação” aparece continuamente entre aglomerados de neurônios. Embora esse padrão sempre variasse um pouco e, segundo parecia, de forma casual, sempre permanecia reconhecível e se encontrava por toda parte. Tornou-se conhecido como o “microcircuito cortical canônico”. A Figura 5-4 mostra como devagar ele foi sendo retirado do novelo de corpos celulares, axônios e dendritos revelados pelos corantes de nitrato de prata empregados por Cajal.

A descoberta de Lorente de Nó tantalizou os neurocientistas durante cinco décadas. Ele identificou os pontos específicos do circuito sem grandes dificuldades, mas ninguém conseguia descobrir qual era sua função ou para que servia. Suas características principais eram totalmente inesperadas em um órgão que era imaginado de formas variadas como um sistema hidráulico que

funcionava por meio de canos e válvulas, como um processador de sinais eletrônicos ou como um computador baseado em um sistema lógico. Isso ocorria porque, dentro de um desses microcircuitos, *cada conjunto de dois neurônios envia e recebe conexões de ida e volta* (saindo do neurônio 1 e entrando no neurônio 2, e também saindo do neurônio 2 e entrando no neurônio 1) e, frequentemente, essas conexões inibem a ativação de um ou de ambos.

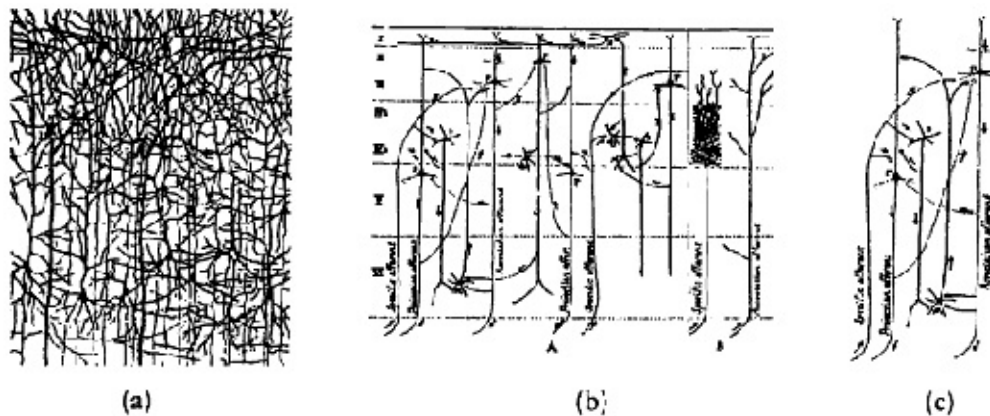


FIGURA 5-4. Microanatomia do córtex cerebral. (a) O desenho de Cajal no começo da década de 1900. (b) O esboço do neuroanatomista Lorente de Nó, em cerca de 1930, “para exemplificar o plano geral segundo o qual o sistema nervoso central é organizado”, que foi deduzido a partir do primeiro. (c) Um “microcircuito canônico” individual, extraído do esboço central pelo autor deste livro.

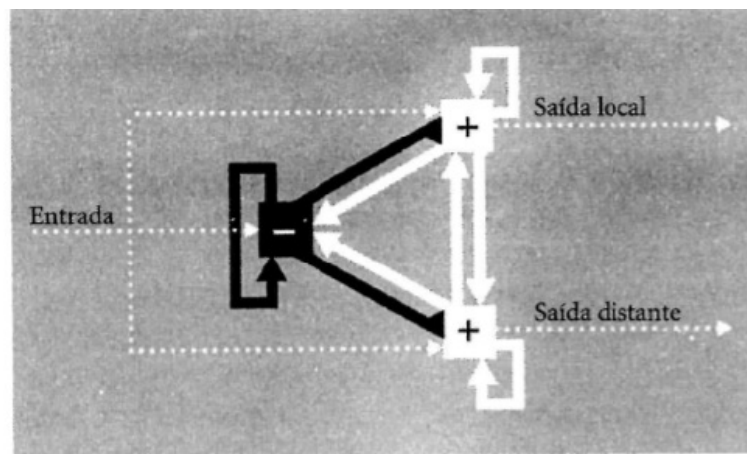


FIGURA 5-5. “Microcircuito canônico” do córtex cerebral, em forma esquemática.

Como os silvos agudos provocados pelo retorno eletroacústico dos microfones e alto-falantes, que é a praga dos amplificadores, circuitos com esses tipos de arco têm grande probabilidade de entrar em sobrecarga quando as conexões recíprocas agem como excitantes; porém, a possibilidade mais comum

é de que desliguem quando as conexões recíprocas forem inibidoras. Se as conexões mútuas se misturarem, o sistema pode acabar oscilando, como acontece com os canos de um velho edifício aquecido a vapor. Mais tarde, foi descoberto que os neurônios quase sempre enviam tanto conexões excitantes como inibidoras para si próprios. Não existia qualquer modelo que pudesse entender o funcionamento desse tipo de desenho, que é mostrado esquematicamente na Figura 5-5.

Trabalhando em isolamento quase completo, entre 1972 e 1982, um físico finlandês que se autotransformara em engenheiro de computação, chamado Teuvo Kohonen, incorporou de maneira precisa essas características em uma prancha bidimensional de neurônios artificiais, permitindo que as conexões partissem de qualquer neurônio para os neurônios vizinhos que o rodeavam. Os resultados foram assombrosos. Ele descobriu que os padrões das forças de conexão entre uma prancha de neurônios desse tipo seriam, sem a menor sombra de dúvida, capazes de *se auto-organizar, sem qualquer supervisão exterior*. A prancha bidimensional desenharia espontaneamente um “⁴ mapa” de quaisquer padrões de dados que lhe fossem apresentados. Limitados apenas pelo número total de neurônios incluídos na prancha, um incontável número de mapas diferentes poderia ser embutido - *memorizado*, por assim dizer - pela prancha. Foi uma demonstração brilhante e quase exata da maneira como o cérebro age em situações semelhantes. Atualmente, os mapas de características auto-organizadas e detectoras de padrões, de Kohonen, são um componente crucial dos dispositivos de detecção incorporados na aviação militar e nos submarinos. Na época de sua apresentação, entretanto, foram quase ignorados.

Além disso, os mapas de Kohonen salientavam justamente as características que tornam possível a auto-organização não-supervisionada, ou seja, números muito elevados de elementos mais ou menos idênticos, dispondo de conexões recíprocas tanto de caráter excitador como inibitório. A chave do problema foi o estabelecimento de oscilações, e é isso que o microcircuito canônico consegue fazer com muita excelência. Conglomerados locais de elementos de processamento estabelecem oscilações estáveis, e esses conglomerados agem, portanto, como elementos de processamento maior, em interação mútua com outros conglomerados. E isso segue escala acima, até que toda a rede estabeleça sozinha algum tipo de estado estável.³

Assim, os dados em um sistema totalmente auto-organizado não fluem em uma só direção, mas ficam balançando para a frente e para trás o tempo todo (mesmo que por canais diferentes); ou então, se existem muitos elementos, eles “circulam” em padrões complexos. Se as sacudidelas ou oscilações se firmarem em algum tipo mais ou menos estável de padrão repetitivo, este passará a ser

denominado um “padrão oscilatório”.

Os mapas de auto-organização de Teuvo Kohonen funcionam de forma impressionante, mas nunca chegaram a receber total atenção do mundo científico. A razão é simples - é impossível entender exatamente *porque* seus mapas funcionam, não da maneira matematicamente correta com que Minsky demonstrou que os Perceptrons de camada única não tinham qualquer possibilidade de funcionar (da mesma forma que outros demonstraram matematicamente que as redes de *retropropagação* deveriam funcionar). Uma descrição matemática do comportamento de mapas artificiais auto-organizáveis ainda encontra-se além de nossas presentes habilidades.⁴ As redes neurais continuaram definhando, portanto, enquanto suas conexões íntimas com o funcionamento do cérebro humano permaneceram incompreendidas até 1982, quando um único evento trouxe a pesquisa sobre redes neurais de volta de seu exílio, estabelecendo o novo campo da neurociência computacional, acendendo o estopim para uma explosão de desenvolvimento e fermentação intelectual. Esse evento foi a apresentação de um modelo simples e descritível de formação espontânea da memória. Mais uma vez, essa façanha foi realizada por um físico e fez com que as pesquisas cerebrais se aproximassem mais um pouco do domínio subatômico natural da física propriamente dita.

6. COMO TECER UMA FANTASIA DE VIDRO

Ela mandou buscar um daqueles bolos de leite achatados e gordinhos, chamados petites madeleines. Eu levei a meus lábios uma colher do chá em que havia mergulhado um pedaço do bolo. Assim que o líquido quente, misturado com migalhas de bolo, tocou meu palato, um arrepio percorreu meu corpo e eu parei.

O que poderia ter despertado essa sensação esquecida? Senti que alguma coisa começava a surgir dentro de mim, algo que se movia em seu antigo lugar de repouso e tentava se erguer, algo que havia estado guardado bem lá no fundo, como uma âncora cravada na areia a grande profundidade. Eu ainda não sei o que é, mas posso sentir que aumenta devagarinho; posso medir a resistência; posso escutar o eco dos imensos espaços que atravessa. E, de repente, apropriada memória se revela. Era o gosto daquele pedacinho de "Madeleine" que, nas manhãs de domingo, minha tia Léonie, mergulhando primeiro em sua própria chávena de chá, costumava me dar. Apenas o gosto e o perfume, mais frágeis, porém mais duradouros, mais insubstanciais, mais persistentes, mais fiéis, suportam destemidamente, na minúscula e quase impalpável gota de sua essência, a vasta estrutura da recordação. Imediatamente, a velha casa cinzenta, construída diretamente para a rua, no quarto da frente, que era o seu, ergueu-se como um palco; e a casa trouxe consigo a cidadezinha, a praça e as estradas que percorríamos através dos campos. Naquele momento, todas as flores de nosso jardim e todas as flores do parque de Monsieur Swann e os lírios d'água nos remansos do Vivonne e a gente boa da aldeia e suas casinhas minúsculas e a igreja paroquial e Combray inteira e seus arredores, tudo tomou forma e solidez, saltou de volta para a existência e a pequena cidade com todos os seus jardins tudo brotando de minha chávena de chá.

— Marcel Proust, *Em busca do tempo perdido* (condensado, com mil desculpas).

Esta passagem, muito tempo atrás, alcançou sua merecida imortalidade no registro das artes humanas. Talvez seja a melhor descrição em toda a literatura

da pungente permanência das coisas que perdemos para sempre - portanto, daquele dom da memória sobre o qual oscila a própria vida da alma -, a própria passagem é uma “Madeleine”, deliciosa e universal, evocando mais uma vez à vida de cada leitor a memória do que significa esquecer as lembranças de coisas mortas no passado distante e, de repente, vê-las despertadas uma vez mais para uma existência vívida por meio de um detalhe aparentemente sem importância.

Em geral, não existe qualquer atividade mais elevada das funções cerebrais que não dependa da memória, e muitas das faculdades que concebemos sem um exame mais acurado como sendo uma faculdade independente dela são, na realidade, simples variações da capacidade de recordar. O reconhecimento de padrões, como a principal atividade em que as redes neurais artificiais estão sendo aplicadas, com o intuito de suplementar a intuição humana - ou até suplantá-la -, é uma dessas variações. Para colocar um objeto dentro de sua categoria, de seu grupo, primeiro é preciso memorizar as categorias e, depois, recordar qual é a categoria correta a qual aquele objeto corresponde.

À la recherche du temps perdu - de Madaline a Madeleine

Porém, o retrato maravilhoso que Proust pintou da recordação, como a experimentamos, revela um detalhe importante que transcende à simples categorização e aponta para a verdadeira natureza da memória humana: quando nos lembramos de alguma coisa, não estamos somente identificando de maneira correta qual é o tipo categórico de que é um exemplo. Ao contrário, ao nos lembramos, conservamos sob o olhar de nossa mente alguma parte de uma experiência maior - a “Madeleine” -, e esta parte mínima, evidentemente trazendo em si algum tipo de detalhe *crítico* suficiente, evoca a experiência inteira. Por algum tempo, o todo de que o “gatilho” faz parte pode permanecer obscuro, escondido, ainda não montado e, em certo sentido, sequer criado ainda, conforme observou Proust. Todavia, lenta e seguramente, nossa mente converge para a lembrança; pouco a pouco, a princípio com incerteza e lentidão, a memória constrói; cada novo elemento, na medida em que se encaixa no seu devido lugar, serve para evocar outras partes do todo, mais depressa, mais rápido, até que, em um *crescente* final, que acontece de forma muito veloz no tempo, a “vasta estrutura da memória” se espalha de uma só vez diante de nossos olhos: inteira, intacta, intocada, viva como sempre foi, embora esquecida por tanto tempo até esse momento de iluminação.

Esse tipo de memória, tão diferente das caixas de armazenamento numeradas

da computação padronizada, estava, indubitavelmente, além da capacidade de qualquer rede neural, segundo se pensava.

Em 1982, as redes neurais ainda se encontravam em um profundo eclipse. Ainda que cientistas pioneiros, como Teuvo Kohonen e outros nos Estados Unidos, continuassem a pesquisa com esse objetivo, era difícil avançar em qualquer direção. Não importa quão notáveis suas contribuições viessem a ser reconhecidas mais tarde, a verdade é que qualquer cientista que gastasse seu tempo com pesquisas sobre redes neurais era considerado um tolo que abandonara o rebanho. Contudo, os rebanhos, mesmo que estourem em uma direção, algumas vezes reverterem o seu curso inesperadamente. E foi isso que aconteceu em relação às redes neurais.

John Hopfield e a rede de Hopfield

Em 1982, um físico de partículas do Instituto de Tecnologia da Califórnia, o *CalTechy* com destacada reputação acadêmica, com uma personalidade aristocrática e uma maneira particularmente elegante de apresentar ideias complexas, realizou uma conferência sobre redes neurais na prestigiada reunião anual da Academia Nacional de Ciências. Essa conferência era, de fato, um golpe de mestre em física. Sua palestra sobre um assunto tão exótico eletrificou a audiência,¹ grande parte da qual não era composta por cientistas da computação ou especialistas em cérebros humanos, e sim por físicos. John Hopfield demonstrou que um determinado tipo de rede neural é matematicamente idêntico a um determinado tipo de sistema magnético, o chamado *spin glass* [vidro rotativo]. Os *spin glasses* foram não apenas bem-aceitos; nessa época, eram um objeto que exercia intensa fascinação para os físicos (mesmo que não o fossem para mais ninguém). As redes neurais que imitavam esses sistemas magnéticos, estranhamente, mostravam-se não somente simples de ser entendidas, como formavam mapas e armazenavam memórias, justamente da maneira que as redes de Kohonen, e eram biologicamente realistas pelo fato de que não requeriam qualquer supervisão externa para funcionar. Elas também se organizavam sozinhas. O fato de elas imitarem um sistema encontrado na natureza - mais ainda, um sistema simples e inorgânico - subitamente fez parecer razoável que esses métodos pudessem ter sido adotados pela natureza na elaboração do cérebro - afinal de contas, minérios magnéticos naturais tinham sido criados dessa maneira, sem qualquer supervisão externa. Hopfield havia realizado um desvio e driblado o bicho-papão que vinha assombrando o rebanho há quase 20 anos e transformado seus rebeldes e excluídos relutantes em seus novos líderes.

“A comunidade da física teórica virou uma verdadeira nuvem de gafanhotos”, afirmou um desses novos líderes. Depois que Hopfield fez sua apresentação sobre as redes neurais, “todos os físicos pousaram em cima dessas redes”.²

Escoteiros de ferro

A ideia de Hopfield é descrita a seguir. Os cristais rotativos são substâncias magnéticas que revelam um comportamento que foi descrito como coletivo. O termo “comportamento coletivo” se refere ao fato de que um agregado de muitos elementos idênticos pode, algumas vezes, gerar padrões coordenados em larga escala que se manifestam por meio da coleção inteira, mesmo que não exista qualquer “orquestrador” externo. Os efeitos mútuos entre os elementos adjacentes (somente “interações locais”) geram a padronização global.

Uma orquestra, por um lado, não apresenta “comportamento coletivo” nesse sentido, uma vez que o comportamento individual de todos os instrumentistas é guiado, em grande parte, por um regente. Uma colônia de abelhas, por outro lado, apresenta um comportamento coletivo perceptivelmente inteligente, uma vez que a ordem que demonstra surge quase inteiramente das interações locais de pequenos números de abelhas individuais. (E claro que a abelha-rainha desempenha uma função importante, mas não como uma microgerente das atividades da colônia.)

Considere, assim, dois ímãs retangulares colocados lado a lado, ambos livres para executar um movimento de rotação, ambos com os polos norte apontando para a mesma direção; portanto, com seus campos magnéticos se influenciando mutuamente (veja Figura 6-la.) Essa influência mútua é semelhante à de dois neurônios com conexões recíprocas entrando e saindo de ambos.

Se nós sacudirmos os ímãs, o que irá acontecer? Embora os dois possuam liberdade de rotação, depois de vibrarem um pouco, acabarão por voltar à configuração original, paralelos um ao outro. Os dois polos norte se repelem mutuamente, de forma um pouco semelhante às conexões inibitórias, porém, no caso dos ímãs, que sempre apresentam polo norte e polo sul, os polos sul também se repelem. As extremidades se repelem, mas, se os dois polos norte se afastarem, os dois polos sul se tocam e se repelem mais fortemente. O que acontecerá se colocarmos lado a lado um arranjo inteiro desses ímãs, como na Figura 6-lb?

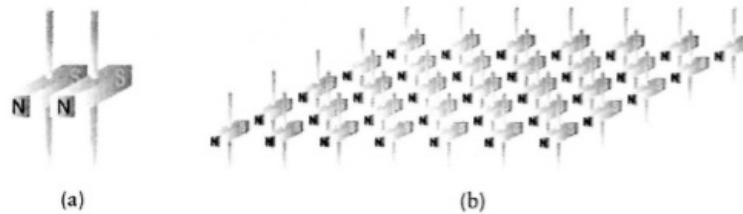


FIGURA 6-1. (a) Dois ímãs dispostos lado a lado. (b) Um arranjo de ímãs.

Mais uma vez, a posição de “equilíbrio” estável para um arranjo de ímãs específico como esse é que todos se alinhem paralelamente, não completamente. Perto da beirada do arranjo, um ímã não se encontra sujeito a forças perfeitamente equilibradas. Se observarmos o arranjo de cima para baixo (veja Figura 6-2a), perceberemos que os ímãs localizados perto das beiradas estão sujeitos a forças desequilibradas.

O que irá acontecer se virarmos completamente um par de magnetos na posição oposta (talvez sacudindo o conjunto com muita força)? Surpreendentemente, eles não irão retornar à posição original (a não ser que sacudamos o conjunto, mais uma vez, com muita força e, por acaso, eles retornem à posição anterior; porém, nesse caso, é provável que outros também troquem de posição). O que eles farão será introduzir uma distorção no equilíbrio, que é transmitida de cada ímã para seu vizinho. No final do processo, o arranjo irá outra vez firmar-se em uma posição estável final, em direção à qual, depois de qualquer pequena sacudidela, retornará. Mas não será mais o mesmo arranjo anterior, uma vez que muitos dos ímãs não estarão mais alinhados em paralelo, embora permaneçam em disposição ordenada, como mostra a Figura 6-2b.

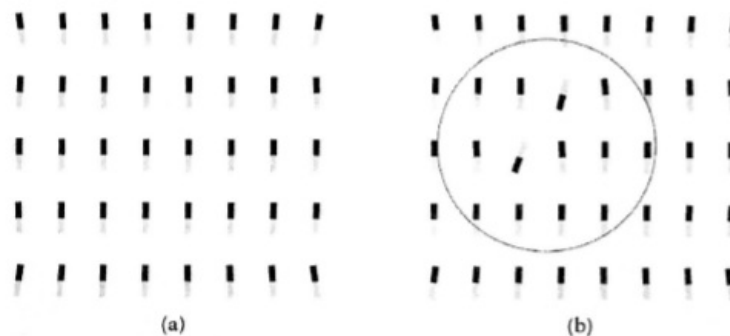


FIGURA 6-2. (a) Um arranjo de ímãs, imperfeitamente equilibrados nas beiradas. (b) Um novo arranjo, provocado pelos dois ímãs que foram desviados.

Qualquer material “ferromagnético” (por exemplo, o próprio ferro) é composto por átomos, nos quais a direção de rotação dos elétrons age de maneira

bastante semelhante à de um arranjo (um arranjo tridimensional) de minúsculos ímãs. Os átomos vizinhos, em um material ferromagnético, tendem a causar um alinhamento mútuo dos elétrons um do outro, mas se uma determinada região for estabelecida com o alinhamento reverso, esse também tende a persistir. O resultado obtido serão muitos minúsculos domínios de orientação de rotação eletrônica variada; portanto, uma região de magnetização diferente (veja a Figura 6-3a.). Desse modo, um pedaço grande de ferro não fica magnetizado como um todo - há regiões de magnetização competitiva que se cancelam mutuamente.

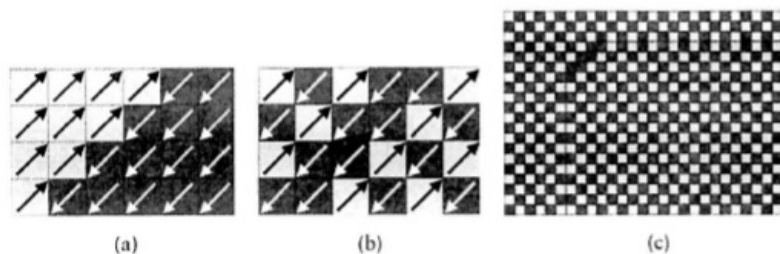


FIGURA 6-3. (a) Rotações eletrônicas em dois domínios de alinhamento comum. (b) Rotações de “antiferro” em dois domínios de alternância reversa. O limite é formado por uma dupla faixa diagonal de rotações voltadas para baixo e para a esquerda (setas brancas). (c) Mais rotações de “antiferro” em dois domínios antiferromagnéticos. O segmento diagonal do limite nesta ilustração é aquele que já foi mostrado em (b). Observe que o equilíbrio de forças difere, dependendo de sua direção.

Os limites entre os domínios, em que rotações de uma orientação se encontram lado a lado com rotações de direção oposta e são capazes de se influenciar mutuamente, são de importância especial. Aqui o equilíbrio é tenso. Uma leve mudança nas forças externas e as rotações podem mudar de direção, causando a inversão das subsequentes, como agentes da CIA e da KGB socializando bochecha contra bochecha em uma festa da Rua das Embaixadas durante a era Gorbachev. Uma onda de inversão de rotações pode se propagar, fazendo com que o limite entre os domínios “viaje”. Mais adiante, veremos como esse fenômeno se relaciona com a propagação de sinais. No entanto, a ideia que apresenta maior importância para o relacionamento descoberto entre as redes neurais e os cristais rotativos é a de que, dentro de um arranjo desse tipo, certos elementos podem ser dispostos em posições nas quais estão sempre predispostos a transformações.

Antiferro

Existe um outro tipo de material magnético que é menos conhecido em nossa experiência diária do que os ímãs comuns. Nesses minérios, que foram

caprichosamente denominados “materiais antiferromagnéticos”, as rotações tendem a se alinhar em direções *alternadas*. Ora, anteriormente, estabelecemos uma analogia rápida e confessadamente supersimplificada entre as forças de atração magnética e as conexões excitadoras dos neurônios, de um lado; e entre as forças magnéticas repulsivas e as conexões inibitórias neurônicas, do outro. Uma analogia mais sutil e precisa é a de um grupo ferromagnético de rotações vizinhas que tendem a forçar-se mutuamente para um alinhamento que corresponde de forma matematicamente exata às conexões excitadoras entre neurônios vizinhos e um grupo de rotações vizinhas que se influenciam até se disporem em antialinhamento - a girarem, em vez de reforçarem sua posição atual —, do mesmo modo que as conexões inibitórias dos neurônios. Se forem deixados em liberdade, os materiais antiferromagnéticos desenvolvem domínios de rotação em que a própria ordem de alternância varia de região para região.

Nesse exemplo, também, há dois domínios de rotações (nesse caso, alternadas), embora seus limites sejam de difícil definição. Porém, quando um número maior de rotações for representado (veja Figura 6-3c), os limites se tornam evidentes.

Nesse ponto, precisamos transportar essas analogias de rotação para o nível seguinte de complexidade - misturando domínios ferromagnéticos e antiferromagnéticos para criar um material que foi denominado *spin glass* [vidro rotativo]. Esta analogia é poderosa pela seguinte razão: um arranjo de ferromagnetos, submetido a uma influência magnética externa, é capaz de armazenar memória - é exatamente o que acontece quando utilizamos, por exemplo, uma fita de áudio *Memorex* para gravar uma música. A fita é marrom porque sua superfície de gravação é feita de óxido de ferro. Mas esse tipo de fita fonomagnética (como seria uma fita fabricada com algum material antiferromagnético) é capaz de armazenar somente uma memória de cada vez. Se quiser armazenar uma nova memória, você terá de apagar a anterior. Um vidro rotativo, no entanto, é capaz de armazenar muitas memórias simultâneas, do mesmo modo que uma rede neural e da mesma maneira que o cérebro humano faz; e executa esta tarefa espontaneamente, sem receber quaisquer instruções. É capaz de fazer isso porque um arranjo de ímãs e antiímãs em um vidro rotativo possui mais de um “melhor” arranjo. Cada um desses “melhores arranjos” pode ser conectado a uma memória diferente e servir-lhe como espaço de armazenamento. E assim que fazem.

Frustração, a mãe da inteligência

Os cristais rotativos são compostos por uma mistura aleatória formada por material ferromagnético e antiferromagnético - portanto, uma mistura casual de conexões excitadoras e inibitórias entre os neurônios. As rotações adjacentes em um vidro rotativo podem competir para alinhar ou fazer girar seus vizinhos. O equilíbrio é tão exato que é costume referir-se a esses compostos como *materiais frustrados* - as rotações estão sempre tensas, prontas para modificar sua posição ao menor impulso. (Uma vez que as moléculas da sílica no cristal natural ou artificial são cuidadosamente alinhadas, no vidro que utilizamos cotidianamente elas se acham desordenadas, um *sistema frustrado* de rotações que foi chamado de *vidro rotativo*.) Uma vizinhança de quatro ímãs subatômicos, sujeita a ambos os tipos de influência, interage da mesma forma que quatro neurônios próximos com um arranjo específico de conexões recíprocas (veja Figuras 6-4a e 6-4b).

Na Figura 6-4a, ambas as rotações 1 e 2 giram para cima e são “acopladas” uma à outra “ferromagneticamente”, ou seja, uma influencia a outra para se alinhar na mesma direção em que se encontra. As direções que as duas assumem são, portanto, consistentes e mutuamente reforçadoras, seja qual for o sentido que assumam - para cima ou para baixo. Esse acoplamento é equivalente aos efeitos recíprocos dos dois neurônios excitados (em branco) mostrados na Figura 6-4b, que apresentam conexões mutuamente excitadoras.

Podemos verificar também que a rotação 2 é para cima, enquanto a rotação 3 é para baixo. Elas são alinhadas opostamente - suas rotações se alternam. Além disso, a acoplagem entre elas também pode ser “antiferromagnética”. Como resultado, cada uma das rotações 2 e 3 tende a fazer com que a outra se alinhe opostamente a si mesma. Os seus estados, segundo mostrados aqui, são, como consequência, consistentes e reforçadores, da mesma forma que no acoplamento anterior descrito. Desse modo, as rotações 1, 2 e 3 formam uma tríade consistente e mutuamente reforçadora. O mesmo se aplica aos neurônios correspondentes da Figura 6-4b.

Assim, com base nesta configuração, em que estado de rotação (estado de excitação) se encontra a rotação (ou o neurônio) número 4? A rotação 4 é “frustrada”, isto é, incapaz de “decidir” para que lado irá se alinhar, porque não existe qualquer estado que satisfaça todas as restrições colocadas sobre ela por seus vizinhos. A rotação 1 vai para cima e se acopla à 4, de tal maneira que faz com que 4 também se volte para cima; no entanto, a rotação 3 vai para baixo e se acopla à 4, provocando um movimento de 4 também para baixo.

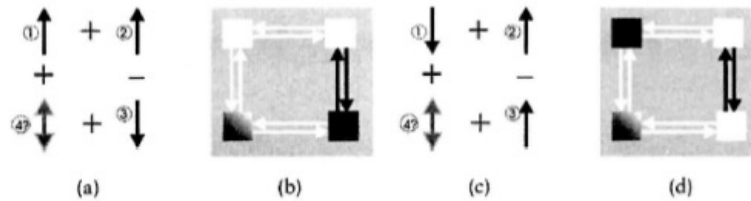


FIGURA 6-4. (a) Uma “vizinhança” de quatro rotações comparadas com (b) quatro neurônios em interação, formando uma pequena rede. As duas direções de rotação possíveis (para cima e para baixo) são representadas pela direção assumida pelas setas. Os dois possíveis estados neurônicos (excitado ou tranquilo) são representados pelas cores dos quadrados. Os dois tipos possíveis de interação entre as rotações (ferromagnético ou antiferromagnético) são representados pelos sinais + ou – entre eles. Os dois possíveis tipos de interação entre os neurônios (excitadora ou inibitória) são representados pelas cores das setas que os interligam. (c) Uma vizinhança diferente de quatro rotações, comparada com (d) quatro neurônios interagindo.

Observe também que, caso a rotação 4 “resolva” rotar para cima, a rotação 3 se tornará “frustrada”; se a rotação 4 decidir rotar para baixo, será a rotação 1 que irá ficar frustrada. Se as rotações 4 e 3 decidirem permanecer rolando para cima, então a rotação 2 ficará frustrada, e assim consecutivamente. Enquanto três acoplamentos de um conjunto de quatro forem ferromagnéticos e um permanecer antiferromagnético, nenhum arranjo de rotações poderá ser perfeitamente estável. Em vez disso, ocorrerá uma competição incessante entre estados imperfeitos.

Todavia, a solução mostrada anteriormente e as outras soluções também ruins não são as piores soluções possíveis. Ao contrário, são as melhores possíveis, dentro das circunstâncias e, portanto, igualmente boas. Por exemplo, vamos imaginar que as quatro rotações (com o mesmo conjunto de acoplamentos) estivessem arranjadas como é mostrado nas Figuras 6-4c e 6-4d.

Podemos observar que as rotações 1 e 2 se encontram em estados inconsistentes, assim como as rotações 2 e 3, enquanto 4, mais uma vez, se acha frustrada. Deixada em liberdade, esta rede de rotações (como uma rede de quatro neurônios com conexões iguais às mostradas) pode não ser capaz de se acomodar em um estado perfeitamente estável, mas se adaptará, de maneira parcial, em um estado ou, antes, em uma sucessão interminável de todos os estados menos ruins (portanto, os melhores possíveis).

O processo de “acomodação” ou de “convergência” em um tipo de rede de rotações como esse (ou de neurônios) é semelhante à trajetória de uma bola jogada de um ponto elevado em direção a uma paisagem acidentada. De fato, matematicamente, é idêntico. Sabemos que, entre todos os pontos em que a bola poderia parar, não irá nunca parar em um pico ou em uma ladeira, mas descenderá até um vale. Se houver inúmeros vales contíguos, todos no mesmo nível,

nenhum será favorecido e (presumindo-se a ausência de fricção) a bola continuará rolando sem destino de um ponto para outro, como na Figura 6-5a. <b)

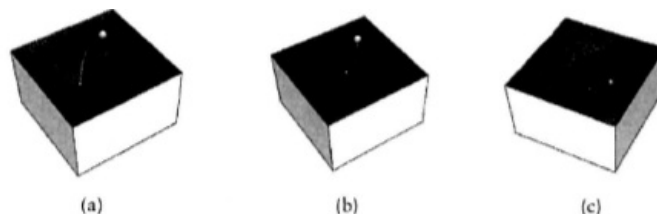


FIGURA 6-5. (a) Um sistema sempre busca o estado energético mais favorável, isto é, o mais baixo possível. Mais de uma posição pode ser favorável e acessível, o que caracteriza uma rede de rotações ou de neurônios frustrada. Essa frustração pode ser representada como uma rede de ramificações que conduzem a vales, todos com a mesma elevação (o mais baixo disponível). Não existe nenhuma localização perfeitamente estável – como um buraco – em que a bola possa cair e parar de se mover. (b) Nesse caso, existe somente um estado de energia mais baixo, facilmente acessível. Esta é a configuração em que o sistema entra em estado de descanso. (c) Uma paisagem energética com muitas “bacias de atração”. A bola é mostrada em posição de descanso em uma delas, mas não na mais funda. Esse é um “mínimo de energia local”, e não um “mínimo de energia global”.

Se houvesse uma única solução - uma configuração única que fosse mais energeticamente favorável, ou seja, o arranjo preferencial para acomodação -, a rede de rotações ou de neurônios ou a bola em movimento iria procurá-lo. E, desde que essa configuração não fosse cercada por picos de energia intransponíveis, ela seria encontrada. O exemplo mais simples seria que a bola caísse em um buraco, como na Figura 6-5b.

Por razões óbvias, esses estados energeticamente mais favoráveis são denominados “bacias de atração”.

No exemplo da página anterior, encontramos não somente um ponto mais baixo na paisagem, como somente uma bacia. No caso dos vidros rotativos reais, é claro que há muitas, muitas dessas redes de rotação, todas interligadas. Como resultado, existe um grande número de bacias de atração diferentes, em vários níveis de energia, mas a maioria não se acha interligada. Desse modo, dependendo da sequência precisa das trocas de rotação (correspondendo ao caminho que é seguido pela bola), a rede pode se acomodar em uma ou outra dessas bacias. Mas a bacia em que se acomodar pode não ser, necessariamente, a de nível energético mais baixo - observe a “cratera vulcânica” da Figura 6-5c -, apenas profunda o bastante para que, buscando sair dela, fosse necessário passar de um estado mais favorecido para um estado menos favorecido. E é claro que isso não vai acontecer, a não ser que o sistema seja “sacudido”. (Mais adiante, veremos exatamente o que significa “sacudir” dentro desse contexto).

Mas o que essas bacias de atração têm a ver com a memória? O princípio pode ser declarado de forma bastante simples: *cada bacia em um sistema de rotações frustradas corresponde a uma lembrança.*

Recebemos um estímulo: pode ser um fragmento do quadro inteiro ou pode ser uma versão distorcida do todo ou de uma parte - *assim que o líquido quente, misturado com migalhas de bolo tocou meu palato, um arrepio percorreu meu corpo e eu parei.* Isso corresponde à bola sendo colocada em um ponto particular da paisagem, relativamente próxima ao ponto mais fundo da bacia - ou não, conforme for o caso. Alguma força externa exerceu uma influência indevida sobre a rede (de rotações ou de neurônios) e, desse modo, ela foi estimulada. Imediatamente, a rede começa a se reconfigurar.

A entrada é processada de maneira espontânea, misturada e lançada para cá e para lá, ou seja, alterada. Há momentos delicados e tensos antes que consigamos recordar, mas sabemos que a lembrança já está próxima - *Senti que alguma coisa começava a surgir dentro de mim, algo que se movia em seu antigo lugar de repouso e tentava se erguer; algo que havia estado guardado bem lá no fundo, como uma âncora cravada na areia a grande profundidade. Eu ainda não sei o que é, mas posso sentir que aumenta devagarinho; posso medir a resistência; posso escutar o eco dos imensos espaços que atravessa.* Esses momentos correspondem ao movimento da bola, com velocidade crescente, espiralando em direção a uma bacia, a rede de rotações, cada uma delas “tensa” e se reconfigurando, cada vez mais próxima de um estado de estabilidade; os neurônios da rede neural oscilando sem parar entre excitação e inibição, em busca de uma configuração estável.

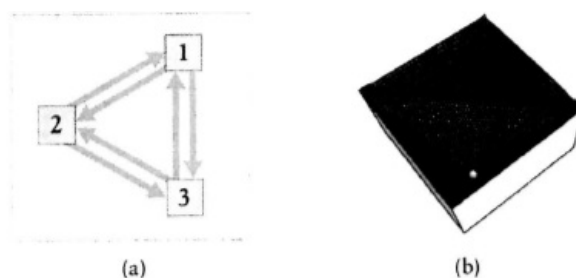


FIGURA 6-6. (a) Microcircuito canônico esquematizado como uma rede de três neurônios (ou de três rotações). (b) Paisagem de energia, representando a rede de Hopfield mais simples possível (de três rotações).

Finalmente, o padrão de entrada é convertido em um dos padrões anteriormente armazenados, a memória “dá um estalo”, a bola cai no ponto de energia mais baixo da bacia, o estímulo inicial é transformado em uma

lembança de alguma coisa passada – e, de repente, apropriada memória se revela. Era o gosto daquele pedacinho de “Madeleine” que, nas manhãs de domingo, minha tia Léonie, mergulhando primeiro em sua própria chávena de chá, costumava me dar. A saída da rede é sua configuração final, a nova configuração relativamente estável é adotada, até que outro estímulo a impulsiona para uma nova reconfiguração.

Se o estímulo inicial for um fragmento da memória completa, a configuração final será a memória completa e, desse modo, trará junto consigo muitos elementos adicionais que não haviam sido lembrados a princípio. *Imediatamente, a velha casa cinzenta, construída diretamente para a rua, no quarto da frente, que era o seu, ergueu-se como um palco; e a casa trouxe consigo a cidadezinha, a praça e as estradas que percorríamos através dos campos.*

As lembranças humanas são recuperadas por *similaridade*, não por “endereço”, porque em uma rede neural não existe nenhum endereço. Cada imagem é distribuída por toda parte. A *recordação associativa* é demonstrada por redes (quer de neurônios, quer de rotações) de máxima simplicidade. Até mesmo três elementos, os blocos de construção elementares do quarto cérebro, os microcircuitos canônicos discutidos anteriormente (equivalentes a um vidro rotativo de três elementos), podem memorizar, uma variante do que é mostrado na Figura 6-6a. De fato, *esta é a menor unidade possível de todas que pode recordar* - especificamente, é capaz de armazenar e de recordar, em sequência, duas lembranças fundamentais. (O Apêndice A explica em detalhes a maneira como funciona.) Redes maiores e mais complexas podem ser, assim, facilmente construídas a partir de muitas unidades básicas.

Usando os diagramas de energia da Figura 6-6a, observa-se que uma rede de rotação em miniatura ou um microcircuito possui duas bacias de atração, cada uma dessas bacias rodeada por três posições discretas - veja Figura 6-6b.

Antes que uma dessas redes seja treinada (antes que tenha armazenado quaisquer memórias ou quaisquer padrões), a paisagem energética seria quase plana. Na medida em que dois objetos lhe são apresentados - maçãs e bananas, por exemplo -, ela rapidamente forma duas depressões, associando uma a cada objeto. Cada depressão representa uma dentre duas situações estáveis de energia mínima em que a rede pode se acomodar, dependendo de onde tiver iniciado seu movimento - isto é, de que padrão de estímulos é apresentado externamente. É fácil ver que uma grande rede, composta por grande número destas subunidades, irá funcionar de forma bastante semelhante a uma rede de elementos binários (isto é, *on/off*, 0 ou 1 ou -1/+1). Em particular, duas subunidades, passando mutuamente estados opostos, formariam um oscilador de dois estados; unidades

adicionais que poderiam estabelecer osciladores de estado múltiplo.

Para serem úteis, lembranças desse tipo - a memória associativa - devem incluir muito mais do que três neurônios (ou rotações) e permitir que sua dinâmica e paisagem de energia cresçam num tempo bem reduzido, até se tornarem extremamente complexas. Todavia, seu desempenho permanece igual, pelo menos no início. Mesmo assim, com apenas três neurônios, uma pequena rede será capaz de memorizar seus dois itens perfeitamente. À medida que o número de neurônios aumenta, uma rede de Hopfield desenvolve a capacidade de cometer erros - fundir partes de lembranças diferentes e, desse modo, criar recordações irreais -, falsas memórias ou mesmo “alucinações”. Pense nestas últimas como vales recém-criados, formados pela intersecção de dois outros já existentes. Se a rede terminar em uma dessas “atrações ilusórias” - como essas bacias irreais foram denominadas —, sua saída será algo inventado por ela. Mesmo sem essas atrações ilusórias, existe sempre uma chance de que a bola role ladeira abaixo com velocidade suficiente para encontrar um buraco fundo, porém não o ponto mais baixo da paisagem, ainda que localizado na região adequada - de tal modo que a recordação se torne apenas parcialmente acurada. Algo mais será necessário, portanto, para desenvolver redes neurais que cometam poucos erros na solução de problemas complexos, inclusive para compreender melhor quais os processos que o cérebro adota para limitar seus próprios erros.

Como aumentar a temperatura

Suponhamos que uma rede - seja de rotações ou de neurônios - termine atolada em uma dessas memórias ilusórias, como é o caso de Maurice Chevalier recordando um jantar às 9 horas da noite. O que acontece quando uma dessas recordações é “sacudida” por Gigi, cuja lembrança é mais acurada — “*Nós nos encontramos às oito horas*”- e, subitamente, tudo se encaixa no ponto certo? (*Ah, sim! Agora me recordo bem...*). Se pensarmos em termos de uma bola procurando a bacia de atração mais próxima e mais funda, uma “sacudida”, como se chutássemos o lado de uma caixa para fazer com que estremecesse um pouco, seria o suficiente para fazer com que a bola pulasse fora de uma bacia de atração ilusória e prosseguisse em sua descida ladeira abaixo, em busca de um vale perfeito. Para aumentar a probabilidade de que nossa bola encontre seu ponto de descanso em um vale e para *evitar* vales mais rasos, poderíamos tentar agitá-la constantemente enquanto rola - digamos, colocando a caixa com a paisagem experimental sobre o tampo de uma mesa que vibrasse *apenas o*

suficiente. Se a vibração fosse mínima, a bola poderia continuar parada em algum local, em vez de descer até o mínimo *global*; se a vibração fosse excessiva, ela pularia *para fora* da bacia de atração legítima, sem ficar parada em lugar nenhum.

Em redes vivas, o equivalente a um topo de mesa vibratório é a vibração aleatória que mantém em seus próprios lugares os átomos e as moléculas, ou seja, o *calor*. A energia que mantém nosso corpo a uma temperatura média de 36,5°C é usada pelo cérebro para manter seus neurônios em um constante estado de prontidão para ser ativados. Se adicionarmos um calor artificial à temperatura de uma rede artificial, introduzimos um grau de incerteza no “movimento” da rede, enquanto ela busca o seu mínimo global. Esse estado é obtido tornando a saída de cada neurônio parcialmente “randômica”, isto é., *probabilística*. Esses neurônios excitados vêm sendo chamados “estocásticos”, ou seja, “aparentemente em estado aleatório”.

Digamos, por exemplo, que todas as entradas somem 10 e que o neurônio contenha uma regra (limiares múltiplos determinando a saída) que não diga apenas: “Se 10 dentro, então 20 fora”. De maneira oposta, você rola alguns dados e faz com que o neurônio produza um sinal que caia entre, digamos, 18 e 22, no qual 20 é a saída mais provável, 22 a menos provável - em uma “curva senoidal” de probabilidades centralizadas em 20. Esse procedimento não somente ajuda as redes do tipo Hopfield a não ficarem atoladas em pontos de atração ilusórios, como também as ajuda a atingir com maior probabilidade o mínimo de energia verdadeiro (absoluto) para o sistema. O fato de que nossos próprios neurônios vivos também são estocásticos nos ajuda a evitar as memórias distorcidas (ou recordações absolutamente falsas) e, em geral, recordar melhor e mais depressa. Mais uma vez, a natureza tirou vantagem da “desorganização” de um ambiente natural para melhorar a inteligência.

Ao afetar seus neurônios, a “temperatura” também afeta o desempenho geral de uma rede de Hopfield. Lembre-se de que, na memória humana, as experiências não são registradas de acordo com algum tipo de sistema de armazenamento baseado em endereços (“as memórias de meu tempo no jardim da infância estão localizadas a partir do endereço CA47-008796-AY e continuando até o endereço CA48-744438-FD; uma desfragmentação em 1-/6/99; tabela FAT [tabela de alocação de arquivo] atualizada em 1-/6/99 ...”), porém mediante associações: semelhança de forma, contigüidade de tempo, proximidade no espaço, categoria emocional, e assim por diante. Algumas vezes, as associações são jogos de palavras baseados puramente no som: pensar em “caboose” [vagão traseiro reservado aos ferroviários] evoca a imagem de um

“moose” [alce]. Outras são fortemente coloridas por emoções: a história inteira da era Kennedy pode ser evocada quando alguém pensar no nome “Oswald” [Harvey Lee, o assassino do presidente].

Há muito tempo os psicólogos descobriram que as associações formam aglomerados, e desenvolveram o famoso “teste de associação de palavras” para sondar a maneira como esses aglomerados se estruturavam. Quando um estímulo chega (por exemplo, uma palavra), pode-se pensar que se localiza mais ou menos “perto” da lembrança para a qual deverá “viajar”. Experiências que são universais e poderosas desenvolveram “vales” (memórias fundamentais) muito reforçados, e esses tendem a ser encontrados na mente de todos os seres humanos - tanto mais que as lembranças são estruturadas ao redor de necessidades e instintos humanos primários (objetivos do terceiro cérebro).

Por exemplo, a imagem de uma mulher de seios fartos, nua, evoca sutilmente, para algumas pessoas, emoções esquecidas, associadas à figura materna; do mesmo modo que ocorre com Marcei, o narrador em *O caminho de Swann* [um dos volumes de *Em busca do tempo perdido*, de Proust], para quem a combinação de chá e “Madeleines” sutilmente evoca as emoções esquecidas do passado, porém associadas com sua tia. Os pontos na superfície de uma paisagem de energia que impulsionam a bola, até que ela descanse em uma determinada bacia de atração, representam experiências que estão mais ou menos associadas à memória. (A experiência pode ser passada ou presente, real ou parcialmente imaginária, não importa; sua representação no cérebro indica uma configuração na qual a rede é “provocada” como resultado dos estímulos de entrada.) Considere uma das paisagens que mostramos anteriormente, tanto girada para a frente, de maneira tridimensional, conforme na Figura 6-7a, como representada bidimensionalmente em um mapa topográfico, assim como mostra a Figura 6-7b.

Vemos que diferentes posições no mapa pertencem, mais ou menos fortemente, a uma bacia ou outra. Uma vez que o sombreado da figura é feito de forma gradual, as regiões limítrofes podem pertencer a mais de uma bacia. Em um nível de detalhes mais ampliado, as fronteiras são definidas com clareza - se os neurônios forem absolutamente deterministas. Se eles forem probabilistas, todavia, os limites se tornarão realmente confusos: recebidas duas entradas idênticas, a saída pode ser diferente.

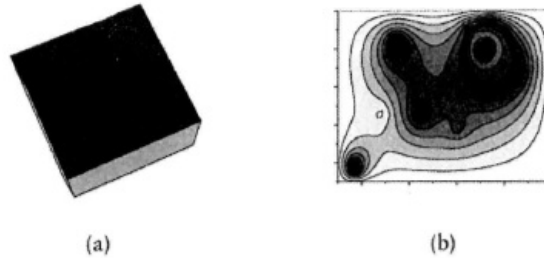


FIGURA 6-7. Uma típica paisagem de energia. (a) A imagem mostrada na Figura 6-5c foi girada para a frente, de tal forma que podemos compará-la mais facilmente com (b), que mostra a mesma paisagem como um mapa topográfico codificado, de acordo com as cotas de altura.

O “calor” bombeia sem cessar energia para a rede, dando à sua trajetória uma qualidade “ativada” - como se fosse uma bola de boliche batendo nas laterais de uma pista ou sendo lançada “com efeito” pelo jogador. A rede pode, assim, deixar de lado estados de energia mais baixos a fim de “acessar” estados mais elevados. Compare a trajetória determinista da Figura 6-8a (esquerda) com a trajetória probabilista na Figura 6-8b.

À esquerda, na Figura 6-8a, vemos que a rede poder-se-ia acomodar em B, mas é atrapalhada por um pequeno pico de alta energia e se enrosca próximo a A, desviando-se dos domínio de atração de C e D. Ela acaba por se acomodar rapidamente em A. Em termos humanos:

- Essa mulher faz com que você se lembre de quem?
- Ora... de minha mãe.
- De alguém mais?
- Bem, ela me faz lembrar vagamente de minha prima Christine, suponho, ou talvez da Mar... não. Não, de fato não. Ela me faz lembrar de minha mãe.

A bacia de atração E fica inacessível porque, mesmo que, em si mesma, seja um ponto estável e de baixo nível energético, está cercada por uma “parede” fechada, e as próprias paredes por um “fosso”, também cercado por outra elevação. Tenha sempre em mente que por “baixo nível de energia” não queremos dizer nada que se compare a “letárgico”. Referimo-nos, ao contrário, a uma lembrança favorecida, localizada em um sulco profundo (de uma maneira figurada) e fácil de atingir, de modo geral.

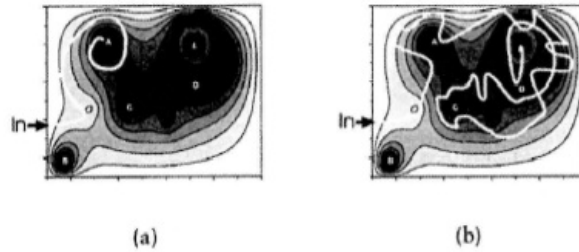


FIGURA 6-8. Trajetórias em um sistema de energia que levam um sistema a se orientar para uma bacia de atração. (a) Rede determinista. O estímulo de entrada ("In") evoca e se torna associado somente com a memória A. (b) Rede probabilista. O estímulo de entrada ("In") evoca e se torna associado em graus variáveis com as memórias A, C, D e E.

Uma memória poderosa e profundamente guardada na paisagem, porém “bloqueada” como a bacia de atração, não será fácil de atingir: é como se estivesse envolta por uma barricada. Quando essas “memórias-barricadas” são atingidas, frequentemente depois de um investimento de muito tempo e energia, necessários para escalar as paredes que as rodeiam, nutrimos um sentimento subjetivo que pode ser expressado como: “Mas como é que fui esquecer isso?” O problema é causado tanto pelas paredes de repulsão como pelo fosso de atração.

- Você não vê que ela é parecida com Greta Garbo?

- Com a Greta Garbo? Mas não vejo a menor semelhança...

Se adicionarmos calor (nesse caso, muito calor) à rede - em um ser humano, isso pode ser feito por meio de qualquer coisa que “afrouxe” associações e apresse o fluxo de ideias (por exemplo, produtos químicos, excitação instintiva) -, os resultados se tornam bem diferentes:

- Afinal, de quem ela o faz lembrar-se...?

- Já falei, ela me lembra muito minha mãe, mas se eu olhar meio de lado, apertando os olhos, até que dá para ver alguma semelhança com a Greta Garbo... Sabe que um dia eu a vi sentada em um trem, em Klosters... ou foi em Davos? Garbo... tudo bem. Não... Não - bem, sim, tem qualquer coisa, mas não... - seja como for, estou me lembrando do filme, qual era mesmo? Ah, sim, *Rainha Christina*... E, sabe, agora que pensei nisso, ela é mesmo meio parecida com minha prima Christine, que também foi esquiador em Klosters uma vez, lá onde morava aquela amiga da Garbo, acho eu... Seja como for, você tem razão, ela é a imagem mastigada, cuspidada e escarrada da Garbo, que eu acho que era uma atriz absolutamente fantástica, como daquela vez que...

- Então, não é parecida com sua mãe?

- Com minha mãe? De onde é que você tirou isso? Tá louco...?

No primeiro caso, a mente processa algum estímulo inicial de uma forma direta, movendo-se rapidamente para alguma lembrança essencial que o estímulo

faz “recordar”. No segundo caso, muito mais energético, a mente percebe similaridades entre o estímulo e lembranças diferentes. Cria uma rede de associações bem mais ampla. O “nível de energia” geral da rede - a planura ou inclinação relativas da resposta probabilística - determina até que ponto ela faz associações limitadas ou amplas. As pessoas mais inteligentes - do mesmo modo que os maníacos - têm maior tendência a realizar as últimas.

O lunático, o namorado e o poeta, todos têm imaginação compacta

Em seu famoso ensaio sobre a arte da poesia, Aristóteles incluiu uma observação muito inteligente: “Mas, de longe, a maior das coisas é a maestria da metáfora. E a única qualidade poética que não pode ser aprendida com os outros; e é também a marca da genialidade, uma vez que uma boa metáfora implica uma percepção intuitiva das similaridades que existem entre os dessemelhantes”.³

Ver, pela primeira vez, uma similaridade onde os outros nada viram: é o que acontece nas trajetórias de redes altamente energéticas. “Localizações” amplamente díspares (estados) são reunidas em uma única trilha de pensamento. Dito de outra maneira: mais estados se tornam acessíveis na busca pelo melhor estado

possível. A capacidade de exploração - a avaliação de ligações que podem demonstrar-se totalmente fantasiosas - é o coração do jogo mental. O gênio joga com potencialidades durante horas, examinando as possibilidades mais absurdas. Só depois de jogar incansavelmente é que cede ao exercício racional da lógica dedutiva e ao julgamento baseado nas evidências. E quando rejeita as hipóteses mais arrebatadas, mas que se demonstraram falsas; é nesse momento que refina e recompõe as hipóteses mais turbulentas, porém que se revelaram mais verdadeiras. Como Feynman disse a respeito do matemático hindu-britânico Srinivasa Ramanujan e de si próprio, quando pressionado a explicar a genialidade de ambos: “Não é tanto a habilidade, mas sim o desejo de jogar com o que está à nossa volta. [...] Eu sempre brinquei com o que via a meu redor. [...] De fato, estava apenas brincando, do mesmo jeito que uma criança brinca, só que com brinquedos diferentes”.⁴

Assim, se você quiser que uma rede artificial se torne “mais esperta”, pode tentar sacudir suas curvas de entrada e saída, fazer com que ela se mexa mais um pouco antes de se “estabelecer”. Mas será que é verdadeiro agir dessa mesma maneira com referência a uma rede neural natural? Um cérebro humano pode se tornar artificialmente mais inteligente por algum processo que afete seus neurônios?

Paul Erdős foi um dos matemáticos mais incansáveis e mais prolíficos do

século XX. Em um campo no qual os profissionais reconhecidos raramente publicam mais do que 50 artigos durante toda a vida, Erdős publicou quase 1,5 mil “todos substanciais e muitos deles fabulosos”. Ele também sempre usava produtos químicos capazes de alterar o cérebro. “Durante os últimos 25 anos de sua vida (Erdős morreu aos 83 anos) [...] trabalhava 19 horas por dia, mantendo-se estimulado com 10 a 20 miligramas de Benzedrina ou de Ritalin e tomando não somente café expresso fortíssimo, como ingerindo tabletes de cafeína. ‘Um matemático’, gostava de dizer o próprio Erdős, e uma máquina de transformar café em teoremas/”⁵

Então, um gênio é apenas isto? Um tipo de aberração da natureza de velocidade semicontrolada, que pode aumentar sua própria capacidade por meio da ingestão de produtos químicos? Há um outro lado da história: se você levar essa estimulação longe demais, pode acabar como uma rede que, em vez de brilhante, tornou-se descontrolada. Entre os românticos, isso é chamado “a loucura divina dos gênios”; entre os neurocientistas da área da computação, “o dilema da estabilidade/plasticidade”.

Todos nos sentimos maravilhados quando um Shakespeare cria uma metáfora como “Julietta é o sol”, imprimindo para sempre sobre a imaginação humana aquela iluminação indizível e revivificadora do primeiro amor, de tal forma que nenhuma outra combinação de palavras poderia expressar melhor. Todavia, não ficamos impressionados, mas sim entristecidos, quando uma velha desmazelada, internada há 40 anos em uma instituição para doentes mentais, descreve a perda de seu antigo amor adolescente na Itália nos termos: “Nápoles e eu devemos fornecer macarrão ao mundo inteiro”⁶. Qual é a diferença?

Imediatamente percebemos como Julietta realmente é o sol. Nesse momento, nossa compreensão do amor é alterada. (Nossa compreensão da palavra “é” também é alterada - embora não da forma em que a metáfora se tornou recentemente notória.) Entendemos isso, ao mesmo tempo que compreendemos que uma garota de 13 anos não é um gigantesco reator de fusão a 150 milhões de quilômetros de distância. Entretanto, apesar de toda a distância entre os dois termos que formam a metáfora de Shakespeare - uma garota e uma estrela próxima de nós -, ele os reuniu de tal maneira que a frase se torna evidente por si mesma, e ninguém precisa que lhe expliquem por quê. Uma boa metáfora é diamantina: a trajetória absolutamente mínima de energia total que interliga dois pontos separados que mentes inferiores buscam e nunca encontram - ou, em vez disso, descobrem sua variante de zircônio: porque, tolamente, concluem que “Tudo é um”.

Todavia, no decorrer da caminhada em busca desse mínimo, a grande mente também produz absurdos em seus processos - às carroçadas. Não temos acesso

aos primeiros rascunhos de Shakespeare, nem mesmo aos seus pensamentos que não chegaram sequer a ser escritos; não fazemos ideia de quantas símiles vulgares imaginou, iguais ou piores que a frase resmungada pela louca, mas que riscou e descartou ou nunca chegou a colocar no papel, antes que se decidisse por “Julieta é o sol”. Talvez o primeiro pensamento que lhe ocorreu tenha sido: “Julieta é uma comida muito gostosa”, porque, nesse momento, idiossincraticamente, ele poderia estar apaixonado e faminto.

No entanto, no raciocínio da louca, não permanece qualquer habilidade de separar o sensato do insensato: sua rede permanentemente superaquecida perdeu a capacidade de resfriamento.

Quando a energia de uma rede artificial se torna elevada em demasia, provoca desordem. Os elos se formam aleatoriamente, dissolvem-se ao acaso e dão lugar a outros de forma “randômica” e, então, se reformam novamente, sem cessar - da mesma maneira como ocorre com os maníacos ou com pessoas que utilizam drogas estimulantes além do possível.

A solução do problema nas redes artificiais é relativamente fácil - basta cortar a entrada de “calor”: reforçar a função da probabilidade até fazer com que se torne menos estocástica e mais rigidamente determinista. Tornar os resultados mais previsíveis e menos aleatórios, remover ou diminuir a “ramificação desencadeadora”. Existe um equivalente para as redes naturais do quarto cérebro?

O lítio é o agente antimaníaco mais utilizado, e seus efeitos sobre os neurônios ainda não são totalmente conhecidos. Porém, existe uma outra classe de agentes antimaníacos que inclui os mesmos medicamentos utilizados para tratar convulsões, ou seja, são drogas que tendem a reduzir a suscetibilidade de desencadeamento dos neurônios e a tendência de um conglomerado neurônico de excitar-se descontroladamente em resposta à excitação de outros. Essas suscetibilidades diferenciadas são comparadas na Figura 6-9.

Um número elevado de pessoas que sofrem de mania é, de fato, extremamente criativo, mas há um problema: na medida em que as associações vão-se tornando mais e mais distantes, o próprio julgamento para descartar os excessos vai sendo prejudicado. Tudo é agora percebido como exaltado, e nada pode ser execrável. O estado de inspiração dá uma sensação maravilhosa e, desse modo, quanto mais inspirada a pessoa se sente, mais relutante se mostra em abrir mão dessa sensação - e menos capaz de julgar que deva ser descartada. A mania tende a se expandir, e esta expansão aumenta a probabilidade de crescimento ainda maior.

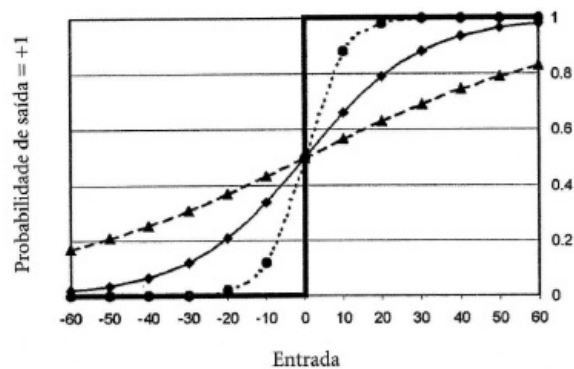


FIGURA 6-9. Genialidade ou loucura? Diferentes funções de probabilidade para os neurônios do quarto cérebro:

- uma função ascendente relativamente íngreme corresponde a um estado normal e “não-inspirado”;
- uma função mais rasa, correspondente ao estado “inspirado” de uma “percepção intuitiva das similaridades entre os dissimilares”: gênio;
- ▲ uma função muito rasa corresponde a uma rede excessivamente energética; associações desencontradas e típicas da “mania”. Um tratamento com compostos de lítio ou medicamentos anti-convulsivos transforma a curva novamente em uma ladeira retilínea e mais ou menos íngreme.

Em negrito, a função fixa e semelhante a degraus de entrada e saída da rede original do tipo Hopfield.

O lítio, no entanto, tem o efeito de melhorar a capacidade de julgamento, mas ao custo de diminuir a possibilidade de inspiração. As pessoas criativas, que são também portadoras de mania, com frequência passam muitos anos esforçando-se para obter a dosagem exata de sua medicação, objetivando conservar a inspiração sem prejudicar seu julgamento. Mas, infelizmente, acabam realizando “um pacto com o diabo”: o nível mínimo de inspiração aceitável quase sempre está associado a um julgamento imperfeito. Aceitar o que dá a impressão de ser a limitação de seus próprios poderes criativos, em geral, somente ocorre depois de uma luta longa e agonizante, que resulta na aceitação repetitiva de severos danos mentais.

Kay Redfield Jamison, uma professora brilhante de psiquiatria na Universidade Johns Hopkins, além de escritora de talento, mas também portadora da doença maníaco-depressiva [chamada hoje de “distúrbio bipolar”], descreve o dilema a que ela e seus pacientes bipolares se veem presos:

Minhas manias, pelo menos em seus estados iniciais mais leves, eram estados absolutamente intoxicantes que originavam grande prazer pessoal, um fluxo de pensamentos incomparável e uma energia infindável, que permitia a translação de novas ideias para artigos e projetos. Toda medicação... cortava drasticamente esses períodos em que eu voava e flutuava...

[Posteriormente], entrei em um processo maniaco descontrolado e além do reconhecimento, tendo de iniciar uma longa e custosa guerra pessoal contra um medicamento que, dentro de poucos anos, estaria encorajando outras pessoas a tomar.⁷

O “dilema da estabilidade/plasticidade” ou da “loucura divina do gênio” com frequência demasiada se transforma simplesmente na batalha contra “a aceitação do lítio”.

Duas estradas se separam...

As memórias associativas, como as que ocorrem em uma rede de Hopfield, são idealmente indicadas para a solução de problemas que estão além da memorização e da lembrança. São os chamados “problemas de otimização”, em que uma ampla variedade de soluções similares se acham disponíveis para a mesma tarefa, mas em que existe um alto prêmio para quem encontrar a melhor solução possível dentro de um tempo limitado. O exemplo clássico é o do “representante comercial” [ou “caixeiro-viajante”], demonstrado na Figura 6-10.

Esse tipo de problema se torna tão complexo, de fato, que, para todos, com exceção dos mais simples, não é matematicamente possível demonstrar que a solução mais simples foi obtida. Uma garantia de que nos encontramos próximos ao “extremo” desejado, dentro de uma pequena margem de erro, é o melhor a que se consegue chegar quase sempre; e, com frequência, nem sequer isso é atingido.

A própria evolução pode ser tratada como um enorme problema de otimização, com a duração de multibilhões de anos, em que a “situação de energia mínima” é refundida como “ótima aptidão adaptativa”. A rede de Hopfield é muito semelhante à natureza, no sentido de que, como é possível afirmar, toda a natureza age de acordo com princípios energéticos. Sem dúvida, a natureza inteira - e não somente o setor abrangido pela biologia - pode ser considerada um problema gigantesco de otimização, uma vez que a natureza inteira busca o caminho “da ação mais simples”, uma forma específica de mínimo energético. A natureza busca os mínimos gastos de energia, mas procura esses resultados ao longo de caminhos que minimizam a soma das diferenças, em cada ponto ao longo da trajetória de um sistema, entre as energias cinética e potencial. Quando esse princípio foi descoberto inicialmente, no século XVIII, muitos pensaram que era uma evidência da inteligência divina orientando a natureza.

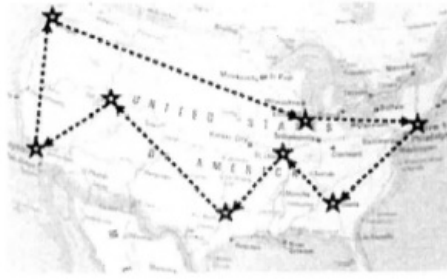


FIGURA 6-10. O "Problema do caixeiro-viajante". Arkady chega a Nova York e tem de partir dali. Como representante comercial, precisa visitar Chicago, St. Louis, Atlanta, Dallas, Salt Lake City, Los Angeles e Portland. Qual rota é a mais rápida? Qual a mais barata? E qual a mais segura?

A natureza parece ter descoberto um saco de truques extraordinários para resolver seus vários problemas de otimização. Considerado o que conhecemos até agora sobre o cérebro e dados os muitos problemas de otimização para cuja solução ele sempre se mostrou extraordinariamente inteligente (muito antes que a humanidade tivesse inventado um nome para o que estava fazendo), parece claro que, enquanto o cérebro age como um computador, também é um dispositivo de otimização - o sistema de otimização mais sutil, mais profundo e mais complexo conhecido no Universo.

Devido às limitações evidentes das redes de Hopfield - suas necessidades de conexões quase universais, sua incapacidade de atingir com certeza o extremo que busca -, podemos ter certeza de que a natureza possui ainda uma série de truques adicionais escondidos na manga. Apenas o calor é insuficiente.

Tempo de enrijecer

Comece a dobrar um clipe de prender papéis para a frente e para trás. O metal irá ficando mais duro e, ao mesmo tempo, mais frágil. De repente, se parte. Um clipe de papel é relativamente macio e maleável ("dúctil"). Todavia, à medida que o metal é "trabalhado", ele se torna mais duro e resistente, até ceder, quando libera uma explosão súbita de energia. A arte da ferraria depende desse fenômeno. Com o intuito de moldar o fio de uma espada, o metal deve ser martelado e curvado repetidamente; portanto, deve ser macio e maleável. Contudo, na medida em que é trabalhado, endurece e passa a resistir contra qualquer moldagem posterior. O ferreiro deve, assim, repetidamente, transformar um metal quebradiço em seu estado macio e moldável, porém conservando a forma em que foi transformado anteriormente. Se o ferreiro tiver sucesso, pode trabalhar um pouco mais com ele.

O segredo do ferreiro reside em não apenas aplicar calor e frio; mas em quando e como deve aplicar o calor e quando e como pode permitir que o metal

resfrie. Esse processo, chamado “enrijecimento”, funciona mais ou menos da seguinte forma: desde o começo, o metal é maleável. Depois que o ferreiro martela e forja durante algum tempo, o metal se torna, ao mesmo tempo, duro e quebradiço demais para que ele possa continuar o trabalho. Então, o ferreiro aquece a espada até o ponto justo: o suficiente para amaciar o metal, mas não para derretê-lo. Em seu novo estado, de novo maleável, o ferreiro lhe dá forma. Enquanto martela, o metal vai esfriando mais uma vez e, ao ser trabalhado, lentamente se vai tornando quebradiço outra vez.

Uma espada precisa de um fio aguçado. O martelar achata o gume até torná-lo cada vez mais fino, e quantidades progressivamente menores de calor bastarão para fazer com que as beiradas da lâmina derretam rapidamente. Assim, o ferreiro utiliza uma “escala de tempo” mental, cuidadosamente sintonizada para alternar aquecimento e resfriamento. Quanto mais se aproxima do produto acabado, a quantidade de calor (ou frio) que ele aplica se torna menor e as oscilações entre calor e frio mais breves.

O ato final do ferreiro - imortalizado em inumeráveis filmes hollywoodianos - consiste em enfiar subitamente a espada aquecida em água gelada, a fim de “dar-lhe têmpera”. Aqui, o que acontece é mais ou menos o seguinte: o metal é composto de inumeráveis grãos de ferro cristalizado, minúsculos e semelhantes a uma rede no formato de grãos de arroz. Quando o metal se encontra em estado dúctil e macio, esses grãos de cristal encontram-se alinhados. Ao ser martelados, domínios diferentes de alinhamento são criados, originando planos de fratura. Isso endurece o metal, porém o deixa quebradiço, ou seja, predisposto a partir-se ao longo desses planos. Uma espada deve ser dura, mas não quebradiça, o que ocorre quando seus grãos são alinhados de forma aleatória, sem limites contínuos entre os domínios, todavia com as fileiras de grãos desalinhadas entre si. Essa situação pode ser atingida aquecendo-se a espada “no ponto” certo e resfriando-a subitamente - mergulhando em água gelada para “lhe dar têmpera” - , também no momento e temperatura exatos: uma coisa muito difícil de fazer da maneira adequada.

Uma peça de metal maleável se acha em um estado de energia muito baixo. Um mestre ferreiro aprendeu a arte de colocar o metal em um estado de energia extremamente *alto*, em que a energia foi distribuída com grande uniformidade; é como se equilibrasse uma bola na ponta de uma lança afiada. O gume da espada pode ter se tornado espantosamente fino sem que o aço lasque; a lâmina resiste a grandes curvaturas sem se quebrar; mas caso quebre, você não vai desejar estar por perto.

Se o alvo não for a forja de uma espada, mas apenas a fabricação de uma peça de metal maleável, como um clipe, o metal não será resfriado. Em vez

disso, uma *escala de enrijecimento* (quente, frio, quente, frio...) será buscada de tal modo a maximizar a “busca” dos átomos do metal pelo melhor estado possível de alinhamento dos grãos. Também podemos melhorar o desempenho de uma rede neural, quer de ocorrência natural ou artificial, em sua busca pelo mínimo de energia por meio de artifícios semelhantes.

Se introduzirmos calor em uma rede (fazemos com que os neurônios respondam a esta entrada mediante uma saída mais ou menos casual) haverá um valor a ser pago: embora o movimento incutido à bola pela agitação torne mais provável que esta não seja capturada por um mínimo de energia relativamente alto (por exemplo, uma cratera vulcânica no alto das montanhas), isso também tornará mais provável que a bola deixe de cair em um mínimo absoluto (como o Vale da Morte).

Buscando melhorar a inteligência e reduzir a taxa de erro em redes neurais artificiais do tipo das redes de Hopfield, temos de *simular o enrijecimento*. Iniciamos a atividade da rede em um estado relativamente “quente” - seus neurônios responderão com grande aleatoriedade às suas entradas -, e depois vamos resfriando-a, etapa por etapa. Em temperaturas mais elevadas, não é provável que a rede se estabeleça com um mínimo absoluto de energia (global) nem sequer próximo desse, mas também é menos provável que descanse em um mínimo (local) de energia relativamente alto ou próximo. Se a temperatura for resfriada um pouco, parte desses mínimos locais de alta energia, ou todos, se tornarão inacessíveis. (Dentro da símile do quadro da paisagem de energia, a bola sacudida não terá mais energia suficiente para pular alto o bastante, buscando galgar esses níveis de altitude contra o empuxo da força da gravidade, e não irá se deter em um desses estados indesejáveis.)

No entanto, se a bola ainda continuar energética o bastante para prosseguir pulando sem ficar presa, o mais provável é que evite esses locais de energia mínima, mas ainda assim elevada, que se acham presentes em seu novo nível de altitude mais baixo. (você poderia imaginar um panorama de energia com buracos grandes, largos e fundos o bastante para prender a bola em sua parte inferior. Entretanto, na natureza, as regiões de baixa energia tendem também a apresentar pequenas variações, enquanto as regiões de alta energia são predispostas a mostrar variações maiores. Esta é uma característica matemática da própria “energia”, e é por isso que as redes neurais que podem ser demonstradas como obedecendo a alguma função da energia são mais convincentes como modelos de funcionamento do cérebro do que redes neurais que não o façam. Aquelas que obedecem à alguma função são observadas como “mais naturais”). Pode ser matematicamente demonstrado que, para cada tipo de paisagem de energia, existem tabelas de enrijecimento que garantem que o estado final da rede se localize ou no mínimo global ou muito próximo. (E, nós sabemos que esse deve ser o caso, a partir do fato de que os próprios metais podem vir a ser enrijecidos).

O enrijecimento simulado em redes do tipo Hopfield, portadoras de

neurônios “estocásticos”, tornou-se a maneira mais utilizada para aplicar essas redes na resolução de problemas da vida real. Elas também apresentam uma analogia muito íntima com a maneira como funcionam as próprias redes humanas quando em seu estado melhor possível. Em um processo criativo bem estruturado, quer individual, quer em grupo, o melhor estado inicial é o que apresenta uma temperatura relativamente elevada, o que proporciona numerosas oportunidades de gerar ideias, malucas ou práticas, sem quaisquer restrições; aqui, uma noção estimula outras, sem críticas de qualquer espécie - a chamada “tempestade cerebral” [*brainstorming*]—, e esta é uma situação que favorece a criação de novas ideias (uma nova percepção de similaridades entre os dissimilares), sejam boas ou más.

Segue-se um período de resfriamento, quando as ideias iniciais são consolidadas e podadas, mas com muita delicadeza. As ideias individuais, que permanecem, se expandem nessas sessões de minitempestade cerebral, o que será seguido por novos resfriamentos, e assim por diante. Quando uma tempestade cerebral individual, inserida em um grupo, não consegue resfriar no momento certo, o grupo se encarregará de provocar o seu resfriamento.

As redes de Hopfield e sua progénie nos oferecem desse modo um modelo sedutor da maneira como funciona o quarto cérebro, com seus erros, acertos e dúvidas. Mas também apresentam problemas, tanto com respeito ao bem que podem fazer como em relação à sua plausibilidade biológica. Assim, por exemplo, requerem um número elevado de conexões. Sem dúvida, seu princípio básico é de que “cada neurônio deva ser conectado a todos os demais”. Por mais que o verdadeiro quarto cérebro seja interconectado - de uma forma espantosa, como já vimos anteriormente -, ele não é completamente interconectado. Imagine o que significariam 20 bilhões de neurônios, cada um deles com 20 bilhões de conexões. Mesmo dividido em subunidades, como ocorre, a conectibilidade universal não é o caso.

Entre 1982, quando a apresentação de Hopfield ocasionou uma reviravolta tanto na neurociência como na computação, e 1998, seguiu-se uma corrida para desenvolver variações cada vez mais sofisticadas das redes de Hopfield, cada uma mais biologicamente realista - variantes que não requerem mais a mesma interconvertibilidade maciça. Esse último desafio demonstrou ser o mais difícil de todos, e só recentemente as peças finais se encaixaram nos devidos lugares. Descobriu-se que, se um grande número de *osciladores* de um tipo particular forem conectados, fraca ou esparsamente, e se, ao mesmo tempo, forem acionados por algum tipo de entrada oscilatória externa, essa rede de osciladores esparsamente conectados duplicará da mesma maneira a dinâmica e as capacidades de uma rede de Hopfield densamente conectada. Quando esse tipo

de organização é modelado matematicamente e otimizado para apresentar a maior capacidade possível, a estrutura resultante corresponde exatamente ao conjunto de estruturas variáveis de microcircuitos encontrados no córtex humano, incluindo até mesmo as influências externas dos demais cérebros inferiores que interferem em seu funcionamento.⁸

Para surpresa de muitos pesquisadores, neurocientistas e cientistas da computação, verificou-se que as redes desse tipo apresentam a capacidade adicional de processar fluxos de dados em constante modificação em tempo real, da mesma forma que realiza o quarto cérebro humano. Sem dúvida, essas redes de osciladores nos abrem uma compreensão ainda mais profunda de como os componentes internos que existem em todas as células - inclusive os neurônios - funcionam como análogos de redes em pequena escala. Podemos, assim, começar a considerar toda a vida, em todas as escalas, como inerentemente computacional.

7. O JOGO DA VIDA, OU COMO O LEOPARDO GANHA SUAS PINTAS

E como toda a vida humana é um grande jogo de azar!...
— Voltaire, *Les délices* (24 de novembro de 1755).

Na época em que McCulloch e Pitts publicaram seu artigo sobre a aprendizagem neuronal, o grande matemático, teórico quântico e cientista de computação John von Neumann - o “Pai do Computador” - percebeu que o segredo da aprendizagem espontânea que existe na natureza tinha sido desvendado. Desse modo, ele foi um constante apoiador do Perceptron. Mas Von Neumann percebeu que, na capacidade para aprendizagem espontânea, havia alguma coisa que ia bem mais além do que a simples computação ou a neurociência. Estava convencido de que nesse ponto se achava o segredo da própria vida. Descobrir esse segredo era um alvo faustiano, sem dúvida, mas Von Neumann era um homem de personalidade faustiana e, como o tempo demonstrou, não estava sendo ambicioso demais.

O intelecto de Von Neumann era evidente desde sua infância. A partir dos 6 anos de idade, Jancsi, como era apelidado, trocava piadas com seu pai, um importante banqueiro húngaro, em grego clássico e em alemão e francês. Nas reuniões da família Von Neumann na Hungria, antes da Primeira Guerra Mundial, um hóspede escolhia a esmo uma página e coluna do guia telefônico de Budapeste, e o pequeno Jancsi percorria rapidamente com o olhar a dita página, para depois responder a qualquer questão a respeito dela: nomes, números de telefone, endereços — ou, simplesmente, recitava a página *verbatim* [palavra por palavra]. Aos 8 anos, já havia aprendido cálculo integral.

Quando estudava no Gymnasium Luterano, Jancsi chamou a atenção de um pedagogo matemático brilhante e devotado, László Rátz. Apesar da riqueza da família Von Neumann, Rátz não aceitou ser pago por suas aulas particulares. Ainda cursando a escola primária, Von Neumann (que começou a assinar assim desde essa época e com pleno direito, embora seu pai preferisse não empregar o “Von” aristocrático) publicou seu primeiro artigo em matemática. Segundo o ponto de vista de Rátz, a honra de tomar parte, mesmo que de modo pequeno, na educação de uma criança que ele sabia estar destinada a tornar-se um dos maiores matemáticos do século, já era recompensa suficiente.

Entretanto, a família de Jancsi pertencia a um círculo elitista de famílias

judaicas que haviam abandonado o judaísmo após o Iluminismo e a Revolução Francesa, com o intuito de subir rapidamente no mundo cristão que as rodeava; e Max Neumann estava determinado a impedir que seu filho retornasse ao que ele encarava como uma simples variação secular da existência reclusa e altamente intelectual de seus antepassados religiosos. Ele deveria seguir uma carreira que fosse consistente com o papel proeminente de sua família na sociedade. Dessa maneira, Jancsi foi persuadido a assumir um compromisso, talvez em parte porque ele mesmo tinha gosto por coisas materiais. Assim, depois de completar sua educação preparatória no nível médio, frequentou uma escola superior, a ETH - *Eidgenössische Technische Hochschule* [Escola Técnica Federal de Estudos Superiores], de Zurique, na Suíça, na época o equivalente europeu do moderno Instituto de Tecnologia de Massachusetts, em que obteve seu diploma em Engenharia Química.

Na ETH, Von Neumann não estudou matemática, para satisfazer os desejos de seu pai. Porém, apresentou-se para os exames de qualificação para fazer seu doutorado em Matemática. Obteve uma das notas mais altas até então jamais registrada e, depois, matriculou-se na Universidade de Budapeste. Georg Polya, um matemático do mais alto calibre, que foi o orientador de Von Neumann, declarou: “Johnny [Jancsi] foi o único estudante de quem jamais tive medo. Se, no decorrer de uma palestra, eu mencionasse um problema que até então era insolúvel, provavelmente ele se aproximaria de mim depois do final, trazendo uma solução complexa resumida em rápidas anotações em uma tira de papel”.¹

Von Neumann foi convidado para lecionar em Princeton, EUA. Logo depois, juntamente com Albert Einstein, foi convidado a tornar-se um dos primeiros seis professores de Matemática do recém-fundado Instituto de Estudos Avançados. A presença de Einstein não lhe fez qualquer sombra. Eugen Wigner, um dos vencedores do Prêmio Nobel de Física, descrito como um dos maiores cientistas de nossa época, havia conhecido Jancsi desde sua infância:

Conheci um grande número de pessoas inteligentes durante toda a minha vida. Conheci Max Planck, Max von Laue e Werner Heisenberg; Paul Dirac era meu cunhado; Leo Szillard e Edward Teller, dois de meus amigos mais íntimos, e Albert Einstein também foi um bom amigo. E conheço também muitos jovens cientistas brilhantes.

Mas nenhum deles possuía uma mente tão rápida e aguda como a de Jancsi von Neumann. Frequentemente fiz essa observação na presença de todos esses grandes homens e nenhum deles me contrariou.²

Entretanto, Von Neumann dificilmente poderia ser descrito como um asceta.

“Festas e vida noturna tinham um apelo especial para Von Neumann. Enquanto dava aulas na Alemanha, foi um frequentador assíduo do circuito de clubes noturnos da ‘Era Cabaret’, de Berlim.”³ As festas que ele e sua esposa davam em Princeton eram famosas, com a atmosfera de um *salon* europeu, durante as quais Jancsi alegremente se submetia ao mesmo papel que havia aprendido desde criança. Em uma dessas ocasiões, alguém lhe apresentou o “Problema da mosca e do trem”: “Dois trens a 32 quilômetros de distância se aproximam um do outro nos mesmos trilhos, ambos viajando a 32 quilômetros por hora. Uma mosca levanta voo da frente de um trem e se põe a voar, a 96 quilômetros por hora, em direção ao segundo trem; quando o alcança, retorna imediatamente e parte de novo em sua direção, sem parar. Qual a distância total percorrida pela mosca, antes de ser esmagada pela colisão dos dois trens?” Von Neumann respondeu imediatamente. Alguns dos hóspedes reunidos presumiram que havia descoberto algum truque simples que lhe facilitaria chegar à solução. Ao lhe perguntarem, ele respondeu: “Não, eu simplesmente adicionei as séries”. Von Neumann, conhecido por seu senso de humor afiado, segundo suspeito, não estava simplesmente somando as séries, mas adicionando mais uma historieta à sua própria lenda. Aqui existe, de fato, um truque, e minha esposa o descobriu em uma percepção instantânea: os trens vão se encontrar na metade da distância, o que significa que cada um deles percorre 16 quilômetros. A mosca voa três vezes mais rápido que os trens durante o mesmo período de tempo; portanto, 48 quilômetros. Essa é a mesma resposta que obteria se dividisse a viagem em etapas, de modo a formar uma série infinita e convergente. Desse modo, cada etapa cobre três quartos da distância remanescente, e a distância é cortada pela metade em cada etapa. Isso corresponde a $\frac{3}{4}(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\dots) = \frac{3}{4}(1+1) = \frac{3}{4}(2)(20) = 30$.

Ao final de sua curta vida - ele morreu com 50 e poucos anos dificilmente haveria alguma área importante da matemática em que Von Neumann não tivesse deixado importantes contribuições. Suas ideias geraram sete prêmios Nobel, o mais recente em 1997, de Economia. Ele também contribuiu para a área da física. Seu livro, *Mathematical foundations of quantum mechanics*, publicado em 1932,⁴ estabeleceu uma abordagem inteiramente nova ao assunto e permanece até hoje como uma parte substancial de sua fundamentação. “A mecânica quântica foi realmente muito feliz ao atrair o interesse, desde os primeiros anos de sua descoberta, em 1925, de um gênio matemático da estatura de Von Neumann. Como resultado, a estrutura matemática da teoria foi desenvolvida, e os aspectos formais de suas regras de interpretação inteiramente novas foram analisados por um único homem em dois anos (1927-1929).”⁵

Von Neumann também era fascinado por jogos e, quase sem a ajuda de ninguém, desenvolveu a Teoria dos Jogos. Suas ideias encontraram aplicação imediata em campos tão diversos, como a economia e a estratégia militar. A doutrina desenvolvida durante a Guerra Fria de uma “destruição mutuamente assegurada” foi baseada diretamente em sua Teoria dos Jogos, e foi uma injustiça cruel que o cineasta Stanley Kubrick modelasse o Dr. Strangelove - que amava a guerra, e não sua prevenção - sobre aspectos da personalidade de Von Neumann.

"Tudo flui" (Heráclito)

Era inevitável que, mais cedo ou mais tarde, Von Neumann estudasse o tema dos fluxos de turbulência, por mais corriqueiro que esse assunto possa parecer - isso porque, durante séculos, esse problema havia derrotado todas as tentativas de alcançar sua compreensão. O último progresso substantivo nessa área tinha sido realizado por Blaise Pascal, no final do século XVII. Para enfrentar o problema, Von Neumann desenvolveu uma abordagem inteiramente nova, com profundas ramificações que até hoje se espalham, e que se encontra muito próxima do assunto principal a ser tratado por este livro.

Em vez de tentar descobrir soluções matemáticas para as equações terrivelmente complexas que descrevem a turbulência, ele desenvolveu um método de aproximação iterativa [por repetição] - adivinhar o resultado, medir o erro, ajustar a resposta, inseri-la no problema e repetir o processo mais uma vez. Não é surpreendente que ele, um pouco mais tarde, compreendesse tão rápido o poder de computação das redes neurais, uma vez que também esse era fundamentalmente iterativo.

Os resultados dos cálculos repetitivos de Von Neumann nunca atingiram a perfeição, mas se demonstravam precisos em qualquer grau de aproximação desejado. Não apenas seu método funcionou com relação à turbulência, como se demonstrou o único meio de enfrentar o principal obstáculo encontrado pelo Projeto Manhattan. Foi justamente para realizar o imenso número de cálculos necessários para se atingirem em valores suficientemente precisos para as equações que permitiriam determinar a porção minúscula de isótopo explosivo de urânio a ser separado do isótopo não-explosivo com o qual se encontrava misturado, que Von Neumann inventou o computador moderno. O computador não somente tornou possível a bomba atômica, como demonstrou ser a chave para a superioridade dos aliados em criptografia - algo ainda mais crucial para sua vitória que a própria bomba. E, a partir de tudo isso, surgiu a Agência Nacional de Segurança como a agência de espionagem mais poderosa do mundo.

Se não fosse por Von Neumann, é duvidoso até que pessoas como Stanley Kubrick tivessem a liberdade de caluniar pessoas como o próprio Von Neumann. De fato, cada computador construído atualmente, desde os grandes supercomputadores desenvolvidos pelo Ministério da Defesa dos Estados Unidos até o humilde circuito que anima os brinquedos eletrônicos, é baseado naquela que veio a ser conhecida como a “Arquitetura de Von Neumann”.

“Adivinhar, medir o erro, ajustar a resposta e introduzi-la de volta no sistema”: este é o método básico das redes neurais, em outras palavras, o método da inteligência natural. Em sua maneira tipicamente clara e espantosamente habilidosa, Von Neumann, de fato, desenvolveu os princípios da computação paralela. O fato de que suas ideias tivessem aparecido por meio de seu estudo da dinâmica dos fluidos tem uma aplicação importante que não pode ser encarada sem uma mudança radical de perspectiva quanto aquilo que a Natureza realmente representa.

O simples girar de uma colher de chá gera redemoinhos e vórtices cujas equações de movimento encontram-se totalmente além da possibilidade de uma solução. Mas tente encarar a coisa desse jeito: os sistemas naturais sempre assumem sua forma adequada. Em vez de pensar, como é natural, que “as coisas simplesmente acontecem”, imagine por um momento que a natureza está “modelando” alguma coisa e que, para fazer isso, precisa fazer uma série de “cálculos” de algum tipo em um “computador” de alguma substância evidentemente material. Nesse caso, ela realiza seus “cálculos” sem grande esforço. Como o faz? Com é construído seu “computador” e como ele funciona? Qual é o seu “algoritmo”?

Determinadas respostas são óbvias. Por exemplo, não existe uma “ela”, não há uma orquestradora, nenhuma entidade que fique parada olhando de fora, modelando e fazendo cálculos. Em vez disso, há apenas uma miríade de partes individuais - pedaços de matéria (no caso da turbulência fluida, por exemplo, moléculas de ar e de água) que não seguem outras instruções que não sejam as leis da natureza, destinadas a governar seus movimentos individuais e suas interações com seus vizinhos imediatos. Por meio das interações locais entre as partes, o padrão “correto” - o único que é possível - da ordem global emerge. Uma xícara de café “computa”, segundo essa estranha perspectiva, no mesmo sentido que um vidro rotativo “se recorda”.

Desse modo, talvez a melhor maneira de “resolver” o problema da turbulência - “dadas tais e tais condições, qual vai ser o aspecto do conteúdo da xícara de café dentro de um, dois ou três segundos depois que eu mexer o líquido?” - seja encadear uma série de “processadores” de capacidade limitada em interação com seus vizinhos. Cada processador não necessita fazer mais do

que responder aos estímulos (*inputs*) por meio de movimentos (*outputs*) como faria uma típica molécula de água (se o café for bem fraco). As interações de vizinho para vizinho entre os processadores seriam semelhantes às funções de transferência em neurônios que determinam a saída do sistema com base no total das entradas. As “regras” governando tais redes seriam a simples mímica das leis físicas conhecidas que governam o comportamento intermolecular.

Nenhum desses processadores individuais - a que Von Neumann chamou de *células* - nem o próprio projetista poderiam ou iriam querer analisar um problema em dinâmica fluida a fim de alcançar uma solução ou seja, resolver uma equação. Porém, da maneira que a natureza age, todas as células trabalhando ao mesmo tempo, “em paralelo”, poderiam “resolver o problema”, produzindo a saída adequada para qualquer conjunto dado de condições iniciais. Von Neumann denominou esse processo paralelo maciço, composto por elementos de processamento idêntico com interações de vizinho para vizinho, seguindo um mecanismo sempre igual, de “*cellular automaton*”, ou CA [autômato celular]. Como Deus, o “relojoeiro ausente”, você põe para funcionar o seu autômato celular, vai embora e volta quando quiser - caso deseje - para ver o que foi que ele realizou. Vale a pena notar que Von Neumann escolheu a palavra “célula” deliberadamente. Seu objetivo real, como o nosso, se achava muito além de um entendimento de como funcionavam os redemoinhos ou da criação de um computador capaz de fabricar bombas atômicas. “Embora Von Neumann fosse um físico, do mesmo modo que um matemático [...] em seu trabalho sobre os autômatos celulares [...] o seu interesse era dirigido mais para uma explicação reducionista de certos aspectos da biologia.”⁶

Ele desenvolveu os autômatos celulares em sua busca da descoberta *das características minimamente essenciais de um sistema capaz de produzir a complexidade computacional paralela demonstrada pela própria vida*.

Entra o autômato

A Figura 7-la ilustra a forma básica do autômato celular de Von Neumann. A Figura 7-lb mostra uma variedade mais comumente utilizada nos dias que correm - o chamado autômato celular vicinal de Moore ou “Moore CA”.

Cada célula mais quatro de suas vizinhas (ou oito, no caso da direita) constituem uma “vizinhança” ou região ocupada por um autômato celular. Cada célula recebe um valor inicial. Esses valores podem ser básicos quanto 0 ou 1 (ou -1 e +1) ou quaisquer entre centenas de valores diferentes. As células modificam seus valores de acordo com uma “regra de atualização”, baseada em

seus próprios valores e nos valores de suas vizinhas. Imagine, por exemplo, que as células podem assumir valores de 0 ou de 1. Então, a chamada “regra da maioria” declara que, se a soma dos valores da região, mais o valor da própria célula, for de 4 ou menos, a célula será atualizada para 0; se for superior a 4, a célula deverá ser atualizada para 1. Na prática, todas as células são imediatamente atualizadas, com base em algum valor já presente nas células. A seguir, todas são atualizadas imediatamente mais uma vez, com base nos valores que a atualização anterior produziu. Esse tipo de atualização simultânea é denominado “atualização sincronizada”.

Uma regra de atualização é bastante semelhante à regra que determina o que irá sair de um neurônio, de acordo com aquilo que entrou nele; ou com as leis que determinam como as rotações se alinham nas regiões frustradas compostas por misturas de vizinhos ferromagnéticos e antiferromagnéticos de um vidro rotativo. Sem dúvida, a Figura 7-1c demonstra que um autômato celular é bastante semelhante a um “mapa” de Hotfield localmente conectado e formado por dois “micro-circuitos canônicos” triangulares e superpostos (do tipo mostrado nas Figuras 5-4, 5-5 e 6-6).

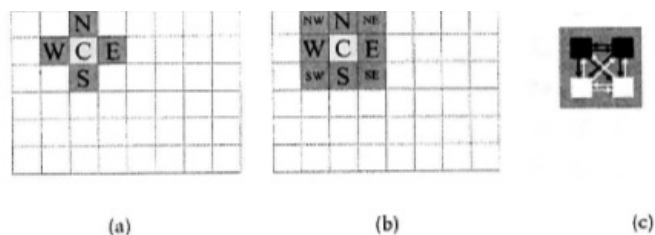


FIGURA 7-1. Esquema de um autômato celular. (a) “Região de Von Neumann”. (b) “Região de Moore”, composta por nove células, uma variedade desenvolvida por um dos seguidores de Von Neumann. Não se estabelecem limites quanto ao aspecto de uma vizinhança de autômato celular – desde que funcione no final. (c) Um autômato celular representado como rede neural composta por dois microcircuitos canônicos triangulares que se acham parcialmente superpostos.

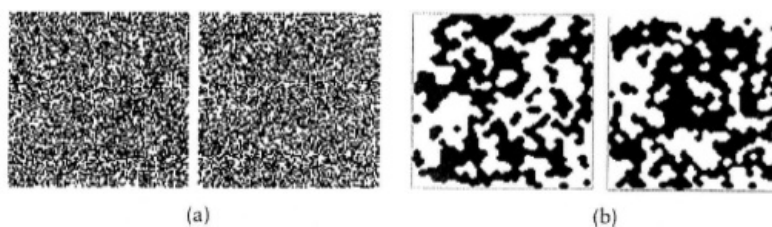


FIGURA 7-2. (a) Autômato celular em dois diferentes estados aleatórios iniciais e (b) seus estados finais correspondentes.

Como as redes neurais, os autômatos celulares são capazes de auto-organização, ou seja, geram ordens globais a partir de interações puramente

locais. A Figura 7-2a mostra um autômato celular de 100x100 em dois diferentes estados aleatórios iniciais de zero e outros em que o zero corresponde ao branco e o 1 é representado pelo negro. Depois de somente dez atualizações, usando a regra do “voto da maioria”, os autômatos celulares atingem seus estados finais respectivos na Figura 7-2b.

Considerando todas as configurações possíveis de quadrados brancos e pretos em que um tabuleiro de 100x100 poderia arranjar para si mesmo, torna-se claro que esta pertence a uma família distinta. Podemos denominá-la “*Guernsey Cow*” [Vaca Jérsei], e percebemos imediatamente que pertence a uma família diferente das que poderíamos chamar “Zebra” ou “Bolinhas”. A “família” a que uma determinada configuração pertence constitui a solução ou o “mínimo de energia” típico para um determinado sistema, isto é, um agregado de células com uma regra de atualização específica. Há muitas soluções - estados de energia mínima aproximadamente igual, ou padrões correspondentes a uma mesma família - para qualquer sistema dado.

No entanto, os dois padrões finais anteriores são distintos, e qualquer localização inicial na grade original tem uma probabilidade quase semelhante de terminar em preto ou em branco, não importa qual seja sua coloração inicial. Isso ocorre dessa maneira ainda que os padrões possam ser reconhecidamente os “mesmos” (da mesma forma que Julieta “é” o sol) - assim como o padrão de manchas brancas e pretas em uma vaca Jérsei é característico, embora se diferencie de animal para animal. De fato, os padrões de cores encontrados de maneira regular, mas individualmente imprevisíveis nas peles de muitos animais - vacas, tigres, zebras, peixes -, são gerados desta maneira, por meio de interações locais semelhantes às dos autômatos celulares entre as células pigmentares (biológicas), assim como os padrões similares de nossas impressões digitais, infinitamente variáveis e semelhantes.

Compare o autômato celular da Figura 7-2 a uma simulação de interações de vidros rotativos, equivalente a uma rede neural do tipo Hopfield, também iniciando a partir de duas configurações diferentes, inicialmente “randômicas”, e capaz de modelar as leis reais da física encontradas na natureza que determinam como as rotações próximas afetam umas às outras (veja Figura 7-3). O preto representa rotações para baixo e o branco, rotações para cima.

Com certeza, o processo de auto-organização em ambos os sistemas é espantosamente semelhante. Autômatos celulares ainda mais sofisticados podem ser criados onde tanto o tempo como o espaço estejam desordenados, isto é, onde as células não estão organizadas em um arranjo bem-feito, mas sim distribuídas aleatoriamente sobre uma superfície (ou um espaço); de igual maneira, as células são atualizadas de forma casual. Além disso, a regra da

atualização pode ser “estocástica”\ em vez de fixa - o equivalente à adição de calor. Mas, se as regras adequadas à região forem implementadas, os estados iniciais aleatórios nesses autômatos celulares semelhantes à vida, os assim chamados “autômatos celulares amorfos”, ainda produzem ordem: de fato, justamente a ordem que parece de forma auto-evidente a mais “natural” possível, como é mostrado na Figura 7-4.

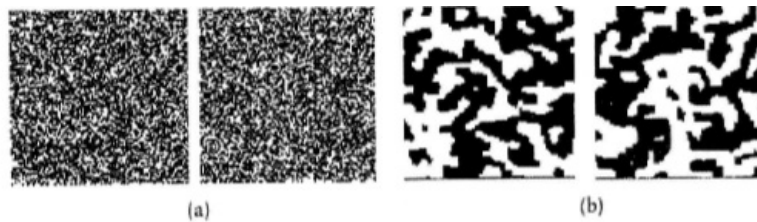


FIGURA 7-3. Emprego de um modelo para interações rotação-rotação em um material magnético. (a) Duas configurações diferentes e inicialmente aleatórias (desordenadas) se estabelecem em (b) dois estados finais diferentes, mas semelhantes.



FIGURA 7-4. Autômato celular amorfo gerando uma distribuição ordenada estável. As células (vistas contra o fundo negro) são arranjadas aleatoriamente e podem assumir uma gama de valores desde o branco até o cinza-escuro.

Esses autômatos estão mais próximos da imitação das “características de processamento global de sistemas genuinamente vivos”. Esta frase, em jargão científico, salienta a ideia de que a computação (“processamento”) é alguma coisa que a natureza (em especial, a vida) executa automaticamente, seguindo seus processos normais, e que esse tipo de computação envolve a geração de padrões (ordem “global”), não de acordo com um plano que saia do geral para o particular, mas dependendo apenas das regras que governam as relações locais entre porções de matéria. De forma resumida, a Figura 7-5 mostra como um leopardo ganha suas pintas, conforme modelado por um autômato celular amorfo.

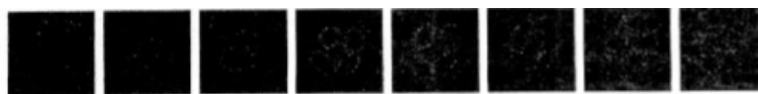


FIGURA 7-5. Autômato celular amorfo gerando “pintas de leopardo”. O padrão final é o mais estável.

Vida: um computador universal

Assim como as redes neurais, os autômatos celulares geram uma ordem espacial global por meio de interações estritamente locais. Realizam operações lógicas por meio da oscilação, do mesmo modo que podem fazer um tipo particular de rede neural. Porém, será que os autômatos celulares, empregando a oscilação, podem também gerar uma ordem temporal global, isto é, padrões capazes de se modificar ao longo do tempo de forma ordenada (em “sincronia”)? (Esse problema foi enfrentado pela primeira vez entre o final da década de 1950 e o início dos anos 1960. Marvin Minsky foi o primeiro a provar que os autômatos celulares eram capazes de sincronização, mas sua prova não chegou a ser publicada.) Veja como eles podem executar o processo.

1. Se mais de dois de seus oito vizinhos mais próximos estiverem “despertos” (colocados em 1), uma célula “adormece” ou permanece adormecida (ligada em 0). Esta é uma forma simples de limiar de inibição.
2. Se uma célula adormece, ela permanece adormecida durante três atualizações e, então, desperta automaticamente.

Os neurônios biológicos possuem um período “refratário”. Depois de uma descarga, novas ativações são inibidas durante algum tempo. Em seu estado totalmente preparado, o neurônio dispõe de um “gatilho” - seu limiar de descarga é muito baixo, e basta uma quantidade mínima de excitação para fazer com que ele se torne suscetível à ativação. Imediatamente após a ativação, o limiar pula para cima, para ir baixando de forma gradual. Um estímulo excitador constante irá, portanto, provocar uma ativação rítmica do neurônio, em um ritmo determinado pela intensidade da excitação. Dessa forma, uma entrada contínua, que encontre um período refratário calculado, resulta em uma saída oscilatória “sintonizável” - apressa-se o ritmo pelo aumento da intensidade de entrada. A situação, com nosso novo autômato celular, é bastante semelhante, exceto que o período refratário é fixo. (A regra pode ser modificada facilmente, a fim de criar uma célula que possa ser sintonizada.)

Tommaso Toffoli e Norman Margolus, que se tornaram pioneiros da teoria dos autômatos celulares enquanto trabalhavam no MIT, compararam esse tipo de autômatos celulares à vida dos vermes oligoquetas tubários, que vivem no fundo

dos oceanos,⁷ um modelo de *interação competitiva/cooperativa* entre os sistemas vivos. Um verme tubário põe sua cabeça coberta de filamentos para fora do tubo em que reside, buscando peneirar fragmentos alimentícios flutuantes. Se detectar um número excessivo de seus vizinhos com as cabeças para fora, esconde a cabeça durante um período fixo de tempo, antes de tentar emergir novamente. Uma colônia de vermes tubários estabelece dessa maneira um padrão dinâmico de “cooperação” dentro de sua competição natural pelos recursos disponíveis.

A Figura 7-6a mostra um estado inicialmente aleatório de um autômato celular desse tipo. Já é mais complexo que o autômato celular da Figura 7-2, porque cada célula pode apresentar-se em uma gama de valores (na escala cinza, em vez de simplesmente branco ou preto) e mostra muito mais elementos. À medida que as atualizações vão sendo realizadas, o estabelecimento de padrões globais vai emergindo aos poucos. Dois estados posteriores são apresentados nas Figuras 7-6b e 7-6c.

Depois de aproximadamente 250 atualizações, já se encontra presente um alto grau de organização. Mas esse instantâneo não pode mostrar como, em vez de convergir para um padrão estável (como nas Figuras 7-2, 7-3, 7-4 e 7-5), esses autômatos celulares convergem em uma *sequência quase cíclica*, dinamicamente mutável, de ondas e espirais que viajam ao longo do conjunto, irradiando-se de vários centros que *nunca se repetem* da mesma forma, mas que são de uma “família” estável. Alguma impressão desta dinâmica global incrivelmente bem organizada pode ser obtida da sequência de instantâneos colocados lado a lado na Figura 7-7.

Essas oscilações globais significam que o sistema inteiro foi sincronizado. O “período refratário” exerce a função de um marcador de tempo local, do mesmo modo como acontece com os neurônios biológicos. Ninguém instruiu o sistema para “sincronizar seus relógios”, mas é essa função que ele executa, sem precisar de quaisquer instruções. Toffoli e Margolus demonstraram da mesma forma que, ainda quando a atualização é aleatória, os autômatos celulares oscilatórios acabarão por se auto-organizar tanto espacial como temporalmente, e todas as funções lógicas básicas, incluindo **XORS (OR exclusivo)** aninhados, podem ser construídas a partir deles. Eles são, para resumir, computadores paralelos, no mesmo sentido que as redes neurais do tipo não-supervisionado.⁸ Recentemente, um projeto financiado pela DARPA, a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada do Departamento de Defesa dos Estados Unidos [*Defense Advanced Research Projects Agency*], e desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts - MIT demonstrou como ondas sincronizadas, de um tipo bastante semelhante, podem ser geradas em autômatos celulares que, mesmo não

dispondo de atualização sincronizada, ainda assim as células nele contidas podem estar espalhadas de forma aleatória.⁹

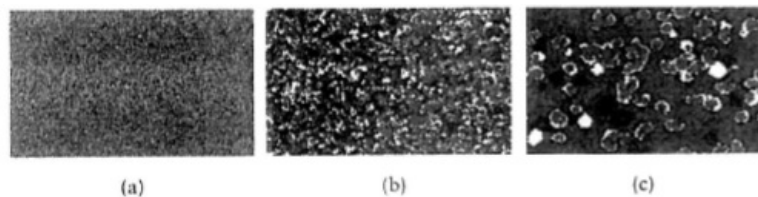


FIGURA 7-6. (a) Estado inicial aleatório de um autômato celular competitivo/cooperativo com inibição "refratária" acionada pela vizinhança local. (b) O mesmo autômato celular competitivo/cooperativo após 50 atualizações. (c) O mesmo autômato celular competitivo/cooperativo após 254 atualizações.

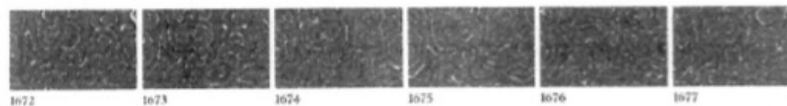


FIGURA 7-7. Ondas e espirais concêntricas viajando sincronizadamente em um autômato celular competitivo/cooperativo com "inibição refratária". Atualizações de número 1.672 a 1.677.

Querida, encolhi o computador

Von Neumann viu que, para um organismo vivo, a célula é o elemento fundamental de processamento local que gera padrões globais, do mesmo modo que a inteligência global. Mas os organismos unicelulares demonstram possuir tanto padrões ordenados de comportamento como inteligência rudimentar. Se a ideia básica por detrás das redes neurais e dos autômatos celulares estiver correta, isto é, de que a inteligência e a ordem em uma certa escala surgem a partir do particular para o geral, desde as interações locais de muitos elementos em pequena escala, então a própria célula individual (e os neurônios, em particular) devem conter elementos ainda menores que, interagindo localmente, possam de forma semelhante gerar inteligência e ordem global. Existe alguma evidência nesse sentido?

Sim, existe. Nos primeiros anos do século XX, um adolescente russo, muito compenetrado e seguro de si, resolveu construir uma bomba para matar o czar. Ele não obteve sucesso, mas suas investigações levaram Boris P. Belousov a uma carreira de químico militar extraordinariamente bem-sucedida, após a fundação da União Soviética. Durante a época em que cumpria o serviço militar, ele se deparou com um fenômeno que nunca fora descrito antes - uma reação química *oscilatória* -, ou seja, a mistura dos componentes de sua experiência mudava de cor a intervalos de tempo regulares, com a mudança (e, portanto, a

reação) se propagando em forma de onda. Belousov submeteu suas descobertas à publicação em uma revista soviética especializada em química.

O artigo foi rejeitado sem maiores considerações, porque o fenômeno em questão era absolutamente impossível. Pelas leis da termodinâmica, replicou o editor, as reações químicas dentro de um sistema fechado devem mover-se rapidamente em direção a seu estado de equilíbrio. Além disso, elas se movimentam em uma única direção portanto, dois passos para a frente e um passo para trás era uma situação completamente fora de questão.

Belousov ficou tão aborrecido que desistiu da ciência, apesar da insistência de seus colegas. Na metade da década de 1950, ele entregou a receita utilizada para a produção de sua reação química a um bioquímico, Sergei Shnoll, que se tornou professor no Instituto de Biofísica Teórica e Experimental de Pushkin. O Instituto finalmente publicou o artigo de Belousov, que chamou a atenção de um físico, A. M. Zhabotinsky, que o estudou cuidadosamente. Em 1966, foi realizado o primeiro congresso sobre a reação de Belousov-Zhabotinsky e outros sistemas químicos oscilatórios e “excitáveis”, o que fez com que essa área de estudo se tornasse importante para os químicos. A Figura 7-8a mostra o aspecto da reação de Belousov-Zhabotinsky quando realizada em uma fina camada sob condições cuidadosamente controladas. Para tornar a comparação mais fácil, a Figura 7-8b reproduz uma versão ampliada do autômato celular temporalmente coerente da Figura 7-7, depois que este se estabeleceu em um padrão estável de ondas e espirais oscilatórias. Os dois padrões dinâmicos são de formato idêntico, salvo que a reação química apresenta uma “granulação muito mais fina”. Suas células são, de fato, moléculas, e existem trilhões delas. O autômato celular de 100x100 possui apenas 10 mil células.

Nas palavras de um pesquisador, “a lógica digital pode ser implementada na cinética química de soluções homogêneas. De uma maneira explícita, construímos portões lógicos e mostramos que circuitos arbitrariamente grandes podem ser formados a partir deles, o que comprova que um subconjunto das construções disponíveis para os seres vivos possui poderes computacionais universais do tipo desenvolvido por Turing”.¹⁰

Sem dúvida, idênticos processos computacionais subjacentes governam a auto-organização em muitas escalas diferentes da natureza. Na Figura 7-8c, vemos uma fotografia do crescimento e da migração de uma colônia de determinada ameba, *Dicytostelium ducoideum*, para a qual o elemento de processamento individual, ou “célula”, é de fato um organismo composto por uma única célula. E claro que as ondas e espirais da colônia de amebas viajam muito mais lentamente que a locomoção de uma reação química ou de um processador paralelo artificial e veloz, como um autômato celular; e podem

passar muitos anos antes que as amebas se estabilizem nesse padrão.

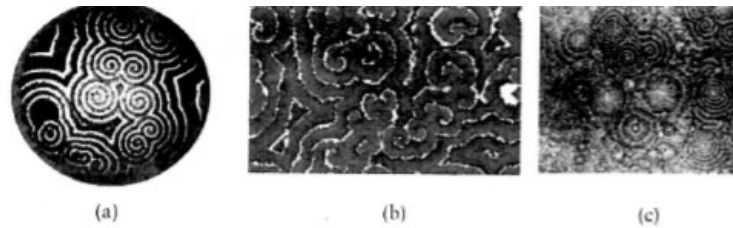


FIGURA 7-8. (a) Reação química oscilatória de Belousov-Zhabotinsky. (b) Um autômato celular competidor/cooperador após seu desenvolvimento de coerência temporal, demonstrado na atualização de número 1.677. (c) Padrões de crescimento da ameba *Dicytostelium discoideum*.

Embriogênese computacional

Um dos grandes enigmas da vida é a maneira como suas múltiplas formas assumem, cada uma, seu aspecto particular. Durante séculos, as complexidades da forma do corpo e o seu desenvolvimento, a partir de uma mera bola de células, também serviram como um poderoso argumento em favor de um projetista que esculpiu essas formas, de acordo com sua vontade. Poderiam autômatos celulares amorfos do tipo que, em duas dimensões, davam aos leopardos suas pintas por meio de interações puramente locais, gerar formas tridimensionais complexas ao extremo, simplesmente por meio de computações? Já levantamos algumas dúvidas razoáveis quanto à natureza puramente *auto-organizadora* das redes neurais artificiais, mesmo que já tenha sido claramente estabelecido que elas realmente conseguem aprender sozinhas, que somos nós que projetamos sua arquitetura e seus esquemas de processamento, e que também somos nós que montamos o conjunto para fazer com que funcione (ou escrevemos os códigos que permitem a um computador digital padrão realizar uma simulação em software desse mesmo conjunto). Em outras palavras, uma coisa é demonstrar que o cérebro pode aprender sozinho, mas será que um cérebro *auto-organizador* pode ser, ele próprio, *auto-organizado*? De que modo esse cérebro veio a existir inicialmente?

A Figura 7-9a é um famoso desenho, ainda que antigo (de 1940), do primeiro estágio significativo do desenvolvimento do cérebro: a formação de um tubo oco, dentro de uma densa bola de células. E a partir desse “tubo neural” que todos os quatro cérebros humanos acabarão por se desenvolver.

Compare esses desenhos com a sequência de um autômato celular amorfo tridimensional (mostrado em corte transversal bidimensional na Figura 7-9b) gerando uma estrutura semelhante a um tubo neural estritamente por meio de interações locais entre células vizinhas. (Na embriologia dos seres vivos, as

interações locais são de fato mediadas principalmente por gradientes químicos.) O método é diretamente modelado na “computação paralela”, realizada em reações químicas oscilatórias.

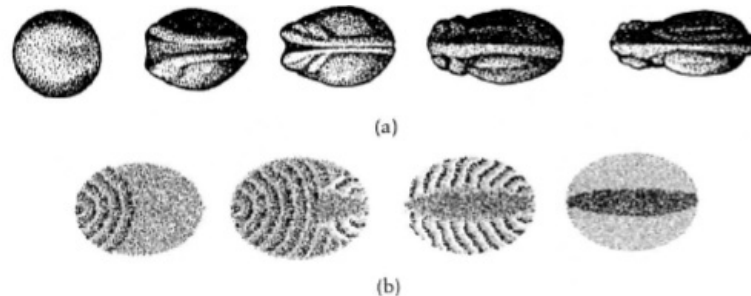


FIGURA 7-9. (a) Desenvolvimento do tubo neural entre 50 e 80 horas após a fertilização na *Rana pipiens* (sapo) embrionária. (b) Autômato celular amorfo tridimensional (mostrado em duas dimensões), realizando a embriogênese do tubo neural por meio de interações locais.

Há, entretanto, uma conexão ainda mais direta entre a auto-organização do embrião e a formação do quarto cérebro como uma rede neural funcional. Ronen Segev e Eshel Ben-Jacob, autores de um artigo publicado na *Journal of Complex Systems*, escreveram:

Durante a morfogênese embrionária, uma coleção de neurônios individuais se transforma em uma rede capaz de funcionar com capacidades singulares. Só recentemente esse exemplo tão avassalador dos processos emergentes no mundo natural começou a ser estudado. Aqui nós [...] propomos que o ambiente embrional (o conjunto dos neurônios e das células glia) age como um meio excitável (isto é, um autômato celular), em que ondas químicas concêntricas ou espiraladas dão origem a um mecanismo de comunicação, regulação e controle necessário para a autoconexão adaptativa dos neurônios.¹¹

Em outras palavras, durante o desenvolvimento do embrião, processos semelhantes aos empregados por autômatos celulares amorfos servem como um “canal”, por meio do qual se auto-organiza a arquitetura das redes neurais de alto nível (e em escala maior) do cérebro, que, por sua vez, auto-organiza por si mesmo os dados da experiência de nível ainda mais alto (e em escala ainda maior). Além disso, são especificamente “ondas químicas”, no próximo nível mais baixo (e em menor escala) que fornecem o canal de comunicação para as células embrionárias. Esse arranjo sugere que os sistemas químicos de uma determinada espécie podem funcionar como autômatos celulares - ou, se quiser,

como redes neurais. E por que não? Se materiais magnéticos inorgânicos têm a potencialidade para organizar a si mesmos, por que as moléculas e biomoléculas não poderiam apresentar a mesma capacidade? E, se compostos químicos são capazes de funcionar como autômatos celulares entre células - como ocorre na embriogênese -, com certeza são capazes de fazer o mesmo no interior de cada célula, em particular dentro de cada neurônio, desde que os sinais químicos e as reações químicas reais sejam as mesmas dentro e fora das células.

Viajando para baixo

Segev, já citado, foi bastante específico a respeito dos tipos de “ondas químicas” envolvidos na auto-organização. Elas são *viajantes*, *espirais* e *concêntricas*, do mesmo modo que nas colônias de amebas, na reação química de Zhabotinsky e nos autômatos celulares sincrônicos. A significação dessas características é surpreendentemente simples à luz de nossa discussão de redes neurais de Hopfield modificadas. Ondas são oscilações; ondas espirais e concêntricas são estados bidimensionais ou tridimensionais estáveis; as oscilações encadeadas em rede podem ser computadas porque podem formar o equivalente matemático de redes de Hopfield altamente eficientes; as oscilações que “viajam” ao longo das redes podem comunicar sinais e demarcar o tempo de forma a estabelecer uma sincronia, isto é, uma coerência temporal. Os sistemas químicos desse tipo demonstram, portanto, todas as indicações de serem capazes da mesma inteligência auto-organizadora que apresentam os neurônios biológicos.

Toda essa situação soa muito semelhante às nossas especulações sobre as capacidades aninhadas nas HERS, cada conjunto mais amplo organizando os conjuntos menores dentro deles - *mas de forma reversa*. Na vida, é o interior que torna disponível aos elementos individuais aquelas características de que precisam, de tal modo que o elemento e seus vizinhos locais possam auto-organizar sua estrutura global. Esse tipo de auto-organização do menor para o maior é uma forma de computação paralela. Ao cairmos até o nível celular (neurônios), devemos, portanto, suspeitar fortemente de que não atingimos de forma alguma o fundo.

De fato, há muito tempo, é de conhecimento geral que o neurônio individual é uma entidade extraordinariamente complexa. Ele altera suas extrusões de modo a criar, modificar e destruir conexões com outros neurônios; também é capaz de auto-regeneração; e coleções de neurônios podem dividir-se para aumentar seus números, como em resposta a tarefas mentais que as desafiem.¹² (O fato de que os neurônios são capazes de regeneração é uma descoberta

relativamente recente que contrariou a sabedoria convencional estabelecida durante muito tempo.)

E claro que a vida interior do neurônio vai muito mais além de uma simples “função de transferência”, que adiciona informações de entrada. Considerando tudo quanto aprendemos até agora, deveríamos suspeitar de que esta vida interior é constituída por uma computação paralela de algum tipo, em escala menor, porém *muito mais* maciça. Pode *não parecer* uma computação à primeira vista (do mesmo modo que o método de operação do cérebro não parecia) - mas ninguém jamais olharia para uma colônia de amebas para dizer: “Olhe só! São computadores!” todavia, estudada de maneira apropriada, irá se revelar uma variante de uma rede de Hopfield, como um autômato celular ou como uma rede de osciladores, e todos computam de uma forma bastante semelhante: de baixo para cima, do menor para o maior. *Cada neurônio, do mesmo modo que cada pessoa em uma sociedade, provavelmente é, em si mesmo y uma rede composta por muitos elementos de processamento individual* Diferentes implementações físicas de processamento paralelo predominam em diferentes escalas, mas todas as implementações compartilham uma capacidade comum, tanto computacional quanto de auto-organização.

Até onde poderemos viajar para baixo e esperar descobrir esse mesmo paralelismo? Edward Fredkin, um dos grandes pioneiros da área da inteligência artificial no MIT, concluiu que a capacidade computacional paralela está entretecida na própria constituição da matéria; que a realidade é, por assim dizer, um maciço autômato celular; e que a inteligência, a cada nível, era um concomitante necessário. Nessa perspectiva, os fluxos de turbulência *são realmente* uma forma de computação. Se essa noção fizer sentido, devemos descobrir que o “processo de projeção”, que eventualmente produziu um sistema nervoso capaz de funcionar de uma forma tão eficiente quanto o nosso (e os de outras espécies também), envolve de maneira semelhante algum tipo de computação paralela e auto-organizadora.

Esta é, precisamente, a maneira como devemos considerar a *evolução*.

Para aqueles leitores que ainda guardam seus velhos jogos de "O Pequeno Químico" ou assemelhados, esta é a fórmula para a reação Belousov-Zhabotinsky.

- Equipamento necessário: uma balança de 100 g, um cilindro transparente e graduado até 25 ml, um cilindro graduado até 100 ml, um cilindro graduado até 250 ml, uma chapa eletromagnética, um béquer (copo de boca larga) [de vidro resistente ao calor] de 1.500 ml, um béquer de 1.000 ml [um litro], quatro

béqueres de 500 ml, um béquer de 250 ml e uma lâmina de cultura.

- Solução (1): 800 ml de água, 60 g de trióxido de sodiobrometo (NaBrO_3) e 24 ml de concentrado de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

- Solução (2): 25 g de ácido malônico em 250 ml de água.

- Solução (3): 0,5 g de o-fenantrolina, 1 g de sulfato de amônia ferroso hidratado em 100 ml de água.

- Procedimento: misturar 180 ml da solução (1), 130 ml de água, 30 ml da solução (2) e 10 ml da solução (3).

- ... mexer continuamente. Resultados:

Uma solução vermelha que, a 25°C, se torna azul aproximadamente a cada 18 segundos e volta imediatamente à cor vermelha, durante um período de mais ou menos 1 hora e 15 minutos.

8. LEVANTANDO-SE PELAS ALÇAS DE SUAS PRÓPRIAS BOTAS

A evolução é aquilo que é. As classes superiores sempre acabam por se extinguir: esta é uma de suas características mais encantadoras.

- Germaine Greer

Esse é o lugar a que chegamos: a partir da perspectiva computacional, a realidade física é semelhante a um autômato celular e, desse modo, facilita a computação e a auto-organização em todos os níveis. A implementação da estrutura básica do cérebro, ou seja, a embriogênese neural, ocorre por meio de processos muito semelhantes aos utilizados pelos autômatos celulares. A inteligência de um cérebro maduro e educado é, em grande parte, o resultado da aprendizagem similarmente auto-organizada dentro da *rede neural* que foi criada durante a sua implementação. A partir de um ponto de vista matemático, as redes neurais e os autômatos celulares são quase idênticos - somente sua base e aparência físicas são diferentes. A auto-organização confere a capacidade de auto-organização ao nível seguinte.

Vamos acrescentar ao exposto a observação seguinte: por meio do efeito da reprodução competitiva orientada por uma *matriz genética*, o projeto do cérebro evoluiu, ou melhor, ainda *evolui*. A auto-organização também ocorre ao longo de imensas escalas de tempo, em que cada geração biológica constitui uma *atualização*. Por que uma *matriz*? Antes que o RNA e o DNA tivessem sido descobertos, John Von Neumann deduziu, a partir dos primeiros princípios naturais, que a vida deveria ser um tipo de autômato celular e que *um autômato celular; capaz de reproduzir a si próprio*, ou seja, de gerar versões de si mesmo cada vez melhores, *precisaria conter em si mesmo sua própria matriz, necessitaria possuir um meio de copiar essa matriz e, ainda, deveria dispor de um mecanismo para construir um novo autômato de acordo com essa planta original*. Para melhorar a atuação do autômato, *a matriz ou planta* deveria ter de passar primeiro por algumas mudanças. Esse é precisamente o mecanismo que os biólogos descobriram alguns anos mais tarde e que se encontra no coração dos sistemas da reprodução e da evolução.

A auto-organização do projeto do cérebro toma lugar no nível da matriz. Quando a matriz para um autômato celular é alterada aleatoriamente, conduz a

uma versão também alterada da entidade, no momento em que esta se duplica a partir da matriz. Se a versão alterada for superior, ou seja, for melhor adaptada às condições ambientais, a matriz modificada deverá ser preservada como ficou, descartar ou desativar as especificações da antiga planta e prosseguir com o processo de modificações, do mesmo modo que a HER perdia as pastilhas comestíveis quando errava.

Algoritmos genéticos: cópulas sincopadas

Vamos supor que implementamos algum tipo de *autômato celular autoreplicador* de acordo com as linhas elaboradas em 1984 por Christopher Langton, diretor do Programa de Vida Artificial do Santa Fe Institute¹. A Figura 8-1 mostra seu desenvolvimento em três etapas.

No devido tempo, um único autômato celular em formato de Qj de Langton se transforma em uma *colônia* “auto-similar”, ainda em expansão, constituída por muitas versões de si mesma, ou seja, todas em forma de Q_e cercando um núcleo crescente de restos mortais esqueléticos de letras Q.

Esse simples autômato celular mostra muitas das características de uma colônia de bactérias ou fungos vivos. Todavia, mesmo que seja autoreplicador, não é *adaptativo*. As regras que foram guardadas nas células, que lhes permitem gerar cópias de si mesmas em células desocupadas, são sempre fixas. Desse modo, vamos lhes dar a capacidade de se adaptar, armazenando nelas próprias matrizes semelhantes às de Von Neumann.

Em primeiro lugar, representamos a regra de atualização por um código: uma série de números (0 ou 1 para simplificar) que denominaremos “cromossomo X”. Vamos supor que 20 algarismos sejam suficientes para codificar a regra. Desse modo, cada um de seus 20 componentes serão “genes”, como exemplificado na Tabela 8-1.

Uma vez que cada gene só pode trazer um entre dois valores possíveis, o número total de possíveis cromossomos é de $2^{20} = 1.048.576$. Vamos supor, mais uma vez, que queiramos encontrar a “melhor” regra (em que “melhor” significa produzir algum resultado desejável, qualquer que seja). Podemos procurar essa regra vendo o que resulta quando $X = 00000000000000000001$, depois $X = 00000 000000000 00010$ [...] até chegarmos a 11111111111111111111 - mais de um milhão de tentativas; ou, então, podemos escolher regras ao acaso na pressuposição (talvez erro-nea) de que as regras numericamente “próximas” umas das outras não irão demonstrar perigosas diferenças em suas capacidades.

Esses métodos de otimização se demonstrarão muito ineficientes para

determinar qual é o melhor cromossomo. Vamos, portanto, tentar outra abordagem: selecionaremos aleatoriamente cem cromossomos X diferentes, com a intenção de testar a ação de todos sobre nosso problema. Colocaremos os resultados em ordem, criando uma hierarquia de “aptidão” entre eles, o que significa criar cópias múltiplas dos cinco que obtiveram os melhores resultados, e as emparelharemos aleatoriamente.



FIGURA 8-1. O autômato celular auto-replicador de Langton em seu ponto 0 e nas atualizações 56 e 157, respectivamente, da esquerda para a direita.

TABELA 8.1. Um cromossomo “sintético”, formado por 20 “genes” binários.

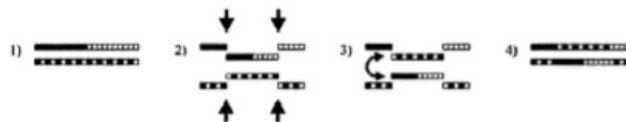


FIGURA 8-2 Sequência cruzada de dois “cromossomos”.



FIGURA 8-3. Cromossomo após a mutação.

Alinhamos, junto a seu parceiro, cada par de cromossomos e escolhemos dois lugares ao acaso em algum ponto de seu comprimento. Cortamos ambos os cromossomos, nesses dois pontos, extraímos os segmentos criados pelos cortes e trocamos um pelo outro. Depois, religamos as extremidades, criando, assim, dois cromossomos novos, mas relacionados entre si, como ocorreu na Figura 8-2.

Esse processo, que é referido como “crossover” [“sequência cruzada”], é modelado diretamente sobre os eventos biológicos que ocorrem durante a reprodução e que constituem uma parte crucial do processo evolutivo. Uma vez que dispomos de cópias múltiplas de cada par, podemos permitir a cada par que se submeta a diversos esquemas de sequência cruzada. Duas soluções que sejam

Esta dança de cópulas produz, por enquanto, apenas “pais” misturados. Para garantir que alguns de seus descendentes possam explorar novas situações, nós “sincopamos” o algoritmo, ou seja, nós lhe damos uma sacudidela inesperada no meio de seus ritmos regulares. Cromossomos recém-cruzados serão deliberadamente levados a arriscar que um ou mais de seus genes passem por uma modificação súbita e aleatória (veja Figura 8-3).

Um milhão de macacos

TABELA 8-2. Um cromossomo adequado ao grau máximo.

3	7	11	2	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	----	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

TABELA 8-3. Um cromossomo composto por seleção aleatória de genes.

v	g	B	E	1	X	x	+	3	w	K	f	c	f	R	K	_	7	9	N	,	E	8	h	/
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Compare isso com um algoritmo genético que tenha sido jogado em cima dos macacos. Começaremos com uma seleção de genes completamente aleatória (veja Tabela 8-3).

Definimos a adequação de uma sequência como sendo a soma das distâncias de cada caractere (de um teclado) até o caractere correto, dobrando essas distâncias sempre que estiver em maiúscula, quando deveria estar em minúscula, e vice-versa, e aumentando de uma maneira que a sequência inicial tenha uma taxa de adequação no valor de 1.000, enquanto uma sequência perfeita será avaliada como 0. Determine que a sequência cruzada máxima seja de 5% e coloque a taxa de mutações em 7%. Depois de duas gerações de competição, cópulas, sequências cruzadas e mutações, o melhor cromossomo obtido será aquele mostrado na Tabela 8-4.

Nenhum dos genes está correto, mas sua taxa de adequação passou para 486, menos da metade da distância para o ponto desejado! A 16ª geração produz o cromossomo da Tabela 8-5, com três genes corretos e uma taxa de adequação de 235.

A convergência para o cromossomo ideal (uma “bacia de atração”) seguirá a sequência apresentada na Tabela 8-6.

A Geração 91 acaba por produzir o cromossomo perfeito. A adequação (considerada aqui como o inverso de um “erro”) progride de uma forma muito semelhante à da convergência nas redes neurais, nos autômatos celulares ou na HER, conforme mostra o gráfico da Figura 8-4.

A evolução em uma paisagem mais complicada e bidimensional de adequação (energia) apresenta um aspecto ainda mais similar ao da convergência nas redes de Hopfield. A paisagem de adequação da Figura 8-5 é apresentada de forma “topográfica”. Cada círculo representa um cromossomo; sua localização na paisagem, o lugar em que se acha com relação à codificação das características ótimas para tal ambiente. À medida que prossegue a evolução, surgem cromossomos cada vez melhores (em que “melhor” significa “mais adaptados” para esta paisagem), enquanto os piores vão desaparecendo. No conjunto, permanece um número cada vez menor de cromossomos, uma vez que, embora houvesse muitas maneiras para que diferentes cromossomos fossem *mal-adaptados*, existe apenas uma forma de adaptação melhor. Os cromossomos adaptativos remanescentes, portanto, *convergem* para uma bacia de atração, tornando-se cada vez mais parecidos uns com os outros.

TABELA 8-4. Aspecto de um cromossomo após duas gerações.

L	5	P	d	X	w	l	y	a	0	1	.	t	u	D	#	E	t	b	#	+	Y	o	+
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

TABELA 8-5. Aspecto de um cromossomo após 16 gerações.

h	n	a	/	c	e	w	l	P	x	*	B	I	g	,	e	*	c	e	#	+	7
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Recentemente, os biólogos evolucionários descobriram situações na natureza em que organismos, cujos ancestrais eram muito diferentes, evoluíram convergentemente, como se determinados descendentes tanto de aves como de peixes tendessem a se tornar mamíferos bastante semelhantes — ainda que essa analogia seja exagerada. Esses exemplos são raros na natureza porque as paisagens de adaptação são extraordinariamente complexas e “*rugged*”[“acidentadas”], com muitos mínimos de energia profundos, mas mesmo assim relativamente de alta energia (como crateras de vulcões no alto de uma cordilheira), e também muitos mínimos de energia baixa (vales), que se encontram próximos ao mínimo absoluto. Muitas espécies diferentes, com características diferentes ao extremo, podem se adaptar de forma equilibrada aos mesmos ambientes - ambientes que, incidentalmente, incluem espécies que se encontram em todos os demais! As duas dimensões da Figura 8-5 implicam um ambiente em que se manifestam apenas duas características críticas. Os ambientes naturais apresentam incontáveis características, e sua descrição iria necessitar de um diagrama que apresentasse incontáveis dimensões perpendiculares.

As redes neurais, autômatos celulares, algoritmos genéticos e enrijecimento simulado, todos esses métodos realizam computação maciçamente paralela, do mesmo modo que a natureza o faz. Todos são matematicamente relacionados uns aos outros de forma muito próxima. A forma que a natureza escolhe para determinada situação - ou qual combinação de métodos - é definida pelos materiais que se encontram disponíveis e com os quais ela evolui o ângulo de ataque de maior eficiência. O mesmo princípio é utilizado nas aplicações artificiais. Máquinas paralelas, emba-sadas em autômatos celulares, realizam um bom trabalho, simulando ambientes semelhantes àqueles em que a própria evolução “computa” suas soluções.

TABELA 8-6. Convergência em direção ao perfeito cromossomo.

5	1	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	;	i	b	k	m	e	a	r	e
5	2	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	;	i	d	p	m	e	a	r	e
5	3	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	;	i	d	p	m	e	a	r	e
5	4	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	a	i	b	r	o	c	a	r	e
5	5	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	;	i	d	r	o	e	a	r	e
5	6	H	n	n	j	c	v	S	z	v	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
5	7	H	n	n	j	c	v	S	z	w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
5	8	H	n	n	j	c	v	S	z	w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
5	9	M	n	n	j	e	v	S	z	w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	0	M	n	n	j	e	v	S	z	w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	1	M	n	n	j	e	v	S		w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	2	M	n	n	j	e	v	S		w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	3	M	n	n	j	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	4	M	n	n	j	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	i	d	r	o	e	a	r	e
6	5	M	n	n	j	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	o	e	a	r	e
6	6	M	n	n	j	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	o	e	a	r	e
6	7	M	n	n	j	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	o	e	a	r	e
6	8	M	n	n	k	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	o	e	a	r	e
6	9	M	n	n	k	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	o	e	a	r	e
7	0	M	n	n	k	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	r	p	e	a	r	e
		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
9	0	M	o	n	k	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	d	s	s	e	a	r	e
9	1	M	o	n	k	e	y	S		w	r	o	t	e		S	h	a	k	e	s	p	e	a	r	e

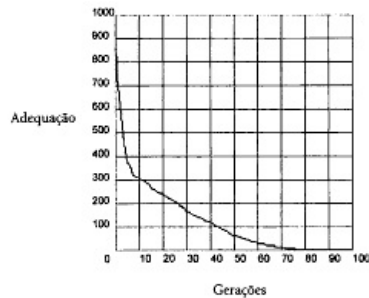


FIGURA 8-4. Algoritmo genético convergente para o cromossomo cujos genes soletram “Monkeys wrote Shakespeare” [Macacos escreveram [as peças teatrais de] Shakespeare].

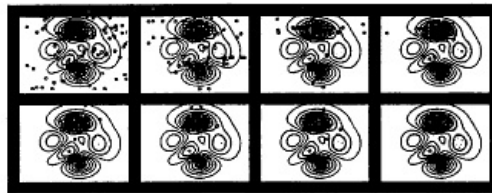


FIGURA 8-5. Algoritmo genético em uma paisagem de adequação bidimensional, apresentando numerosas bacias de atração secundárias.

Mas, a não ser que se restrinja a atenção a uma ou duas variáveis ao mesmo tempo, os resultados dificilmente poderão ser representados visualmente. Entretanto, os resultados numéricos demonstram o mesmo tipo de convergência que esses exemplos visuais “de brincadeira” com pequeno número de dimensões. Eles também mostram as oscilações em grande escala e grande frequência temporal, que são características de processos computacionais auto-organizadores, iterativos e organizados em redes. Desse modo, por exemplo, os evolucionistas agora levam a sério a possibilidade de que a ascensão e a queda nos números de uma espécie - e até mesmo os fluxos e refluxos no surgimento, no desaparecimento e no reaparecimento de espécies de determinado tipo (por exemplo, carnívoros) - tenham pouca relação com as circunstâncias externas das modificações ambientais e que derivem, ao contrário, da dinâmica natural dos processos de auto-organização. A humanidade pode vir a demonstrar-se apenas uma explosão azulada e transitória contra o fundo vermelho de uma biosfera estendida ao longo dos éons, equivalente a uma reação Belousov-Zhabotinsky.

Da programação genética até a computação molecular: hardware evolutivo

Sozinhos ou em parceria, os métodos de computação paralela artificial são mais implementados em software. Linhas de código computacional representam as funções matemáticas que correspondem à “rotação” e às interações de rotação com rotação; a uma “célula” e às regras que determinam os relacionamentos de

célula para célula; a um “neurônio” e suas conexões neurais; a “genes” em um “cromossomo” e suas mutações, sequência s cruzadas e descendência. Com sucesso notável, muitos grupos de cientistas em todo o mundo, na indústria e no ambiente acadêmico, estão desenvolvendo ‘software’ totalmente evoluídos e em contínua evolução.²

Quando rodamos programas de algoritmos genéticos, de redes neurais, de autômatos celulares ou programas de enrijecimento simulado, estamos computando por meio de uma execução contínua do *software* sobre um *hardware* fixo. Essa distinção não existe na natureza. Quando o redemoinho de água ao redor de uma colher de chá “resolve” as equações hidrodinâmicas que confundiram Pascal, ou quando as sinapses do cérebro aumentam ou diminuem sua força em resposta ao treinamento, não existe um “programa” estabelecido. Desde a reprodução no nível de cromossomos até a evolução de um biosistema, é o próprio hardware que se modifica (se organiza), e o padrão dessas modificações constitui a única “programação”.

No reino da inteligência artificial, os algoritmos genéticos evoluem *matrizes* e *plantas* para uma rede neural melhor; e por nossas mãos convertemos as melhores em uma implementação de software. E se, por acaso, houvesse uma versão artificial de “computação molecular evolutiva”, em que os algoritmos genéticos moldassem o hardware sem que servíssemos de intermediários? Esse processo seria muito mais próximo aos da natureza - sem a interpretação ou construção por humanos. Sem dúvida, esse esquema pode soar como as fantasias literárias de uma Mary Shelley ou de um Isaac Asimov. Mas, na realidade, protótipos primitivos de hardware evolutivo e auto-organizador já foram construídos. No momento em que escrevo, está sendo realizado o *quinto* congresso internacional devotado ao hardware evolutivo.

Veja como a coisa funciona: vamos imaginar a última palavra em conjuntos domésticos de montagem eletrônica. Em vez de uma chapa, sobre a qual encaixamos vários elementos e os interligamos por meio de algum tipo de fiação, como na Figura 8-6a, dispomos de um arranjo de elementos idênticos, cada um podendo ser modulado para exercer as funções de capacitor, resistência, transistor ou, simplesmente, um segmento de circuito, e assim por diante, como lhe convier, tal como aparece na Figura 8-6b. Para criar qualquer dispositivo, ativamos todos os interruptores para colocar os elementos como devem ser colocados e formar o circuito adequado.

Não precisamos mover os interruptores manualmente, ou seja, podemos empregar elementos controladores acionados pelo software.

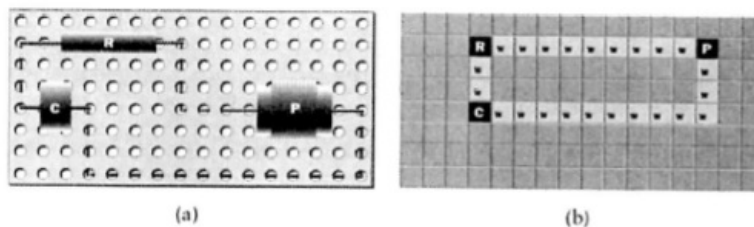


FIGURA 8-6. Circuitos modulares. (a) Conjunto eletrônico doméstico implementando um circuito de voltagem (P) [de "Power", energia], resistência (R), capacitância (C). (b) Arranjo regular de elementos de função múltipla, implementando o mesmo circuito.

Esses dispositivos já existem e são denominados "arranjos de portões de campo programável" - FPGAS [*field programmable gate arrays*]. Com o objetivo de projetar um circuito de processamento (em vez de um rádio), criamos (no software impulsor - a matriz) um grande número de FPGAS aleatórios, destinados a implementar *as operações lógicas empregadas por todos os computadores*, qualquer uma das quais pode ser criada pelo arranjo correto de resistores e capacitores e, em particular, de transistores.

Essas operações, denominadas "portões lógicos", são capazes de tomar insumos (*inputs*) e gerar exsumos (*outputs*). Neste sentido, um portão NOT recebe um único impulso de entrada e emite um único impulso de saída. Se a entrada for 1, NOT emite 0; se a entrada for 0, NOT produz 1, que pode ser representado pela presença de corrente, e 0 por sua ausência. Um portão XOR recebe duas entradas e produz apenas uma. Se a entrada for 1,1 ou 0,0, XOR emite 0; se a entrada for 1,0 ou 0,1, XOR produz 1. Outros portões são AND e OR. Qualquer conjunto de funções de computação pode ser construído a partir de uma série desses portões interligados.

Em um FPGA, os portões lógicos podem trocar de função em *nanos segundos* (10^{-9} segundos). Se o software, rodando o algoritmo genético, fosse por sua vez implementado em hardware dedicado, um processo evolucionário requerendo 100 mil gerações poderia transcorrer em menos de um segundo! John Koza, da Universidade de Stanford, antecipou que, com o emprego de FPGAS "se poderia [...] desenvolver um processo de auto-aprendizagem semelhante ao do cérebro humano".³

No primeiro caso de teste que funcionou, Adrian Thompson e Philip Husbands, do Centro para Neurociência e Robótica Computacional da Universidade de Sussex, educaram um FPGA para discriminar entre dois tons musicais. Acontece que circuitos eletrônicos não são equipados com ouvidos: para um FPGA, um "tom musical" é uma frequência de oscilações, e toda frequência é uma medida de tempo: picos de onda por segundo. O FPGA,

portanto, teve de evoluir uma maneira de discriminar dados temporais, mesmo que nenhum relógio ou oscilador tenha sido incluído no conjunto - somente portões lógicos. Mais do que isso, “nós estávamos solicitando a componentes incrivelmente velozes que realizassem alguma coisa muito mais lenta, a fim de produzirem uma saída muito correta e constante”, explicou Thompson.⁴ “O que eu queria descobrir é o que acontece quando se deixa a evolução pular fora das restrições apresentadas pelos seres humanos. Caso lhe deem algum hardware, ela poderá fazer coisas novas?”⁵

Depois de 4,1 mil gerações, o sistema evoluiu a habilidade de discriminar perfeitamente entre os dois tons. Mas, quando Thompson e seus associados “abriram a caixa preta” para ver como é que o sistema tinha agido, ficaram realmente surpresos. Seu FPGA dispunha de cem portões lógicos. Quando retraçaram as conexões ao longo de suas respectivas evoluções, descobriram que somente 32 dos portões estavam conectados ao sistema. Todavia, se removessem do conjunto *qualquer um* dos portões não-conectados, o dispositivo falhava. Pelo menos até os dias que correm, não conseguiram descobrir a razão desse procedimento. Eles calcularam que os portões ou respondiam a “ondas de rádio correndo entre os componentes que ficam ao lado uns dos outros, ou que todos os portões estavam interagindo, de algum modo, por meio da fiação de energia”.⁶

Porém, o maior quebra-cabeça que encontraram foi o “relógio”. Thompson “descobriu que o circuito de entrada movia-se por meio de uma mistura complexa de arcos de retorno (*feedback*). [...] Estes, provavelmente, criavam versões do sinal modificadas e atrasadas no tempo, que eram capazes de interferir com o sinal original, de modo a permitir ao circuito discriminar de algum modo entre os dois tons.”⁷ “Mas, de fato...”, concluiu ele, “não faço a menor ideia de como isso funciona.” Mesmo que a capacidade evoluída por esse FPGA seja apenas básica, o fato de que foi capaz de evoluir sozinho e tão rapidamente o seu hardware, e de uma maneira que excede a compreensão e o projeto de seu criador, constitui um conjunto

de desenvolvimentos assombroso. Até que ponto esses dispositivos poderiam evoluir, caso lhes fossem alocados recursos suficientemente maiores? Vamos ver o que acontece com um autômato cerebral Langton, formado por FPGAS.

Os construtores de cérebros: de volta para o futuro

Em 1992, aos 44 anos de idade, depois de muitos anos trabalhando para a indústria privada na área de física industrial, Hugo de Garis obteve seu doutorado em Ciência da Computação. Um ano depois, foi designado para o

Brain Builder Group [Grupo para Construção do Cérebro], do Departamento de Sistemas Evolutivos, vinculado ao Instituto de Pesquisas Avançadas em Telecomunicações - ATR \Advanced Telecommunications Research Instituté\, de Kyoto, Japão. Hoje, Garis chefia uma equipe do Star Lab, de Bruxelas, cujo alvo imediato “é construir cérebros artificiais com bilhões de neurônios artificiais”, a fim de desenvolver um cérebro artificial totalmente funcional dentro do prazo previsto de dez anos, composto a essa altura por *um trilhão* de neurônios e para garantir que “os computadores semelhantes a cérebros se transformem em uma indústria de trilhões de dólares dentro de 20 anos”.⁸

Esse não foi um sonho induzido por drogas. O governo japonês comprometeu-se a financiar 3 bilhões de dólares por ano durante dez anos (a partir de 1992), mas não apenas isso: o Grupo de Bruxelas, chefiado por Garis, faz parte de um extraordinário esforço multinacional para construir um genuíno cérebro artificial nos próximos anos. Os princípios da construção de cérebros artificiais empregando FPGAs em um autômato celular maciço e capaz de evoluir, com portões dispostos de modo a funcionar como células, modelam intimamente, de forma paralela, os princípios naturais da embriogênese que conduziram ao surgimento do cérebro humano. Para um protótipo bidimensional, algoritmos genéticos criaram as regras de atualização para as células (o “cromossomo” contém cerca de 90 mil “genes”), um milhão das quais foram colocadas no projeto. A estrutura inteira evolui em uma rede neural, com cerca de 90 células por neurônio. O resultado é uma rede neural desenvolvida e evoluída em hardware, com quase 40 milhões de neurônios em 32,7 mil conglomerados interconectados. Cada módulo foi desenvolvido pela estrutura *em menos de um segundo*.

Como os neurônios surgem a partir dos cérebros artificiais? Quando Christopher Langton desenvolveu seu autômato celular autoreplicador em forma de Q₃ (Figura 8-1), terminou dispondo de uma estrutura com uma espantosa semelhança a um axônio biológico, rodeado por sua bainha protetora de mielina. De fato, como é mostrado na Figura 8-7, à medida que o autômato celular se atualiza e cresce, os números em modificação dentro da bainha formam um fluxo de propagação: *um sinal*.

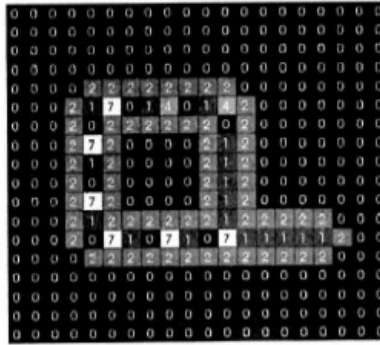


FIGURA 8-7. O autômato celular auto-reprodutor de Langton da Figura 8-1 com valores típicos de estado numérico. As seqüências de 7,0 e 4,0 representam sinais, que se propagam em volta da letra Q e em direção à “cauda”.

Foram necessários quatro anos para que a equipe liderada por Garis se tornasse capaz de projetar e desenvolver uma seleção de regras de atualização para autômatos celulares bidimensionais (e depois tridimensionais), que não apenas se reproduzissem até formar uma mancha semelhante a um cogumelo - como os autômatos celulares auto-reprodutores originais de Langton mas que, espontaneamente, gerassem redes neurais genuínas: “neurônios” interligados; “axônios” que transmitissem um único valor de saída de um neurônio para muitos outros; “dendritos” múltiplos de outros neurônios que trouxessem valores a serem adicionados para formar as entradas para um único neurônio; “funções de transferência” não-lineares em cada neurônio, que gerassem um sinal de saída da soma das entradas e que pudessem estabelecer distinções entre neurônios excitadores e inibitórios. Também precisavam ser capazes de crescer de maneira adequada, o que requeria uma habilidade de voltarem para a direita e para esquerda os axônios e dendritos em desenvolvimento, buscando formar ramificações (“um leque de opções”) e extrusões; e capazes de responder a colisões entre sendas neurais - ou para fazer com que uma ou ambas terminasse[m] em um beco sem saída, ou para formar uma sinapse entre as duas (veja Figura 8-8).

Em uma adaptação muito inteligente das limitações naturais, a equipe liderada por Garis projetou o valor dos sinais de dendritos para diminuir a distância, ao passo que os sinais emitidos por axônios não são afetados por ela. Uma vez que o comprimento de qualquer conexão é um parâmetro sujeito à evolução (não existe um requisito de que dois neurônios sejam ligados pelo caminho mais curto possível), a distância entre uma sinapse axônio/dendrito e a célula receptora serve como um avaliador da força das conexões. As vezes, uma rede cresce com combinações de vários elementos, conforme é mostrado na Figura 8-9a.

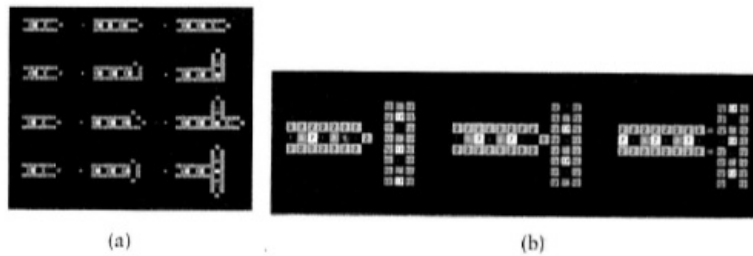


FIGURA 8-8. O autômato celular construído por Garis. (a) De cima para baixo: extensão (de um dendrito); curva para a esquerda; ramificação para a esquerda; ramificação em T. (b) Detalhe da formação de uma sinapse.

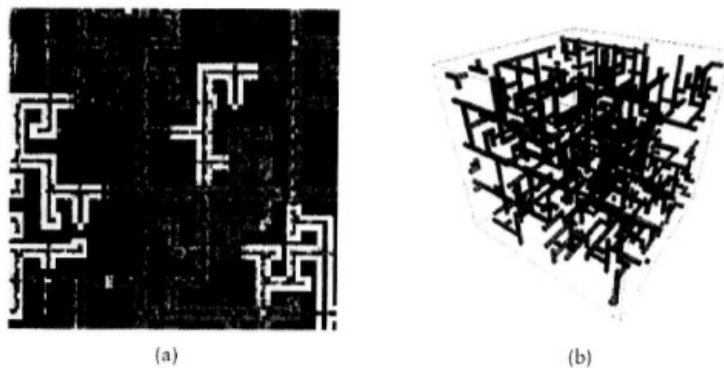


FIGURA 8-9. (a) Combinação de sinapses e conexões de vários comprimentos, formando parte de uma rede neural em crescimento. (b) O autômato celular construído por Garis, formando um módulo tridimensional de rede neural.

A despeito de sua extraordinária complexidade, um cérebro bidimensional é muito prejudicado por se achar limitado a um plano, e Garis logo o abandonou em favor de versões tridimensionais. O problema não é a complexidade bem maior que pode evoluir em três dimensões, mas o fato de que, em um plano bidimensional, *os axônios e dendritos em crescimento não podem cruzar uns pelos outros*, sendo forçados a terminar seu crescimento ou a estabelecer uma sinapse. Desse modo, a topologia tridimensional é qualitativamente diferente daquela que surge em um plano de apenas duas dimensões. (Pesquisas recentes sugerem que o processamento tridimensional é necessário para desenvolver a capacidade de conceptualização e para visualizar rotações em três dimensões.) A versão tridimensional resultou em estruturas semelhantes às da Figura 8-9b.

A vida: conjunto, disputa ou campeonato?

Caso o grupo chefiado por Garis, ou qualquer outro de um número crescente

de equipes de pesquisa que vêm sendo formadas em todo o mundo, obtenha sucesso em desenvolver um cérebro artificial com um trilhão de neurônios, será difícil imaginar que qualquer capacidade humana consiga ultrapassá-lo. Alguns grupos já estão criando produtos comerciais para computar emoções interativas e adaptativas a ser inseridas em bonecas robóticas e estas, por sua vez, requerem um número muito menor de “neurônios”, sem ter a menor necessidade de evolução. Se dois computadores HER jogando Hexapawn podem nos iludir e nos levar a pensar que são humanos, seremos capazes de detectar a diferença entre um cérebro baseado em sílica e dotado de um trilhão de neurônios e nossos próprios cérebros, baseados em carbono com 20 bilhões de neurônios biológicos?

Talvez sejamos capazes de perceber a diferença apenas porque o cérebro de sílica se demonstrará *melhor* do que nós em realizar essas coisas que consideramos como sendo características de uma mente viva. Sem dúvida, se isso vier a ocorrer, parecerá que realmente descobrimos como foi que o cérebro veio à existência e de que modo ele funciona — e, depois de termos encontrado o processo, se ainda formos em frente e fizermos um cérebro melhor, será difícil negar que teremos penetrado no coração da própria vida, descoberto seus segredos e a todos imitado.

Portanto, revendo todo o território que já cobrimos, vamos chegar à seguinte conclusão: o homem é uma máquina. O cérebro se desenvolve e se organiza de forma inteiramente mecânica. Explicar o que somos e o que podemos fazer não requer um apelo a nada além das potencialidades naturais da matéria bruta interagindo localmente. Não existe qualquer intervenção externa, não há necessidade de um superconjunto final de HER, não encontramos intenção, não identificamos nenhum projeto, nenhuma programação de cima para baixo é requerida. Tudo o que nos constitui e conforma nossa existência é apenas aquilo que teria de ser mecanicamente. Não houve pontos de escolha nos processos que nos produziram;

não existem opções nas ações que realizamos: a estrada que não caminhamos é uma estrada impossível de se escolher. Não há nada que nos impeça de gerar formas alternativas de “nós mesmos” - ou de forçar-lhes a evolução, porque não existe nada em nós que nos separe da mecanicidade. Depois de muitos anos, finalmente, teremos vencido o jogo da vida.

Ou será que o teremos perdido?

9. O SER HUMANO É UMA MÁQUINA?

Tudo o que apresentamos até agora pareceria implicar um “sim” como resposta à questão apresentada no título deste capítulo. Uma das principais objeções à visão reducionista do mundo sempre foi a de que a vida, os seres humanos e o quarto cérebro humano, em particular, não teriam a menor possibilidade de ter surgido por um simples acaso. Ao contrário, seu entrelaçamento inteligente da matéria em um grau de ordem tão elevado que chegasse a gerar a inteligência seguramente implicaria a existência de um projetista. “Ninguém poderia tropeçar em um relógio de luxo caído na praia”, afirma o argumento, “e concluir que esse relógio havia montado sozinho a si mesmo pela concatenação casual de acontecimentos descontrolados.” Mas já vimos que dispositivos muito mais inteligentes que relógios podem montar a si mesmos sozinhos e, de fato, o fazem justamente desse modo.

“Mas quem determina as regras?”, você poderia perguntar. As regras do mundo físico são as leis da natureza que governam as interações locais da matéria. Talvez até “alguém” as tenha criado, do mesmo jeito que Garis criou artesanalmente regras que permitiriam à sua criação evoluir em direção à meta desejada da inteligência. Mas, se for assim, o criador das regras já se despediu há muito tempo e deixou sua criação para cuidar de si mesma, por meio de processos suficientes, porque, depois que as regras iniciais foram colocadas em seus devidos lugares, nada do que discutimos até agora requer ou sequer sugere a existência de processos que transcendam um entendimento convencional de interações mecânicas e irracionais. “A célula é uma máquina”, afirmou o biólogo Jacques Monod, vencedor do Prêmio Nobel, “[...] portanto, o homem é uma máquina.”¹ Ao demonstrar que o ser humano é em particular uma máquina *computadora*, a ciência deu um passo enorme e excitante para a frente, sem a menor dúvida, mas, por meio desse passo, tornou também o ponto de vista de Monod ainda mais convincente.

Esses desenvolvimentos podem ser excitantes para a maioria dos cientistas ou para a maioria das pessoas com predisposições científicas, mas também são desconcertantes. Em que ponto de um Universo puramente determinista, composto por nada, exceto máquinas (por mais que algumas estejam densamente encaixadas, umas dentro das outras, como caixas chinesas), pode existir um lugar para a liberdade de escolha? Para o livre-arbítrio? Para o significado? Para

a compaixão? E verdade que podemos muito bem continuar pensando que temos “a liberdade de escolha” para ser gentis e bons e amorosos (ou não), mas em um Universo desses, essa “liberdade” é uma ilusão.

Nós não somos absolutamente “livres” para escolher nada, incluindo nossas crenças sobre esta questão ou a respeito de qualquer outra. Somos simplesmente autômatos celulares deterministas que apresentam uma série de estados sucessivos que não podem ser mais diversos do que são. (Mesmo as flutuações “randômicas” são apenas intrusões mecânicas - não são na verdade aleatórias, apenas estranhas ao fluxo do sistema.) Se alguém lhe apresentar um argumento em contrário, você terá todas as justificativas deste mundo para dizer: “Você simplesmente fala dessa forma porque é incapaz de dizer qualquer coisa diferente”. E seu interlocutor teria também plena justificativa em lhe responder: “Exatamente como você”. No entanto, se vocês vão decidir tomar uma cerveja juntos e esquecer suas diferenças ou rebentar cada um a cabeça do outro é, de maneira semelhante, uma sequência de eventos predeterminados, a respeito dos quais é completamente absurdo pensar em termos de moralidade -, por mais que isso venha a se tornar inevitável.

Devido a essa visão nebulosa da natureza humana, quando a mecânica quântica - o principal foco da Segunda Parte de *O cérebro quântico* - entrou em cena pela primeira vez, houve muitos que intuíram, sem ser capazes de explicar como, ou que, pelo menos, esperaram a confirmação de que o verdadeiro segredo da vida, bem como da natureza humana e do livre-arbítrio, estava de algum modo interligado aos mistérios do *quantum*. As entidades quânticas se comportavam como pequenos seres possuidores de livre vontade, mesmo que fossem inimaginavelmente minúsculos. Com o decorrer do tempo, as especulações a respeito do *quantum* tornaram-se uma verdadeira indústria de produção de tolices, e a maior parte dos cientistas acabou por descartá-las. De fato, a maioria dessas especulações merece ser esquecida, porque elas não passam de analogias que pulam de uma só vez da escala do inimaginavelmente minúsculo para a escala da vida cotidiana. Mas existe, de fato, uma outra abordagem.

Do enrijecimento simulado à têmpera quântica

A otimização, seja em um vidro rotativo, um autômato celular, uma rede neural, seja em um algoritmo genético, envolve o estabelecimento de um sistema de elementos múltiplos em uma “bacia de atração” de alguma “paisagem de energia”, de acordo com o princípio manifestado em todos os níveis, desde o

molecular até o social, de que elementos interagindo em nível local espontaneamente geram uma ordem global e uma inteligência sistêmica.

Assim, imagine dois sistemas como esses, perfeitamente idênticos entre si e, portanto, apresentando paisagens de energia idênticas. Vamos aplicar um processo de “enrijecimento” idêntico a ambos (aquele regime de calor e frio alternados), começando a partir do mesmo estado inicial. Vamos imaginar que a “casualidade” (o calor, elemento estranho que provoca as sacudidelas) também seja exatamente a mesma para os dois sistemas. (Por exemplo, podemos gerar uma tabela de números pseudo-aleatórios em nosso computador. Usamos esta sequência para determinar a função de probabilidade para a saída de cada neurônio de ambas as redes. As duas redes, assim, seguem exatamente a mesma trajetória de estados intermediários até atingirem um estado final idêntico.) Rodamos nossa simulação uma vez nos dois sistemas, buscando confirmar o que descrevemos anteriormente. Os resultados são precisamente os esperados; sendo idênticos, sistemas totalmente mecânicos, ambos seguirão a mesma sequência de estados.

A seguir, faremos de novo a mesma coisa, mas acrescentaremos um truque. De algum modo (os detalhes não importam no momento), nós *“cavamos túneis” em uma das paisagens de outro modo idênticas*, ligando algumas “armadilhas” de níveis mais elevados de energia em bacias de energia mais baixa. Quando rodarmos as simulações nos dois sistemas, os resultados ainda serão os mesmos?

E claro que não. De vez em quando, uma das duas bolas rolantes pode tropeçar em uma passagem secreta para um nível de energia inferior. Em longo prazo, em uma paisagem que seja complexa o bastante, isso irá resultar em dois tipos de diferenças: a bola que trapaceou, enfiando-se oportunisticamente por meio de túneis, pode muito bem ter atingido soluções que, em seu conjunto, sejam melhores (estados de energia inferior) do que aquelas encontradas pela bola que jogou de acordo com as regras. Mesmo que as duas bolas acabem por encontrar o mesmo estado de energia mínima por meio de sua passagem por túneis, a primeira bola, provavelmente, vai atingir esse estado em primeiro lugar.

Vamos acrescentar mais uma manobra, a respeito da qual você deve pensar com cautela. Pode não fazer sentido, mas, por enquanto, aceite essa demonstração apenas por seu valor facial. Vamos supor que, enquanto o processo de enrijecimento (a convergência de nossa rede neural/autômato celular/sistema rotativo para um mínimo de energia) seja inteiramente determinista, os túneis aparecem, desaparecem e reaparecem em outras partes de uma forma *quase inteira e, todavia, absolutamente aleatória*. Com esta afirmação quero dizer: cada aparecimento de um túnel, onde começa e onde

termina, e a extensão de tempo em que permanece aberto é *absoluta e inteiramente “randômica”* não existe nada no universo físico - nem em grande escala por fora dos componentes que formam nossa experiência, nem em pequena escala dentro de seu funcionamento interior -, que seja a causa do aparecimento e desaparecimento desses túneis. Todavia, quando um número suficientemente grande de aparecimentos, desaparecimentos e reaparecimentos de túneis é analisado, torna-se evidente que, em média, eles se enquadram em algum tipo de padrão.

Podemos, desse modo, pintar um retrato *probabilístico* de como os túneis favorecem o processo de enrijecimento, por meio das trapaças que permitem ser feitas. A partir dessa consideração, os túneis agem sobre o sistema de maneira parecida com a ação do calor - ao introduzirem neles uma espécie de “movimento” aleatório que facilita o acomodamento do sistema em uma solução.

No entanto, seríamos forçados a concluir (devido à nossa premissa de absoluta aleatoriedade no aparecimento de qualquer túnel individual, mesmo que esses acabem por formar padrões típicos), *que o nosso sistema, considerado em seu conjunto, não é mais determinista*. Os estados finais em que se acomoda e a maneira como chega a eles ainda se conformam, em média, a seu sistema gêmeo completamente determinista, mas o resultado real de qualquer rodada não é mais previsível. Ele realizará coisas não antecipadas, no sentido profundo de que não apresentam *qualquer causa física*. Além do mais, irá obter resultados mais depressa do que poderia conseguir qualquer versão determinista de si próprio.

E claro que tudo isso baseia-se em uma suposição absurda. Como podem existir coisas semelhantes a túneis que aparecem e desaparecem magicamente, sem a menor causa física? Isso significaria que um sistema físico em um estado poderia simplesmente “estalar os dedos” à vontade e aparecer em outro estado completamente diferente, sem percorrer qualquer trajetória no universo físico que conhecemos. E precisamente uma noção tão fantasiosa quanto a ideia de que um grupo de automóveis estacionados em um vale sem saída, nos Alpes italianos, pudesse desaparecer subitamente e reaparecer em algum lugar da Suíça. Observe, também, que nesta analogia o termo “túnel” não é exatamente correto. Com o intuito de passar por um túnel, é necessário *viajar* dentro dele, metro a metro. Mas aquilo de que falamos aqui é muito mais semelhante a um teletransporte: os pontos intervenientes jamais são ocupados pelo objeto que sumiu e reapareceu.

Acontece que tudo o que acabei de descrever faz parte da mecânica quântica. Se a rede de que estamos falando é, de fato, uma rede de rotações eletrônicas em

uma treliça de átomos, por exemplo, então esses “túneis” *realmente* existem entre partes de outro modo inacessíveis de uma paisagem de energia (veja Figura 9-1). O significado preciso - em toda a sua estranheza realmente inacreditável - é o assunto da próxima seção deste livro. Por agora, vamos dar uma rápida olhada um pouco à frente, devido à sua imediata aplicação ao tema que vimos expondo até aqui.

Em abril de 1999, foram publicados dois artigos sobre enrijecimento [*annealing*] quântico. Um utilizava técnicas de simulação para quantificar o que acabei de descrever em termos gerais, ou seja, que, se for permitido o teletransporte em um sistema, sua função computacional é melhorada em muito. Os pesquisadores Wolfgang Wenzel e Kay Hamacher, do Instituto de Física da Universidade de Dortmund, na Alemanha, descobriram que, em um problema do tipo do representante comercial, o enrijecimento quântico encontrou uma solução 35% melhor, e essa foi achada dez vezes mais depressa do que por meio do enrijecimento clássico. Aplicado a um modelo de vidro rotativo real, composto por elétrons, o enrijecimento quântico demonstrou ser quase 100% mais eficiente. Finalmente, aplicaram a mesma técnica em uma cadeia de rotações, “um dos mais difíceis problemas de minimização discreta conhecidos”. As técnicas não-quânticas mais sofisticadas e complexas foram incapazes de chegar a soluções com menos de 20% de erro, não importando o tempo empregado em sua execução. O enrijecimento quântico rapidamente alcançou menos de 1% de erro.²

O segundo artigo, “Quantum annealing of a disordered magnet”, examinou $\sim 10^{23}$ rotações em um vidro rotativo encontrado em uma liga de terras raras (a série dos lantanídeos). Os autores explicaram que, em contraste com o enrijecimento simulado tradicional, “o tunelamento quântico fornece um mecanismo diferente para o movimento entre estados, [...] isto é, o enrijecimento quântico apressa a convergência para o estado ótimo”.³

O protocolo quântico causou relaxamento das rotações para um estado constante de três a 30 vezes mais rápido do que quando nenhum teletransporte de estados ocorreu. (O teletransporte foi induzido pela aplicação de um campo magnético.) Mais ainda, os pesquisadores estimaram que o estado final foi quase o do mínimo energético absoluto, ou, então, extremamente próximo dele. Mas, ainda mais importante, o estado do material magnético foi alterado - conservou uma memória, por assim dizer, de sua história “impossível”.

Em outras palavras, a presença de eventos quânticos ultramicroscópicos ocorrendo localmente entre cerca de 10^{23} elementos individuais gerou uma diferença *global* persistente em sua organização geral. Esta diferença não foi trivial ou temporária: afetou uma característica importante do material em escala

perceptível para nosso próprio nível, e essa diferença, obtida via meios aparentemente impossíveis, persistiu durante escalas temporais muito mais longas do que os próprios eventos ocorridos em nível quântico.

Vamos, portanto, especular um pouquinho e dar um salto à frente: e se os FPGAs que Hugo de Garis introduziu em seu cérebro artificial pudessem ser construídos em placas de circuitos eletrônicos que buscassem mínimos de energia não apenas por meio dos processos de otimização, por si já espantosos, porém inteiramente mecânicos como discutimos acima, mas via seus análogos quânticos? Sem dúvida, haveria um aumento dramático em sua taxa de evolução e também em seu puro poder de resolver problemas.

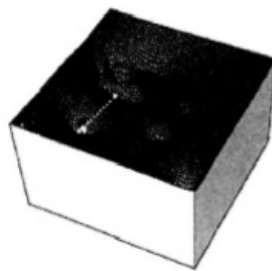


FIGURA 9-1. Acesso direto a estados de baixa energia via tunelamento por mecânica quântica.

Mas esses arranjos, enquanto evoluíssem, não teriam probabilidades de tirar vantagens inesperadas dos estados quânticos exclusivos que lhes haviam sido disponibilizados - do mesmo modo que o FPGA de Adrian Thompson encontrou maneiras (que até hoje ele não consegue explicar) de empregar portões que nunca foram sequer conectados por qualquer tipo de fiação? Será que eles também não seriam de algum modo “diferentes”?

Poderíamos, inclusive, imaginar: esses resultados plausíveis não produziriam computadores capazes de exceder as capacidades do cérebro humano, não apenas quantitativamente, mas em sua própria essência? Se, como a maioria dos neuro-cientistas da atualidade insiste, o cérebro humano é uma máquina extraordinariamente complexa, mas, ainda assim, totalmente determinista, então cérebros para computadores que incorporassem as vantagens quânticas, sem dúvida, teriam uma capacidade fundamental - que quase poderia ser classificada como mágica - de que nós, seres humanos, não dispomos.

Talvez não. Talvez, ao contrário, possa até ser o caso de que essas coisas, que estamos começando a divisar a distância nos sistemas artificiais, nos demonstrem a maneira de descobrir processos muito semelhantes dentro de nós mesmos - do mesmo modo que o desenvolvimento das redes neurais lançou a primeira luz clara sobre a maneira como nossos próprios neurônios funcionam.

Seria uma delicada justiça poética que nossa construção de máquinas pensantes - que demonstram não ser absolutamente máquinas - nos permitissem, pela primeira vez em 400 anos, observar de uma perspectiva científica que nós tampouco somos máquinas. Para ver como isso pode realmente ser, vamos nos voltar agora para os *mistérios* do mundo quântico e suas intersecções inesperadas com o cérebro humano.

Segunda Parte

MILAGRES

10. A SOLUÇÃO INSOLÚVEL

Milagres são difíceis de aceitar. Ao abandonarmos nossa concepção de causa e efeito [...] nossas ideias básicas sobre a natureza são ameaçadas [...] e a física pura empurrada para o domínio da metafísica. Mas a maioria dos físicos jovens aceitou esse desafio e esforçou-se para acompanhar a mecânica quântica, enquanto ia crescendo.

— Eugene P. Wigner, vencedor do Prêmio Nobel em Física de 1963.

Bruxelas, outubro de 1930

“Uma luta de titãs para decifrar os últimos enigmas do Universo”, foi a descrição de um escritor. Durante anos, Albert Einstein tinha combatido o posicionamento emergente de Niels Bohr sobre a mecânica quântica. Bohr havia inicialmente triunfado, mas Einstein resistiu e, por fim, parecia ter vencido. Porém, nessa noite, em um corisco de genialidade, Bohr pareceu ter virado a mesa e voltado o jogo em seu próprio favor.

Era impossível. Somente uma criança poderia realmente amar as alegações da mecânica quântica de que Bohr era o campeão: que partículas físicas carecessem de posições e velocidades fixas (mais precisamente, *momento*, o produto da massa de um objeto por sua velocidade) - que até o ponto em que se conhecesse uma delas, ou a massa ou a velocidade, a outra se tornava vaga -, não apenas que o conhecimento dessas partículas fosse vago; que átomos inteiros pudessem ter um lugar tanto no tempo como no espaço como objetos sólidos e, ao mesmo tempo, se espalhassem infinitamente, como as ondulações concêntricas das ondas por meio do tecido de algum meio não-detectável; que o Universo estivesse cheio de eventos que não possuíssem absolutamente qualquer causa. Todavia, estas eram, sem dúvida, suas afirmações principais e, até o presente, nem uma experiência sequer havia produzido resultados que pudessem de algum modo contrariar essas propostas; e havia outras experiências, de imensa importância, cujos resultados não poderiam ser explicados de nenhuma outra forma. Os mistérios da degradação radioativa, do efeito fotoelétrico, da razão por que certos corpos quentes mostravam-se negros, todas estas três últimas pontas soltas da física clássica cediam às explicações da teoria quântica.

Essa não era uma simples batalha em torno de alguma formulação abstrata de

caráter matemático ou filosófico, como poderia parecer para os leigos, nem uma mera questão de tecnologia. Einstein era explícito: os esforços totais da ciência dependiam de seu resultado, do mesmo modo que o triunfo da ciência sobre a superstição, a religião e a magia. Se Niels Bohr estivesse correto, a própria realidade deixaria de fazer sentido: Einstein percebeu que, no final, a teoria quântica requeria que o Universo inteiro, não importava quão remotas suas partes estivessem umas das outras, estivesse entretido em uma unidade inconsútil e, de algum modo, orquestrado em concerto; que os eventos transcorridos em toda parte estivessem sendo coordenados fora das injunções da causalidade, por alguma “influência” inimaginável - Deus jogando dados. Percebendo que este segredo se escondia no coração de cada *quantum*, Einstein estava seguro, além de qualquer dúvida, de que a teoria tinha de apresentar alguma falha fundamental, por mais sedutoramente acurada que aparecesse nos testes realizados até então. Era apenas uma questão de tempo até que a falha fosse descoberta.

Entre a elite da física, predominava uma pura meritocracia. Os encontros de Solvay, patrocinados em intervalos de alguns anos por um industrial e físico amador belga extraordinariamente rico, se haviam transformado *de facto* em um torneio real dos físicos combates de juntas mentais e tudo o que acompanhava os antigos torneios. Dois anos antes, em 1928, na reunião anterior em Solvay, os argumentos de Bohr tinham sido brilhantes e Einstein, que raramente aceitava ficar em segundo lugar, tinha sido solidamente derrotado. Paul Ehrenfest, amigo dos dois homens e um contribuinte importante para a física de pleno direito, descreveria mais tarde o clímax dessa conferência inicial:

O encontro [de] Bruxelas-Solvay foi ótimo! [...] Bohr [...] a princípio não foi entendido [...] mas então [...] derrotou todo mundo. [...] Foi como um jogo de xadrez: Einstein aparecia o tempo todo com novos exemplos. [...] Bohr constantemente remexia em suas nuvens de fumaça filosóficas e encontrava os instrumentos necessários para esmagar um exemplo atrás do outro, enquanto Einstein, como um polichinelo saindo de uma caixa de surpresas, saltava com novas ideias, completamente renovado a cada manhã. Ora, foi simplesmente inestimável!

Mas sou quase completamente sem reservas pró-Bohr e contra Einstein. A sua atitude em relação a Bohr é exatamente igual à antiga atitude (dos oponentes da relatividade) contra ele...¹

Einstein tinha-se retirado do campo de batalha, mas seguro de que, mesmo assim, estava correto, enquanto a mecânica quântica laborava em erro. Mais

tarde, escreveu a Erwin Schrödinger - um dos maiores estudiosos da teoria quântica primitiva: “Essa filosofia tranquilizadora - ou é uma religião? — de HeisenbergBohr foi cozinhada de uma forma tão ardilosa que, pelo menos no presente, oferece a seus crentes um travesseiro macio do qual não vai ser fácil espantá-los. Vamos, portanto, deixar que descansem a cabeça nele... Essa religião significa muito pouco para mim”.²

Por maior que fosse seu desagrado pela mecânica quântica, Einstein tentou permanecer pessoalmente desapaixonado. Naquele mesmo ano, indicou tanto Schrödinger como Heisenberg - o principal aliado de Bohr - para o Prêmio Nobel. Mas acrescentou na carta de indicação que “ainda é problemático o quanto dessas teorias grandiosamente concebidas destes dois cientistas supracitados chegará a sobreviver”.³

Para esta sexta conferência de Solvay, Einstein tinha se preparado com uma refutação definitiva de toda a empresa quântica. E, duas noites antes, com as maiores mentes do mundo reunidas em volta dele e de Bohr, havia triunfado.

Einstein tinha passado o ano anterior desenvolvendo uma “experiência teórica” de extrema sutileza, cuja concepção parecia revelar uma contradição necessária no coração da teoria quântica. Foi um movimento de fulgurante beleza e simplicidade - sem dúvida, em uma classe jamais sonhada antes —, a tal ponto que o resultado do restante da partida e desse campeonato pareceram decididos em um único lance. Em uma sentença, Einstein demonstrou que a notória “incerteza” quântica entre o tempo e a energia - uma contraparte necessária da incerteza entre posição e momento - poderia ser evitada pesando-se um objeto no interior de uma caixa que perdeu um fóton de luz, no momento em que um marcador de tempo abriu brevemente um obturador. O marcador de tempo nos diz *quando* o fóton foi largado; a pesagem da caixa nos revela *quanta energia* o fóton tem - com base no famoso relacionamento entre energia e massa expressado pela equação $E = mc^2$, o pináculo da Teoria Especial da Relatividade, de Einstein. Bohr, um dinamarquês genial e inabalável, empalideceu quando Einstein apresentou seu golpe de mestre pela primeira vez. Segundo escreveu o espectador Leon Rosenfeld:

Para Bohr, esse foi um golpe muito forte. Ele [...] ficou caminhando de uma pessoa para outra no salão, tentando persuadir a todos de que aquilo não poderia ser verdade, porque, se Einstein estivesse correto, significaria o fim da física. Mas não conseguiu pensar em qualquer refutação.

Eu jamais me esquecerei dos dois oponentes saindo do clube universitário. Einstein, uma figura majestosa, caminhando calmamente com um leve sorriso de ironia nos lábios, enquanto Bohr parecia cambalear a seu lado,

extremamente perturbado.⁴

O grande físico dinamarquês passou a noite acordado, buscando uma brecha na lógica cristalina de Einstein.

Um pouco antes da aurora, descobriu. Mais tarde, nessa mesma manhã, Bohr mostrou sua descoberta a Einstein. De uma forma espantosa, Einstein tinha negligenciado levar em consideração os efeitos peculiares da gravidade requeridos por sua própria Teoria da Relatividade *Geral* \ uma teoria de escopo maior que sua Relatividade Especial. A Relatividade Geral demonstrou que o próprio tempo se torna mais lento dentro de um campo gravitacional. Quando o fóton sai da caixa, a massa da caixa-mais-fóton-mais-marcador de tempo torna-se menor, o campo gravitacional mais próximo se enfraquece e, desse modo, a passagem do tempo nas vizinhanças da caixa se apressa. Usando a própria equação da Relatividade Geral, Bohr demonstrou que a mudança de massa causada pela perda de um único fóton é correspondida por uma modificação na escala do tempo, assim como o produto da incerteza do tempo pela incerteza da energia é exatamente igual àquele mínimo de incerteza predito pela teoria quântica. Caso se insistisse que a medida temporal fosse absolutamente perfeita, então a sua medida do peso (energia) se tornaria absolutamente incerta - em uma abrangência “mais ou menos infinita” - e vice-versa.

Foi uma ironia terrível. Se Einstein estivesse certo em sua demonstração a respeito da mecânica quântica, estaria completamente errado a respeito de uma teoria cuja conclusão, conforme ele mesmo descrevera, fora “a maior satisfação de minha vida”, justamente aquela que tinha levado seus colegas a saudá-lo como “o novo Copérnico”. O choque foi inimaginável. A manhã seguinte não conseguiu produzir uma nova reversão da fortuna; nem qualquer outra manhã de Solvay desse dia em diante.

Como sempre, Einstein aceitou sua derrota com elegância. Escreveu uma segunda vez à Comissão Nobel, descrevendo agora Schrödinger e Heisenberg como “os dois homens que, acima de quaisquer outras pessoas, mereciam receber o Prêmio Nobel de Física”. E suas reservas foram ainda mais contidas: “Estou convencido de que esta teoria, sem dúvida, contém alguma peça da verdade definitiva”.⁵ Todavia, por maior que fosse a sua elegância ao retirar-se do campo de batalha em Solvay, jamais havia se rendido.

Cinco anos depois, em 1935, Einstein e dois colegas, Boris Podolsky e Nathan Rosen, publicaram um pequeno artigo, mas extremamente brilhante - que vem sendo, desde então, chamado de o “Experimento EPR”, de acordo com suas iniciais -, em que asseveravam que a mecânica quântica era verdadeira, até o ponto em que havia chegado, porém ainda *incompleta*. Era apenas uma “peça”

da verdade. O retrato de um mundo em que a causalidade não mais dominasse não era um verdadeiro princípio, mas deveria ser um artefato de nossa ignorância de causas elusivas e muito sutis. A absoluta verdade da causalidade - que *nada* jamais ocorre sem causas materiais inteiramente suficientes que possam produzir apenas um resultado - é uma visão da realidade sobre a qual toda a ciência se acha embasada e, uma vez que essa noção atravessou a mente de Einstein - quando era apenas um menino em seu leito de doente - Jamais o abandonou. “Eu experimentei um senso de maravilha [...] quando era uma criança de 4 ou 5 anos, no momento em que meu pai me mostrou uma bússola. O fato de o ponteiro se comportar de uma forma tão definida. [...] Eu recordo até hoje [...] a profunda e duradoura impressão que esta experiência causou em mim. Tinha de haver alguma coisa por trás dos objetos, alguma coisa que permanecia escondida.”⁶

Essa recordação expressa uma visão do mundo que ele jamais abandonaria, pois já era precursora de sua maior contribuição: a Teoria da Relatividade. Isso porque, embora não seja amplamente conhecida daqueles que não estudaram física, a Teoria Especial da Relatividade é uma explicação espantosamente profunda e acurada de como funciona o magnetismo. Aquilo que é elétrico para um observador em movimento parecerá magnético para um observador parado. A partir dessa constatação, demonstrou Einstein, deve seguir-se tudo quanto conhecemos como “relatividade” - os objetos que encolhem, as dilatações do tempo e as bombas atômicas.

O artigo EPR é um daqueles mais elegantemente raciocinados de toda a história intelectual.⁷ Demonstrou que, se a mecânica quântica *fosse* completa - significando que seus efeitos não eram produzidos por causas não-detectadas, mas por simplesmente nenhuma causa -, então a própria condição física (a “realidade”, segundo Einstein a denominou) de, digamos, dois ou mais eventos (ou coisas) separados era contingente à nossa medida delas e ao nosso conhecimento de, pelo menos, uma delas; e o que era ainda mais absurdo, sob determinadas circunstâncias que Einstein e seus colegas especificaram em detalhes, à sua própria realidade física poderia ser demonstrada como contingente à nossa *intenção* de realizar essa medição! E isso ocorreria mesmo que o segundo objeto estivesse tão distante do primeiro que ainda não havia sido medido, de tal modo que a mensuração deste primeiro objeto *aqui* não poderia ter qualquer efeito, por menor que fosse, sobre o que estava *lá*. O segundo item poderia estar na Galáxia de Andrômeda, e esta “influência” instantânea e impossível ainda seria exercida. Mais ainda, essa influência poderia até mesmo voltar para trás no tempo. Apenas místicos e loucos poderiam adotar noções tão

absurdas.

A matemática, por trás dos argumentos de Einstein, era impecável: ou a teoria quântica era fundamentalmente incompleta ou a realidade era estranha e contraditória além da imaginação - se uma influência temporal inversa pudesse existir, suas características iriam até depender das intenções de algum observador para com ela. Segundo a formulação árida de Einstein: “Não se poderia esperar que nenhuma definição racional da realidade permitisse isso”.⁸

Einstein enviou a Bohr uma cópia do artigo antes de sua publicação. Bohr sentiu-se arrasado. Seu colega Leon Rosenfeld descreveu a maneira como reagiram:

Este assalto caiu sobre nós como se um relâmpago surgisse de um céu azul e sem nuvens. [...] Tudo o mais foi abandonado: tínhamos de resolver imediatamente este desentendimento. Deveríamos replicar, tomando o mesmo exemplo e demonstrando qual era a maneira correta de falar sobre ele. Sob o domínio de uma grande excitação, Bohr imediatamente começou a me ditar o esboço de tal réplica. Logo a seguir, todavia, ele passou a hesitar. “Não, assim não vai dar, temos de tentar de um jeito diferente. [...] Temos de deixar tudo muito claro”.

E assim continuou durante algum tempo, nosso espanto crescendo ante a sutileza da argumentação. [...] Claramente, nós estávamos muito mais longe do alvo do que havíamos pensado a princípio. Finalmente, ele interrompeu a discussão com sua observação familiar de que “ele precisava dormir com a ideia”.⁹

No entanto, testes empíricos do argumento EPR estavam além do alcance tecnológico da época. Como resultado, “durante décadas, artigo após artigo foi escrito para tentar resolver o paradoxo apresentado pelo EPR, porém foram necessários 30 anos para que qualquer progresso viesse a ser efetivamente realizado com referência a esse assunto.”¹⁰

Assertivas extraordinárias requerem evidências extraordinárias, e as proposições da teoria quântica eram extraordinárias, além de qualquer possibilidade da imaginação. Na ausência de evidências definitivas em favor ou contra, o argumento de Einstein contra as estranhezas quânticas foi convincente para muitos. Mas, para outros, não o foi. Quem sabe se a realidade não é realmente uma coisa estranha?

A nova substância primordial: não mais a matéria, porém a informação

Enquanto isso, outros cientistas estavam provocando seus próprios e rápidos desenvolvimentos, sem a menor relação com os espantosos eventos que transcorriam no campo da física. Em parte, isso se devia ao fato de que a fundamentação matemática da nova física era tão complexa e esotérica que poucas pessoas que não fossem físicos ou matemáticos conseguiam entendê-la. Entretanto, a maior parte das ciências não tem a menor necessidade de se relacionar com o mundo subatômico - o que a “incerteza” dos elétrons tem a ver com, digamos, a sociologia? As outras ciências estavam experimentando um triunfo após o outro, não pelo *abandono* de uma crença mantida no determinismo mecânico, mas, ao contrário, pela primeira vez começando a *abraçar essa crença*. Ironicamente, os cientistas de outros campos demonstravam, por meio dessa atitude, como se finalmente estivessem emulando a física - considerada o ouro de todas as investigações científicas.

Jacques Monod falou acertadamente em nome de todos os cientistas quando apresentou sua proposição de que “o homem é uma máquina”. Mas Monod não sabia ou (mais provavelmente) afastou como irrelevante para os sistemas biológicos o fato de que a física estava caminhando para um território muito confuso. A própria física estava agora dizendo que, longe de ser redutível a “simples interações mecânicas”, *até mesmo a matéria* - a própria fundamentação do ponto de vista mecanicista - parecia menos uma máquina e “mais um pensamento”.

Essa noção era dura de engolir, mas “Vá se acostumando com a ideia”, tornou-se o lema de trabalho dos físicos, “e deixe que os filósofos cocem as cabeças!...” Mesmo que o “estofado” tangível que se acreditava formar o mundo natural estivesse se desvanecendo bem devagar em irreabilidade - transformando-se em pura “informação” -, o progresso tangível era rápido. E daí? Se, por exemplo, os transistores não podiam ser racionalmente explicados, isso não fazia grande diferença, já que funcionavam bem.

Em resposta à teoria quântica, surgiram três campos distintos dentro das ciências. Os primeiros entre os pares eram os criadores da própria mecânica quântica, juntamente com outros que eram capazes de levar mais além a teoria quântica - ou disputar contra ela - dentro de uma base rigorosamente matemática. Em particular, discutiam suas implicações filosóficas, mas somente em raras ocasiões permitiam que suas elucubrações sobre “o que significa tudo isso” fossem registradas em forma impressa. Alguns sentiam-se tranquilamente místicos, alguns imaginavam se, na mecânica quântica, poderiam ser encontrados os segredos da vida, da vontade, da consciência, até mesmo de Deus. A maioria, entretanto, acreditava que, no final das contas, o determinismo mecânico estava destinado a vencer e venceria de algum modo. Todos

concordavam que a questão seria resolvida não pela filosofia, mas sim pela matemática e pela experimentação.

O segundo campo consistia, em grande parte, de um segundo escalão de cientistas, filósofos e poetas que viam na teoria quântica uma abertura para um mundo de misticismo que vinham esperando há muito tempo e que faziam tudo quanto se achava a seu alcance para alargar essa vertente - que, diga-se de passagem, Einstein também via, mas queria demonstrar como sendo ilusória. Aliando-se a alguns dos físicos de primeiro escalão - entre eles Heisenberg e Wolfgang Pauli (amigo íntimo do psiquiatra místico Cari G. Jung) -, começaram um processo de especulações filosóficas abertas que irritou a maioria dos físicos mais sérios. Os especuladores mais descontrolados começaram a misturar a física com o misticismo (em geral) oriental, sem a menor reserva, mas raramente eram capazes de expressar suas ideias em termos matemáticos; e também não eram capazes de conceber testes que as pudessem comprovar ou demonstrar erradas. Mas intuía, adivinhavam e faziam analogias de grande amplitude, algumas vezes completamente sem base, outras de forma presciente, em uma tentativa de expor com clareza as implicações antimecânicas em larga escala contidas na mecânica quântica.

Era frequente que essas implicações apresentassem um viés comprometido. A autora Dana Zohar, por exemplo, acabou por encontrar na mecânica quântica a fundamentação para uma “nova moralidade”, em que o adultério não é uma virtude menor do que a fidelidade. “Uma ‘moralidade quântica em evolução [...] é necessariamente [...] pluralística”, escreveu ela. “Nossas escolhas morais livres e indeterminadas [...] são semelhantes às transições virtuais de um elétron.”¹¹

O terceiro, e maior dos campos, era formado pelo corpo de cientistas competentes de todas as tendências, mas sem treinamento em mecânica quântica, quase sempre também sem o menor interesse nela. Seu ponto de vista se embasava no bom senso e funcionava perfeitamente. “Quaisquer mistérios' que possam ser encontrados ou não dentro do domínio da física quântica”, afirmavam eles, “não nos interessam em nada. No momento em que se começam a estudar fenômenos que requerem trilhões de eventos subatômicos, como se faz ao estudar química, biologia ou medicina, todos os mistérios se reduzem a um termo médio e o que sobra é puro mecanicismo. Esse é um fato que jamais foi controvertido. O mundo que estudamos - incluindo nossas próprias vidas cotidianas - não se comportará de forma nem um pouco diferente, nem será menos mecanicamente determinista, quer a teoria quântica esteja certa ou errada, e não fará a menor diferença aquilo que ela ‘signifique’. Por essa razão, vamos continuar a tratar tudo como se fossem máquinas, incluindo as células e o ser humano e seu cérebro porque, quando agimos dessa maneira, damos enormes

passos em nossa compreensão e capacidade de previsão, sem qualquer dificuldade, mas, se não o fazemos, logo começamos a tropeçar. *Toda a medicina* moderna, por exemplo, depende do ponto de vista mecanicista que adotamos; praticamente *nada* na medicina moderna - praticamente nenhum avanço - jamais requereu que abandonássemos esse pensamento. A teoria quântica é simplesmente irrelevante para qualquer pessoa que não seja um físico, um químico teórico ou um filósofo da Nova Era - mas são apenas os dois primeiros grupos que a entendem até certo ponto. Em resumo, a hipótese reducionista pode ser ainda um tópico para controvérsia entre os filósofos, mas pela maioria dos cientistas ativos, segundo penso, ela é aceita sem questionar.”¹²

Por exemplo, a “incerteza” quântica, no que se refere à posição de um átomo típico, que faz parte de uma célula típica, pode se encontrar na ordem de 10^{-8} centímetros (200 milionésimos de uma polegada). A menor organela dentro dessa célula poderá ter um diâmetro de 10^{-5} centímetros (200 milésimos de uma polegada). A incerteza quântica desse átomo, em outras palavras (e de quaisquer outros átomos constituintes dessa célula), corresponderá, no máximo, a um milésimo do tamanho da organela. Pense nela, se quiser, como sendo uma “vibração”, como a agitação causada pelo calor, só que muito menor. E difícil imaginar como uma vibração adicional tão pequena poderia causar qualquer efeito significativo sobre os processos vitais, em especial quando tudo já está vibrando de maneira descoordenada.

A incerteza quântica é como o movimento browniano (aleatório) das moléculas do ar dentro de uma sala. Uma vez que esse movimento é “randômico”, sempre existe a chance de que todas as moléculas acabem por se amontoar no canto superior esquerdo, todas ao mesmo tempo, enquanto sufocamos. Mas é uma certeza estatística que uma coisa como essa jamais irá ocorrer. A incerteza quântica - se realmente existe - pode permitir uma “liberdade” filosófica, mas depender dela para uma explicação da liberdade em escala de nossas experiências diárias representa, de fato, um argumento em favor do determinismo. Quando todos os incontáveis trilhões de “liberdades” individuais são adicionados e, depois, tiradas as médias, a proporção de liberdade deixada a alguma coisa grande - como um ser humano ou, mesmo, apenas seu cérebro - é expressa por uma fração tão minúscula que seria completamente impossível detectá-la. Se esse determinismo suportado estatisticamente é diferente de um determinismo mecânico - ou se você deveria adotar algum tipo de misticismo em função dele —, é um debate que podemos deixar, com toda a segurança, para os filósofos e os poetas.

Entretanto, durante os últimos dez anos, um debate renovado em torno de reducionismo e do determinismo mostra claros sinais de conquistar seu espaço

público. Uma cascata de avanços emergiu da física, da neurociência e dos estudos de computação, demonstrando que a operação real do cérebro é muito diferente do que vinha sendo pensado.

Em primeiro lugar, como já discutimos na Primeira Parte deste livro, o cérebro humano vem-se demonstrando como possuidor do aspecto de um computador capaz de auto-organização, que ensina a si mesmo e aprende por meio da experiência, coisa que antigamente era tida por impossível. De muitas maneiras, essas descobertas apenas reforçam a ideia de que tudo o que o cérebro faz pode ser explicado via mecanicismo. Mas demonstrou-se que conjuntos auto-organizadores de todos os tipos apresentam uma tendência *para o caos*. (Mais precisamente, esses sistemas demonstram a chamada *dinâmica não-linear*, da qual o caos é uma forma particular.) Estritamente (isto é, matematicamente) falando, o caos *não significa* “desordem”; aqui, o termo mais adequado seria “caos determinista”. O caos, nesse sentido, significa uma sequência (digamos, de números) que é determinada mecanicamente por alguma regra fixa, e, se você não souber qual é esta regra, não conseguirá descobri-la apenas olhando para os algarismos. Além disso, não há dois números em uma sequência caótica que sejam *jámais idênticos*, ainda que a sequência possa retornar, a intervalos aproximadamente ordenados, para números próximos a esses. Por essas razões, uma sequência caótica parece sempre aleatória, mas não é - ela é, na verdade, 100% mecânica.

As popularizações da teoria do caos quase sempre alegam que uma sequência caótica é, de algum modo, “livre”, e que a presença do caos na fisiologia humana prova a existência do livre-arbítrio. Isso é incorreto. O caos apenas estabelece um limite à nossa capacidade de deduzir regras - portanto, causas mecânicas - em retrospecto. Não faz com que essas regras desapareçam de modo algum. Sem dúvida, o caos surge devido à presença dessas regras.

O comportamento caótico pode surgir apenas em sistemas cujo estado, a qualquer momento do tempo, por exemplo, seja alguma função de seu estado anterior, ainda que isso não ocorra em todos os sistemas semelhantes. Esses sistemas são “iterativos”, no sentido de que cada ciclo de correção de erros de propagação retroativa é iterativo, como são repetitivos todos os ciclos de atualização em um autômato celular. O exemplo mais conhecido de um sistema iterativo é o “retorno composto” de sua conta bancária. Embora a taxa de juros seja constante, a quantidade de dinheiro adicional que você ganha a cada ciclo se modifica em função de quanto dinheiro você já acumulou. O crescimento de sua poupança - presumindo que você permita que ela cresça - é *não-linear*; ou seja, não ocorre em linha reta, porque a base sobre a qual o juro é calculado muda em

consequência do juro acrescido durante a atualização anterior. O crescimento não é linear, mas também é “monotônico” isto é, sempre sobe, nunca declina e tampouco apresenta ciclos ou saltos. Esse tipo de não-linearidade não é e não pode ser caótico.

Porém, há muitos sistemas não-lineares iterativos que realmente ilustram o caos. Eis um exemplo simples: considere a sequência de números gerada pela equação $y = 3(x - x^2)$, enquanto permitimos a x tomar diversos valores, um após o outro, começando com 0: 3, 0, -9, -24,..., e assim por diante. Esses valores (que aprendemos a colocar em gráficos nas aulas de álgebra) se distribuem em uma parábola. Se incluirmos cada valor de x entre 0 e 1 e entre 1 e 2 e [...], os valores de y formarão uma curva sem interrupções. Mas vamos trocar o “3” por “3,6” e tornar a equação iterativa - em outras palavras, empregar em cada etapa como x o valor de y gerado pelo valor *anterior* de x . Vamos “semear” a equação com um valor inicial de 0,5. Agora, a sequência aparece como 0,9, 0,324, 0,788486,... Os valores de y sempre irão permanecer entre 0 e 1, não haverá jamais dois valores seguidos que sejam iguais e, se você observar qualquer corte da sequência, nunca será capaz de deduzir a regra que a gerou. A sequência é determinista e, mesmo assim, caótica.

Há outra característica do caos que se demonstrará muito importante na discussão que se segue sobre a mecânica quântica e as funções do cérebro; a saber, os sistemas caóticos amplificam diferenças extremamente pequenas nas condições iniciais para resultados dramaticamente divergentes. Por exemplo, se, em vez de semearmos nossa equação iterativa com 0,5, a semearmos com o valor de 0,500000000000000000000001, então, depois de um punhado de iterações, a sequência se tornará completamente diferente do que se a tivéssemos semeado com 0,500000000000000000000000. Como veremos, isso permite a possibilidade de que efeitos realmente minúsculos, em vez de serem descartados, quando feitas as médias, possam ser, ao contrário, preservados e ampliados, mas somente em sistemas que sejam em cada respeito e em cada escala *iterativos*. Os sistemas auto-organizadores são isso - exatamente porque é a interação que permite a retroalimentação interna que causa esse sistema ao estabelecer, de maneira espontânea, uma ordem global ordenada. Como também veremos adiante, sistemas de *osciladores* acoplados e iterativos, em particular, são ainda mais sensíveis a condições iniciais, e é justamente por estes que o quarto cérebro humano é composto.

Em segundo lugar, “experiências demonstraram que aquilo que incomodava Einstein não era um ponto sujeito a debate, mas sim o comportamento observado no mundo”.¹³ Todo o universo material parece costurado em um todo único e

mutuamente influenciável ou, talvez, em um todo que seja simultaneamente influenciado em todos os seus pontos e coordenado por “alguma coisa” que não é, em si mesma, uma parte física deste universo. Conforme foi mencionado anteriormente, parece que nos fundamentos da matéria se encontra não apenas um “estofo”, mas pura “informação”. Essa declaração deveria parecer sem sentido - o que pode significar dizer que a “matéria” é apenas “informação”? Por enquanto, simplesmente suspenda seu julgamento; para entender o que isto significa, é claro que primeiro teremos de reunir determinados blocos de construção de entendimento.

Em terceiro lugar, efeitos quânticos podem ser produzidos em escalas imensas - dentro dos limites da visibilidade -, levantando a especulação de que, quem sabe, o cérebro *possa* incluir eventos quânticos grandes o bastante para apresentarem efeitos significativos sobre seu funcionamento cotidiano - uma especulação que a maioria dos físicos qualificados rejeita por razões que discutiremos mais além -, em sua maior parte, boas razões, mas não por completo.

Finalmente, avanços na neurociência nos permitem penetrar tão fundo na subestrutura microscópica do cérebro - muito abaixo do nível dos próprios neurônios, dentro da estrutura *deles* - que não apenas poderemos encontrar efeitos quânticos lá dentro, como os físicos apostam que eles efetivamente estarão lá. A questão que permanece é a de ser possível que tais efeitos não sejam simplesmente compensados pela lei das médias.

Esses quatro avanços sugerem a seguinte questão: mesmo que os efeitos quânticos se achem presentes no interior das células do cérebro em escala suficientemente grande para afetar subestruturas neuronais, existe alguma razão para supor que esses efeitos possivelmente influenciem a vida diária?

Uma resposta é: existem estruturas no *cérebro humano que parecem perfeitamente projetadas para capturar efeitos quânticos e amplificá-los por meio da ação do caos*, porque, a fim de se auto-organizarem, adotaram um comportamento iterativo em todos os seus níveis - químicos, intracelulares, em nível de rede e, até mesmo, em nível social. Se isso for verdade, as ações geradas pelo cérebro e pela sociedade humana como um todo compartilhariam pelo menos uma parte da liberdade, mistério e não-mecanicidade absolutos do mundo quântico. Pode esta afirmação estar realmente correta? Para encontrar uma resposta plausível, precisamos começar do ponto em que Einstein cometeu seu erro.

11. EPR: PROCURADO VIVO OU MORTO

Sabemos que o mundo determinista do mecanicismo clássico não existe. A partir do momento em que mordemos a “maçã quântica \ a perda de nossa inocência se tornou permanente.

- R. Shankar, Princípios de mecânica quântica (1994).

Em 1962, Richard Feynman apresentou o terço final de sua famosa série de conferências de física no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Cal Tech). Essa série serviu nominalmente como uma sequência de dois anos, introdutória à física, para calouros ou alunos em nível de graduação. Uma vez que o número de participantes na platéia permaneceu aproximadamente o mesmo, Feynman não percebeu que, no segundo ano, sua audiência era composta em especial por alunos do último semestre, alunos formados e professores da universidade capazes de apreciar a enorme beleza, a energia, o âmbito e a profundidade de sua apresentação. Essa série de conferências tornou-se um ícone da física moderna - incomparavelmente elegante e casual, a quintessência do estilo de Feynman.

Esse último terço foi voltado exclusivamente à mecânica quântica. Feynman abriu sua exposição com uma famosa experiência mental, porque, “na realidade, é ela que contém o único mistério. [...] Depois que lhes tiver explicado como funciona, teremos revelado cada uma das peculiaridades básicas de toda a mecânica quântica”. Entretanto, o fenômeno em questão “é impossível, absolutamente impossível de explicar de qualquer maneira clássica”, advertiu. “Nós não podemos fazer o mistério ir embora só porque *explicamos* a maneira como ele funciona. A única coisa que lhes diremos é como ele funciona.”¹ E é sobre isto que ele estava falando.

Contando chumbinhos

Imagine uma espingarda que atira chumbinhos através de uma barreira que possui uma ou duas fendas verticais (veja Figura 11.1.)

A Figura 11-2 mostra os arranjos de uma única barreira e de dupla fenda, encarados verticalmente e de cima para baixo. À direita de cada barreira encontra-se um arranjo gráfico, mostrando quantos chumbinhos conseguiram atravessá-las.

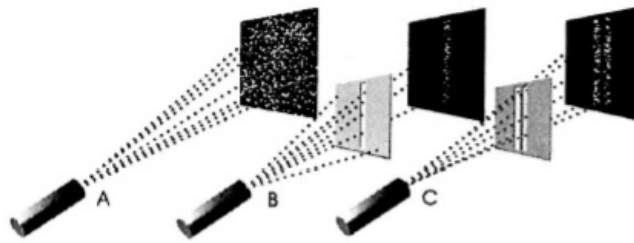


FIGURA 11-1. Chumbinhos atingindo um alvo. (A) Sem barreira. (B) Barreira de fenda única. (C) Barreira de fenda dupla.

Naturalmente, se fecharmos uma das duas fendas duplas, obteremos o mesmo tipo de resultado se houvesse uma única fenda desde o princípio. Mas a concentração de chumbinhos aqui está, obviamente, alinhada com a passagem da fenda que permaneceu aberta, como é mostrado na Figura 11-3.

A seguir, iremos fazer uma experiência semelhante com água em um tanque retangular (veja a Figura 11-4). Um dispositivo na extremidade esquerda do tanque dá passagem a duas ondas paralelas que viajam em direção a um dispositivo detector na extremidade direita. Esse detector mede a altura máxima de onda obtida em cada ponto, ao longo do lado direito do tanque. Um pouco mais à direita, temos um gráfico que mostra a distribuição da altura. Inicialmente, tentamos sem qualquer barreira (ilustração da direita) e, depois, com uma barreira cortada por uma só “fenda” - nesta ambientação, o equivalente da fenda é uma ranhura na parede do tanque -, inserida nessa parede entre o gerador de ondas e o detector.

A intensidade da onda (excursão máxima da água para cima ou para baixo) vai diminuindo ao longo do detector, uma vez que a energia da onda se dispersa à medida que avança, como acontece com o calor de um radiador. A curva é mais ampla que a curva de distribuição dos chumbinhos que atravessaram a barreira de fenda única, mas é de formato semelhante. A Figura 11-5 nos mostra o que acontece quando inserimos uma barreira de fenda dupla. Os resultados (mostrados no momento inicial na parte superior e, posteriormente, na parte de baixo) obtidos enquanto as ondas se propagam diferem sensivelmente de nosso experimento inicial com chumbinhos.

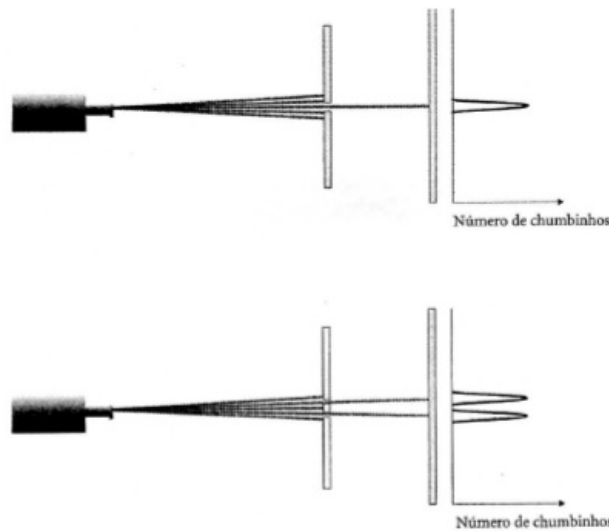


FIGURA 11-2. Chumbinhos que atingiram o alvo. Secção cruzada da linha mediana (vista de cima para baixo) com gráfico de densidade.

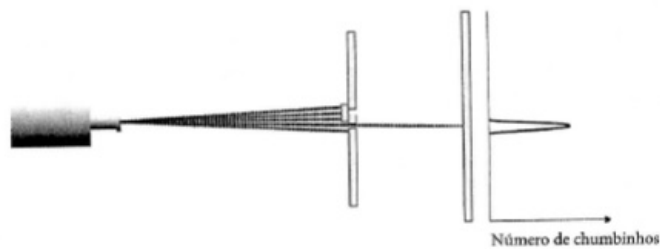


FIGURA 11-3. Quando uma das fendas é fechada.

As ondas consistem de altos e baixos que se alternam de maneira regular acima e abaixo de uma superfície antes sem nenhuma perturbação. Quando ondas se interceptam, combinam-se. Portanto, no detector, encontraremos faixas de picos com o dobro da altura, alternadas com vales com o dobro da profundidade, separadas por áreas em que picos e vales se cancelam - em uma situação ideal, se estendem para sempre, embora cada vez com menor intensidade: chama-se isso de um “padrão de interferência”.

Com uma fenda dupla (ranhura), os resultados obtidos com os chumbinhos e com as ondas se tornam distintos. É inconcebível que um cartucho de chumbinhos disparados através de duas fendas pudesse produzir um padrão de interferência infinitamente amplo (mesmo com uma intensidade logo dissipada); e é da mesma maneira inconcebível que duas esteiras de ondas circulares, contínuas, de radiação infinita e em interceptação mútua pudessem produzir duas concentrações lineares próximas, mas tão discretas.



FIGURA 11-4. Visão de cima para baixo de dois tanques percorridos por ondas, com detectores na extremidade oposta (da direita) de cada um, que medem a máxima altura da onda em cada ponto ao longo da parede oposta ao foco de propagação da onda. À direita de cada tanque, existe uma linha negra que indica a altura relativa da onda ao longo do detector. Ondas uniformes são geradas na parede esquerda de cada tanque. (a) Sem barreiras. Ondas paralelas atingem o detector, apresentando a mesma altura em cada ponto. (b) Barreira com ranhura única. Ondas circulares se formam no local da parede que agora se transformou em uma fonte “pontual” (a ranhura) e que, desse modo, se tornam progressivamente mais fracas à medida que se distanciam da fonte.

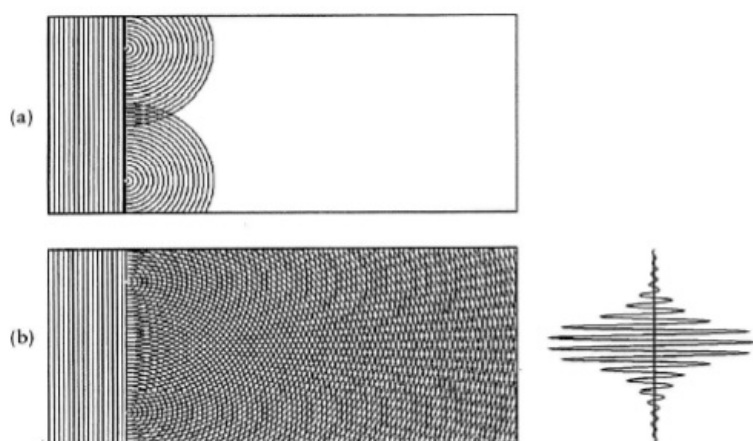


FIGURA 11-5. Visão de cima para baixo de um único tanque percorrido por uma onda e dotado de uma barreira de ranhura dupla e de um detector na extremidade oposta, destinado a medir a intensidade das ondas que atingem essa parede oposta. (a) Logo depois que as ondas paralelas atingiram a barreira. A onda transmitida consiste agora de duas fontes “pontuais” (produzidas por dois pontos diferentes), gerando ondas idênticas em fase. Quando se encontram, interferem umas com as outras. (b) Quando as ondas atingem o detector, regiões alternadas de interferência construtiva e destrutiva formam o padrão de intensidade oscilatória, mostrado na extrema direita. A extinção do padrão de interferência foi exagerada no gráfico.

Isso ocorre porque “chumbinhos” e “ondas” não são apenas “coisas diferentes”, mas pertencem a duas *categorias* distintas. Uma onda é um padrão de movimento adotado por uma coletânea de objetos; um chumbinho é um objeto. O fato de que tanto as ondas quanto os chumbinhos pareçam estar em movimento “para a direita” é também uma declaração enganosa. Apenas os chumbinhos foram projetados e se movem para a direita. As moléculas da água (as coisas verdadeiras) de que a onda é formada não se movem para a direita. Elas se movimentam em sentido vertical, para cima e para baixo - isto é, oscilam no ponto em que já se encontravam. O que se movimenta é o padrão oscilatório.

Do mesmo modo que as ondas não são “coisas”, mas “padrões”, elas realmente não se “movem”. Portanto, o que dizemos delas, com maior exatidão, é que “se propagam”.

De maneira semelhante, enquanto os chumbinhos apresentam uma única localização discreta, as ondas são espalhadas em círculos imensos - no caso ideal, círculos concêntricamente infinitos. Eles podem ser registrados mais fortemente em certos pontos do que em outros, mas não possuem qualquer localização única, estão em toda parte, por assim dizer. Uma bola ricocheteando dentro de uma caixa fechada apresenta uma localização em constante movimento, mas única e precisa a qualquer momento, e os ricochetes permanecem contidos pelos limites da própria caixa. Uma onda ricocheteando dentro de uma caixa fechada preenche toda a caixa em todos os momentos, com um padrão de interferência em constante mutação causada por sua interferência com ela mesma.

Finalmente, um chumbinho é formado por matéria real, enquanto uma onda é e “formada” por nada, uma vez que não passa de um padrão. Realmente, não é sequer “feita de água”. Em vez disso, é o meio em que se propaga que é constituído por água. (Isso pode parecer como se estivéssemos classificando migalhas, mas esta distinção nos ajudará quando tentarmos entender o relacionamento entre matéria - ou energia - e informação.) Se você acompanhar uma onda e pensar que ela “é formada por água” e se encontra “em movimento”, terá de dizer que a água de que ela “é feita” está sendo constantemente trocada à medida que a onda avança. O padrão de movimento horizontal oscila algumas moléculas de água verticalmente no mesmo lugar em que estão, deixa todas para trás e passa para as moléculas seguintes.

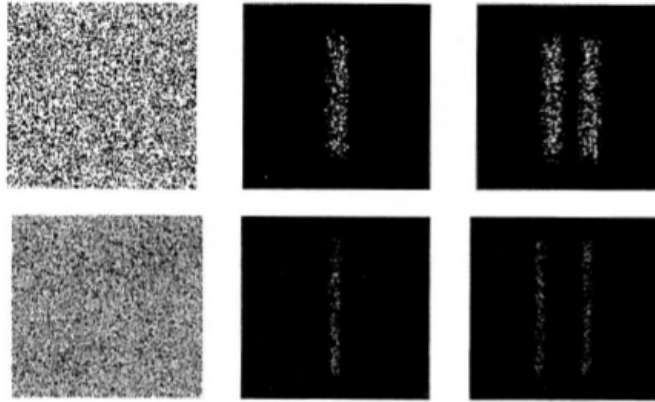


FIGURA 11-6. No alto: partículas do tamanho de grãos de areia atingindo um alvo. Esquerda: sem barreiras; centro: colimador [dispositivo para produzir um feixe de radiação paralela] de fenda única; direita: colimador de fenda dupla. Embaixo: resultados esperados quando elétrons atingem um alvo. Esquerda: sem barreiras; centro: colimador de fenda única; direita: colimador de fenda dupla.

Em resumo, se alguma coisa gerar padrões de interferência, deve também ser uma onda: um padrão sem substância que se propaga em algum meio capaz de oscilar ou de vibrar sem sair do lugar em que se encontra.

Vamos repetir a experiência com um lançador de jato de areia, de tal modo que as partículas que dispararmos serão muito menores. O que vemos? Os resultados são o que seriam de esperar, como é mostrado na Figura 11-6 em (a) sem fenda; (b) com uma única fenda; e (c) duas fendas.

Finalmente, vamos empregar desta vez partículas realmente muito pequenas: elétrons. A Figura 11-6 nos mostra o que esperamos ver.

Porém, a Figura 11-7 nos mostra o que de fato acontece: um padrão de interferência! Desse modo, os elétrons não podem ser objetos discretos e localizados, e sim apenas padrões de propagação espalhados ao longo de algum meio. Vamos examinar esses resultados com maior cuidado.

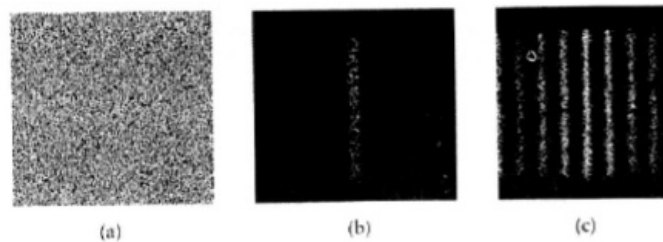


FIGURA 11-7. Elétrons batendo contra um alvo. Os resultados reais são: (a) sem barreiras; (b) colimador de fenda única; (c) colimador de fenda dupla.

De imediato, observamos três coisas muito estranhas. Primeiro, essas “ondas” são formadas por acertos no alvo de partículas individuais. Segundo,

cada acerto individual de uma partícula parece localizado aleatoriamente, porém de forma agregada; os acertos se conformam a uma distribuição semelhante à de uma onda. Quando medimos a densidade dos acertos como função da distância de sua linha mediana, descobrimos que esta densidade é igual ao *quadrado* da altura de um padrão genuíno de interferência de ondas, o que torna ainda mais confusa a questão de sabermos com exatidão o que são essas “ondas” subjacentes que causam as interferências. Com certeza, elas não podem ser “a raiz quadrada de um feixe de amplitudes eletrônicas positiva e negativamente alternadas”, uma vez que é apenas uma misturada de palavras que, de fato, não tem sentido algum. Só que é exatamente isso que a matemática diz que são. Em terceiro lugar, pegue uma localização qualquer ao longo das que foram detectadas perto da linha média, em que, com duas fendas abertas, não existe nenhum acerto (ou se encontram poucos). Agora, examine a mesma localização com apenas uma fenda aberta. Você poderá encontrar lugares em que, apesar de apenas uma fenda estar aberta, existem acertos. Em outras palavras, nestas localizações, ao se abrir uma *fonte adicional* de elétrons, o número de acertos *diminui!*...

Com todas essas coisas estranhas acontecendo, até parece que, de alguma maneira, os elétrons estão “interferindo” uns com os outros e, algumas vezes, até mesmo “cancelando-se mutuamente” - seja qual for o significado que isso possui. Vamos tentar resolver. Calibramos nosso canhão de elétrons para que nunca exista mais que um único elétron entre o emissor e o alvo. Ficamos observando, enquanto chegam um por um. Vamos adivinhar o que deveria acontecer.

A princípio, sabemos que, quando uma única fenda se encontra aberta (veja Figura 11-6), os elétrons se comportam exatamente como deveriam - da mesma forma que chumbinhos. E por isso que vemos a “sombra” da fenda no detector. Assim, mesmo que essa frase possa parecer boba, vamos dizê-la: “Um único elétron que atinja o detector deve passar através da única fenda que se encontra aberta”. Parece razoável, especialmente porque já vimos que, sem fendas, nenhum elétron consegue passar.

A seguir, abrir uma outra fenda pode não apresentar qualquer efeito sobre o *único* elétron que passa pela primeira fenda. Além disso, um único elétron viajando através de uma única fenda, qualquer que seja (é óbvio que ele apenas pode passar por uma, quer a primeira, quer a segunda), só pode atingir o detector em algum lugar com uma certa distância, a partir da linha mediana. Mesmo que se espalhe um pouco para fora das margens da fenda (é isso que causa a imprecisão da “sombra”), existe um limite. Ele não pode fazer curvas fechadas,

formar um ângulo e aparecer a quilômetro e meio de distância para a direita. E, uma vez que é o único elétron disponível, ou seja, o único que está sendo disparado, não existem outros em que possa bater e quicar, criando efeitos desencontrados.

Desse modo, um único elétron enviado em direção a duas fendas e detectado só pode ter passado através de uma das fendas ou da outra e irá atingir a tela do detector em uma de duas regiões verticais paralelas, demarcadas pelas linhas fracamente pontilhadas na Figura 11-8.

Uma vez que não existe possibilidade de dois elétrons sucessivos interferirem um com o outro, deveremos descobrir que, à medida que o número de acertos individuais cresce, eles conformarão o padrão mostrado na Figura 11-9.

Mas “deveremos descobrir”, assim como a “definição racional da realidade” de Einstein, que raras vezes corresponde àquilo que pensamos que “deveria acontecer” - no mundo quântico. Essa experiência com elétrons foi realizada pela primeira vez por uma equipe de pesquisadores japoneses trabalhando nos laboratórios da companhia Hitachi Ltda. Os resultados reais são mostrados na fila inferior, na Figura 11-10.



FIGURA 11-8. Espera-se que um único elétron atinja o espaço situado dentro das linhas pontilhadas determinadas por todas as possíveis trajetórias através de cada uma das duas fendas abertas.

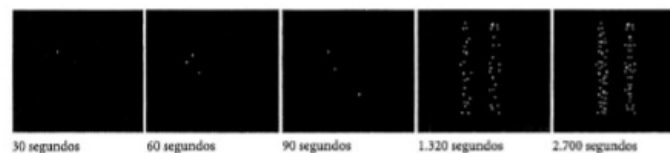


FIGURA 11-9. Espera-se que muitos elétrons individuais atinjam o espaço dentro das linhas pontilhadas que são determinadas por todas as trajetórias possíveis que cada elétron individual possa seguir através de qualquer uma das duas fendas abertas (os tempos registrados são hipotéticos).

Agora, se houvesse apenas um elétron viajando de cada vez, desde a ponta do canhão emissor até a tela do alvo, como seria possível, nesse mundo, que elétrons interferissem uns com os outros? O primeiro elétron poderia estar interferindo em quê? Nos elétrons que ainda não foram emitidos? De uma maneira fantástica, essa experiência funciona assim, não importa a extensão de tempo que medeie a emissão dos elétrons individuais - mesmo que sejam anos.

“Tudo bem”, você poderá dizer. “Pode ser que os elétrons não sejam realmente partículas, mesmo que, quando batam na tela, deixem ali uma marca discreta. Talvez sejam ondas, puras e simples ondas. Afinal, ninguém jamais viu realmente um elétron. Já escutei pessoas falarem que a comparação do átomo com o sistema solar é errônea, que o elétron se parece mais com uma nuvem do que com um ponto, e talvez seja por isso que estamos obtendo resultados tão malucos.”

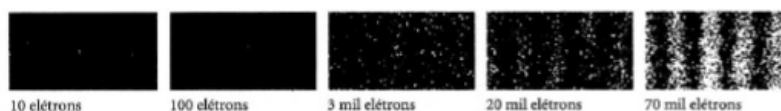


FIGURA 11-10. Resultados reais mostrando o aumento progressivo da interferência de elétrons ao longo do tempo. O padrão vai sendo ampliado em uma taxa de mais ou menos mil elétrons por segundo, mais do que adequadamente lenta para garantir que apenas um elétron de cada vez atravesse o espaço da ponta do canhão de elétrons até a tela do detector.

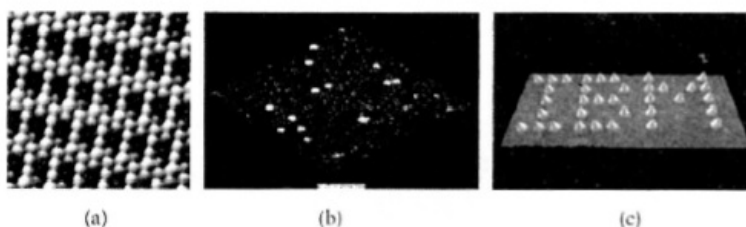


FIGURA 11-11. Um “microscópio de tunelamento por varredura” produziu esses retratos reais de vários átomos. (a) Átomos de oxigênio (escuros) na superfície de uma treliça de átomos de platina (claros). (b) Átomos de ouro (brancos) espalhados aleatoriamente em uma superfície de mica. (c) A palavra “IBM” construída pela colocação de átomos individuais em localizações fixas.

Ótimo. Nesse caso, vamos realizar a experiência com objetos que temos certeza de que são realmente objetos, discretamente localizados no espaço. As figuras 11-1 la e 11-1lb nos mostram algumas fotografias de átomos individuais. Podemos ver que são partículas - sem sombra de engano.

Hoje, os átomos individuais podem até ser transportados com “pinças de força atômica”, visando a criar construções em nanoescala, o que significa que elas também podem ser fotografadas e, assim, *sabemos* com certeza que os átomos são objetos discretos. Afinal, estão localizados exatamente onde nós os

colocamos, como na famosa fotografia da sigla da IBM em nível atômico, mostrada na Figura 11-llc.

Mas, se lançarmos átomos através de uma fenda dupla, ainda descobriremos um padrão de interferência - construído enquanto lançamos um átomo de cada vez -, assim que tivermos aberto a segunda fenda!... Ao se comportarem de maneira quase semelhante a ondas e partículas, nossos átomos conseguem fazer coisas que deveriam ser totalmente impossíveis.

Tanto onda como partícula

Fica muito bem e até muito bonito reunir uma série de palavras - “átomos são tanto ondas como partículas ao mesmo tempo” -, mas entender o que estas palavras significam é muito diferente. Simplesmente, não faz sentido. “Posso dizer com toda segurança que ninguém entende a mecânica quântica”, escreveu Richard Feynman, o mestre dos mecânicos quânticos, se é que existiu algum.²

No entanto, a teoria quântica se demonstrou mais correta do que qualquer outra teoria científica através da história. Suas previsões, não importa quão absurdas fossem, nunca foram contrariadas. Mas essa vantagem teve seu preço: não podemos entender por que é assim. O melhor que podemos fazer é aceitar o fato de que as coisas que interferem são ondas probabilísticas puramente abstratas e que esta é “a única [...] interpretação possível”.³

Os padrões de interferência, formados por muitos objetos quânticos, são algo como equações matemáticas para distribuição estatística que empurram resultados individuais que, de outro modo, seriam inteiramente casuais em direção a aproximações confusas e indeterminadas da mesma equação. A “estatística” é apenas a regra ou formulação que lhe diz como probabilidades variadas são arrançadas. (“Qual é a probabilidade de esse evento ocorrer, ou de que o objeto seja encontrado em cada localização do espaço?” é um exemplo.) Assim, se um padrão de interferência se forma a partir de estatísticas, então as probabilidades interferem (seja qual for o significado) para produzi-lo?

Chegamos quase lá, mas essa resposta não pode ser exatamente correta por uma razão bastante simples (e não porque pareça sem sentido!). A interferência surge quando as ondas se interseccionam, de tal modo que seus picos e depressões possam se combinar. Entretanto, o pico (altura máxima) de uma onda é positivo, enquanto sua depressão (profundidade máxima) é negativa. Faixas de altura zero (por exemplo, o brilho, quando falamos em luz; a densidade de acertos de partículas, quando mencionamos elétrons) aparecem sempre que um pico e uma depressão se combinam. Assim, seja lá o que for que esteja interferindo nos eventos quânticos, deve ter a forma de uma onda e deve ser

capaz de assumir valores negativos. Porém, por definição, as probabilidades propriamente ditas só podem assumir valores entre 0 (ou seja, “absolutamente fora de questão”) e 1 (em outras palavras, “absolutamente certo”).

Descobriu-se - por nenhuma outra razão, a não ser que “é assim que é” - que o “meio” em que as ondas quânticas se propagam não consiste apenas de probabilidades, mas da “raiz quadrada das probabilidades”, uma quantidade (tanto positiva quanto negativa) que foi denominada “amplitude de probabilidades”. Os físicos, em geral, falam que as ondas são compostas (isto é, “feitas de”) amplitudes de probabilidades, mas essa expressão não chega a ser precisa o suficiente, do mesmo modo que as ondas de água são, na realidade, ondas se propagando por meio da água. O fato de que o meio por sobre o qual os eventos quânticos se propagam é alguma coisa intimamente relacionada com as probabilidades (sua raiz quadrada) e, desse modo, a “raiz quadrada das possibilidades” fica parecendo mais com um tipo de “coisa” etérea; e que também, após sua detecção, essas ondas assumem a forma de matéria (localizada como uma partícula), de tal modo que informações surgem em existência que previamente nem existia (antes de ser detectada, a “partícula” não possuía sequer uma localização). Isso sugere algum tipo de conexão entre a matéria e a informação. Essa forma particular de estranheza quântica será discutida em maiores detalhes mais adiante, quando chegarmos à computação quântica e seu potencial quase miraculoso para o processamento de informações.

De qualquer maneira, quando essas “ondas da raiz quadrada das probabilidades” (denominadas “amplitudes das probabilidades”) se interceptam, elas se combinam para formar um “padrão de interferência de amplitudes de probabilidades”, padrão que apresenta valores tanto positivos como negativos entre -1 e +1. Buscando determinar a exata distribuição das probabilidades, deve-se determinar em todos os pontos os valores da amplitude de probabilidade.

A parte mais misteriosa de tudo, entretanto, é o fato de que, não importa o grau em que as equações que governam a distribuição de probabilidades para eventos quânticos possam ser precisas e mecanicamente perfeitas, o próprio evento quântico real — qual das possibilidades prováveis ou improváveis se tornará factual e real - é, dentro dessas probabilidades, completamente aleatório. Ele não é “causado” (isto é, selecionado entre as possibilidades disponíveis) por nada que exista no Universo: nenhuma força, nenhuma colisão, nenhum evento prévio - nada de nada. Simplesmente ocorre sem que descubramos qualquer razão de qualquer tipo imaginável. E esta não é a aparente aleatoriedade de jogarmos uma moeda para ver se dá cara ou coroa, pois, quando lançamos uma moeda no ar, seu resultado é determinado antes do tempo da queda. Nós, simplesmente, não estamos interessados em saber e, falando de maneira prática,

não poderíamos obter acesso a todas as causas determinantes - a trajetória provocada pelo impulso de nosso polegar, a fricção dos dedos com o metal da moeda, a resistência do ar *etc.* Porém, a aleatoriedade quântica é absoluta. “O puro *acaso* havia ingressado pela primeira vez nos processos quânticos. [...] Em um sentido, um [...] *quantum* é entregue a si mesmo para decidir quando e em que direção ele existe.” Einstein estava inteiramente cômico do significado disso. “O *acaso* solapa a causalidade e, desse modo, faz desabar toda a estrutura da física clássica, em que [...], a partir de um dado estado inicial, um sistema se desenvolve no decorrer do tempo com regularidade e sem qualquer ambigüidade, de maneira que todos os seus estados futuros são determinados.”⁴

O grau de perturbação que causou esse retrato quântico, de um mundo em que as partículas vão para onde querem, plenamente indeterminadas, não pode ser exagerado. “Uma pessoa que não tenha ficado chocada com a teoria quântica é porque não a entendeu”, disse Bohr. O fato de que dois eventos idênticos, colocados em movimento por circunstâncias idênticas, irão evoluir de maneiras idênticas a fim de atingir um ponto final idêntico foi a pedra fundamental das ciências em geral, e da física em particular, e, “em ciência, só existe a física: tudo mais é filatelia, uma coleção de selos”.⁵ Bem, então, a física desistiu? De acordo com Feynman: “Sim! A física desistiu. Nós não sabemos mais como prever o que irá acontecer dentro de determinadas circunstâncias e acreditamos que isso seja impossível - que a única coisa que pode ser prevista é a possibilidade de ocorrência de diferentes eventos. Deve ser entendido que esse é um ‘reentrincheiramento’ de nosso antigo ideal de conseguirmos entender a natureza. Pode até ser um passo para trás, mas ninguém ainda descobriu uma forma de evitá-lo”.⁶

Essa afirmação incomodou Einstein a ponto de ele sacrificar boa parte de sua carreira posterior em uma tentativa fútil de encontrar uma alternativa. “Eu não gostaria de ser forçado a abandonar a estrita causalidade sem muito maior oposição do que demonstrei até agora. A ideia de que um elétron [...], *por sua própria e livre decisão*, escolha o momento e a direção em que se deseja ejetar é intolerável para mim. Se isso for comprovado como sendo verdade, prefiro virar sapateiro, ou me empregar como atendente de uma mesa de jogo em um cassino qualquer do que continuar tentando ser um físico.”⁷

No entanto, a única interpretação consistente das experiências realizadas sobre a mecânica quântica é a de que a natureza é inerentemente probabilística - isto é, que os eventos acontecem por “razões” que não fazem parte da natureza. (Os cientistas preferem dizer “por nenhuma razão”, mas essa declaração não é menos misteriosa e, de qualquer modo, inteiramente indistinguível da anterior.)

“A determinação”, escreveu Max Born, amigo e parceiro de Einstein, “deve ser desconsiderada no mundo atômico.”⁸ Einstein, Podolsky e Rosen, em seu “Experimento mental EPR”, demonstraram que, devido à derrubada da causalidade que ela implicava, caso a mecânica quântica se demonstrasse uma descrição completa da natureza, a própria realidade, como a experimentamos, cessaria de ter o significado que lhe atribuímos. Tendo demonstrado ser esta a conclusão natural, parecia óbvio para eles que, por esse motivo, a mecânica quântica era inadequada. Entretanto, não foi assim que se demonstrou. ^aAs experiências mostraram que a mecânica quântica é correta, sem dúvida, e que o argumento EPR se embasava em pressuposições incorretas.”⁹

Estamos, assim, enfrentando a perspectiva de que não existe uma realidade local completamente fixa e objetiva e que, se de fato não existe - como seria a decorrência necessária, segundo o argumento EPR-, a realidade, em muitos respeitos, é “não-local” - contrariamente às pressuposições de Einstein. Os elétrons, na experiência da fenda dupla, interferem neles mesmos, segundo todas as aparências. Em outros ambientes, “influenciam” uns aos outros, também segundo as aparências, mas sem interagirem, e isso independentemente da distância em que se encontrem uns dos outros, tanto no espaço como no tempo. (Veja o Apêndice C.)

Além disso, os “inteiros” podem ser compostos de “partes” que não tenham ou não possam ter qualquer conexão causai umas com as outras, pelo menos sob condições controladas, como os ambientes de fenda dupla. A simples abertura de uma segunda fenda produz um “inteiro” diferente - canhão, partículas, detector, experiência. Nessa configuração, a própria natureza da realidade se torna um tanto diferente ou, de outro modo, nos mostra uma face diferente do que quando a segunda fenda estava fechada. Não é que o simples fato de abrir uma segunda fenda “cause” o comportamento dos elétrons como ondas. Não existe nenhuma forma possível de uma causa poder ser transmitida da fenda para os elétrons, em particular para aqueles que ainda esperam “nos bastidores” [isto é, dentro do canhão de elétrons] a sua vez de ser lançados no sistema.

E fácil entender por que tanta gente - poetas, místicos, filósofos e, até mesmo, alguns cientistas - encontrou uma nova religião na mecânica quântica. Mas a “realidade” do mundo quântico não é tão simples. Pode não se encaixar confortavelmente nas categorias quadricentenárias do determinismo cartesiano e iluminista, mas tampouco serve facilmente aos dogmas de qualquer religião preexistente ou a qualquer esquema religioso-místico recém-criado. O que ela faz é ocupar um território que jamais havia sido concebido antes - e é para esse território que iremos agora.

12. *E UNUS PLURIBUM* - de um mistério saem muitos

Esta teoria me faz lembrar o sistema de ilusões de um paranoico extremamente inteligente, inventado a partir de elementos incoerentes do pensamento.

[...] Se for correta, significa o fim da física como uma ciência.

- Albert Einstein, Carta a D. Lipplein, 5 de julho de 1952.

É verdade que todo o mistério da mecânica quântica está contido na experiência da dupla fenda. Porém, é um mistério com múltiplas facetas e levou um século até que suas muitas implicações se desenvolvessem em toda a sua riqueza bizarra. E tampouco esse desenrolar já foi concluído. A cada ano, segundo parece, surge uma nova revelação surpreendente, enraizada na natureza da realidade quântica. O teletransporte quântico de objetos visíveis ou computadores quânticos cujos circuitos processam em uma rede distribuída por meio de múltiplos universos - estas e muitas outras coisas ultrajantes - não constituem mais a temática exclusiva da ficção científica, mas sim os objetos de cientistas e engenheiros trabalhando nas maiores instituições do mundo: nas universidades de Oxford e Harvard ou nos laboratórios do MIT e da IBM, só para citar alguns.

O que tudo isso tem a ver com o cérebro, se é que tem? A maior parte dos neurocientistas atualmente insiste que a resposta é “nada”. E, por mais tantalizam-te que seja a analogia, certamente é verdadeiro que não existe qualquer maneira de conectar direta e sensatamente o comportamento quântico com o comportamento humano. “Os elétrons parecem fazer o que querem porque são partículas quânticas; portanto, faço o que meu cérebro quer que eu faça porque o cérebro também é quântico” é uma conclusão que, na melhor das hipóteses, pula algumas etapas (sem mencionar fatos); no pior caso, poderia ser melhor “a ilusão de um paranoico extremamente inteligente, inventada a partir de elementos incoerentes do pensamento”.

Mas é possível, *indireta* e sensatamente, conectar o comportamento quântico com o comportamento humano, embora atingir essa conexão requeira uma atenção aos detalhes muito maior do que pode ser abrangida por qualquer analogia poética. Entre os inumeráveis mistérios que se desdobram a partir da experiência da fenda dupla, precisaremos adquirir familiaridade com alguns dos

mistérios-chave, a fim de construir uma ponte sólida de dados e de análise científica entre os seguintes elementos subatômicos e os elementos correspondentes da vida diária: (1) dualidade ondas/partículas; (2) contextualidade; (3) indeterminismo; (4) acaso absoluto; (5) falta de trajetórias; (6) superposição; e (7) tunelamento (teletransporte). Depois disso, poderemos dar uma olhada em um exemplo da vida real sobre a estranheza quântica. Mas, também, precisaremos entender por que a maioria dos biólogos duvida que qualquer parte disso tenha alguma coisa a ver com a vida. Apenas depois que tivermos explorado completamente as aplicações da estranheza quântica, que estão agora abrindo caminhos por meio da tecnologia, é que estaremos preparados para ver por que todos esses biólogos estão errados.

Dualidade partícula-onda

Projetada há 40 anos, a experiência da fenda dupla expôs a dualidade entre as partículas e as ondas da realidade quântica com grande força, como vimos na discussão do último capítulo. Hoje, entretanto, a natureza dual da matéria, uma intermitência entre ondas e partículas, pode ser vista diretamente, como na Figura 12-1.

Contextualidade

Chamamos esse fenômeno anteriormente de “integralidade”. A experiência da fenda dupla nos força a reconsiderar como nós - e, aparentemente, a natureza - definimos o que constitui uma “unidade”. No regime quântico, o contexto é um aspecto absolutamente inseparável de qualquer “entidade”.

Indeterminismo

Um sistema de quatro osciladores acoplados e mecânicos pode facilmente dar lugar a uma sequência de estados que nunca se repetem de maneira exata (caos). Porém, esses estados são determinados pelo estado inicial do sistema, pelas características de cada elemento incluído no sistema e pela maneira como tais elementos interagem uns com os outros. O comportamento complicado que surge em tais sistemas é, em geral, referido como um ‘emergente’; e não é um comportamento indeterminado.

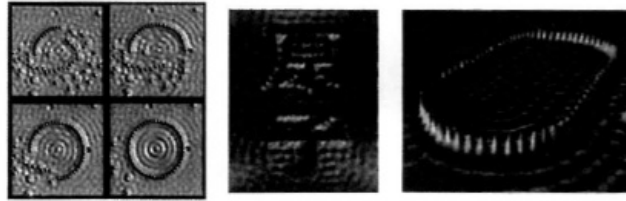


FIGURA 12-1. Átomos arranjados por “pinças de força atômica” em padrões variados. A função de onda de seus elétrons (e, até certo ponto, dos próprios átomos) interfere, produzindo as superfícies semelhantes à água que rodeiam os átomos.

O comportamento da experiência da fenda dupla é de verdade não-determinista. A distribuição da densidade dos acertos de elétrons é guiada (probabilisticamente) por uma equação exata, mas os acertos individuais ocorrem de forma aleatória - os locais exatos em que acertam não são determinados por nada que faça parte de nosso Universo, embora surja uma impressão de que as partículas estão “cooperando” umas com as outras, de tal modo a garantir a distribuição geral adequada. Esse comportamento é mais do que “emergente”: em um universo realmente mecânico, seria impossível.

Acaso absoluto

O fato de que a localização final das partículas é não-determinista é outra maneira de dizer que existe um elemento de absoluto acaso nos resultados. A extraordinária estranheza desta ideia — como ela é realmente difícil de apreender por nossas mentes - é salientada pelo fato de que a filosofia antiga e medieval decidiram, muitos séculos atrás, que uma definição de Deus seria “a causa não causada”. Deus é uma causa eficiente sobre nosso mundo material, de acordo com esse ponto de vista, exercendo influência sobre todas as coisas, especialmente pelo seu ato de criação, mas Ele próprio não é originado por qualquer causa. Os filósofos e cientistas do iluminismo aceitaram essa definição de Deus porque explicava sua ausência do mundo - não havia causas não causadas no mundo que viam: ao contrário, “tudo acontece por uma razão suficiente”. Talvez Deus tivesse criado o mundo, mas esse funcionou inteiramente sem Ele desde então. Os eventos quânticos, entretanto, tão modestos quanto possam ser em escala, são “causas não causadas” e são igualmente ubíquos - de onde nasce o caráter suspeitamente “religioso” da teoria quântica aos olhos frios do ponto de vista einsteiniano.

Falta de trajetórias *versus*...

As partículas viajam ao longo de sendas específicas e localizadas: uma sequência ininterrupta de pontos no espaço inserida em uma sequência ininterrupta de pontos no tempo. Sem dúvida, não se pode dizer de uma “partícula” que não viaje através de uma fenda, nem da outra, mas que (de certo modo) passa através das duas, que ela tenha “seguido uma senda” em qualquer sentido da palavra adotado pelo consenso comum. Todavia, tal partícula quântica começa em um ponto definido do emissor e termina em um ponto definido da chapa do detector. Mas onde ela estava, quando se encontrava entre os dois? Qual era a sua “trajetória”? (veja a Figura 12-2.)

A realidade é que *não há* qualquer trajeto único possível a ser seguido por partículas em uma experiência de fenda dupla. Qualquer caminho razoável deixa de passar pelo menos por uma das duas fendas e, portanto, elimina a possibilidade de que uma única partícula interfira com ela mesma, embora evidentemente o faça. E os caminhos seguidos devem fazer curvas de algum tipo, o que significa aceleração, e a aceleração implica uma força, mas não existe força alguma; desse modo, a lei da conservação da energia é violada. Qualquer senda que não seja razoável, que faça com que a partícula, de algum modo, consiga viajar pelas duas fendas em sequência (e esta proposta, por mais desesperada que pareça, foi apresentada durante algum tempo), deverá realizar algumas curvas bastante fantásticas, o que, novamente, significa aceleração (do mesmo modo que aumentamos a velocidade de um carro para fazer uma curva), o que, mais uma vez, indica que alguma força deve estar agindo sobre a partícula para fazer com que realize a curva, só que não há nenhuma força presente. Em resumo, as partículas quânticas não viajam ao longo de sendas bem definidas, mesmo que saiam daqui e cheguem lá. No entanto, é verdade que, se você colocar uma barreira em frente a uma das fendas, os elétrons aparentemente são interceptados. Mas lembre-se de que esta é uma experiência com duas fendas e constitui uma realidade totalmente nova.

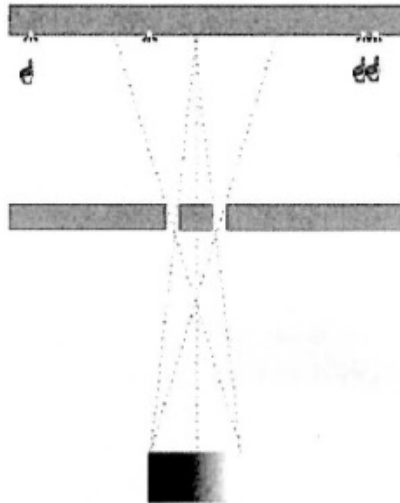


FIGURA 12-2. As “trajetórias” de um arranjo de fenda dupla são impossíveis e não-deterministas. As linhas pontilhadas mais fracas mostram o centro e os extremos de trajetórias classicamente possíveis, incluindo ricochetes, com uma ou duas fendas abertas. As partículas quânticas conseguem “tunelar” através das barreiras.

... superposição

Em outra maneira de expor o assunto (desenvolvida por Richard Feynman), podemos dizer que uma partícula viaja *através de qualquer caminho concebível* e que são os múltiplos caminhos que causam a interferência. (Agora que você já se acostumou a usar expressões como “ondas de raízes quadradas de probabilidade interferem” para dizer que “as sendas interferem” umas com as outras, seria muito mais fácil apoiar essa ideia, mas não se deixe enganar: ninguém entende o que isso “significa”, como Feynman teria sido o primeiro a reconhecer, mesmo que as fórmulas matemáticas funcionem perfeitamente.)

Assim como dizemos que duas ou mais ondas de água se combinam e interferem mutuamente - em uma “superposição” das ondas constituintes -, e que as “amplitudes das probabilidades” também se combinam e interferem, podemos dizer que, entre o emissor e o detector, os caminhos seguidos pelos elétrons em um instrumento de fenda dupla se encontram em uma superposição. Os caminhos terminam sendo pesados probabilisticamente, após suas interferências, ou seja, acontece que o resultado da combinação desses caminhos cria padrões que ditam o formato das faixas resultantes que vimos na experiência da fenda dupla.

Na verdade, mesmo se apenas uma das fendas estiver aberta, um único elétron poderá viajar por todos os caminhos, inclusive por alguns que dão uma

volta por Detroit antes de retornar, um passeio até a Galáxia de Andrômeda, “uma banda” em um bar local e que, apenas depois, retornam para atingir o alvo. Quando você calcula a matemática correspondente à situação em que existe apenas uma fenda, quanto mais distante um caminho estiver daquela trajetória que o senso comum esperaria que percorresse, tanto mais ela interferirá destrutivamente com seus vizinhos que, sendo vizinhos, percorrem caminhos comparavelmente inesperados; e quanto mais próxima uma senda se achar daquele caminho que o senso comum espera que percorra, tanto mais interferirá construtivamente com seus vizinhos que, sendo vizinhos, percorrem caminhos razoáveis. Assim, temos a impressão de que o elétron está seguindo um belo caminho razoável, mas, na realidade, não está. Assim, a não ser que abramos uma segunda fenda, não podemos verificar. Todavia, como nos próprios átomos, a superposição pode ser diretamente detectada. “Um íon capturado de berílio foi esfriado a *laser* [...] e, então, preparado em uma superposição de estados [...] coerentes e espacialmente separados. [...] A [...] superposição foi verificada por meio da detecção das interferências mecânicas quânticas entre os pacotes de ondas localizados.”¹

Tunelamento

Se os elétrons viajam por todos os caminhos possíveis, mesmo quando apenas uma das fendas se encontra aberta, o que acontece quando as duas fendas forem fechadas? Poderia um elétron, de alguma maneira, evadir-se da barreira? E, se ele fosse capturado dentro de uma barreira tridimensional - como uma caixa fechada -, teria alguma forma de escapar? Se tudo é uma questão de probabilidades, talvez pudesse. Afinal, quem foi que disse que, simplesmente porque está “dentro” da caixa (usando os termos correntes), ele não poderá estar, também, de outra maneira, “fora” dela? Roland Omnès, um físico teórico da Universidade de Paris, considera da seguinte maneira a Terra e todos os seus habitantes:

Se presumirmos que o movimento da Terra seja governado pela mecânica quântica, poderemos também considerar [...] efeitos [...] que parecerão incríveis a partir do ponto de vista do bom senso. Por exemplo, nada proíbe a Terra de abandonar as vizinhanças do Sol [...] e [...] aparecer subitamente nas vizinhanças de Sirius [...] por meio de um efeito de tunelamento. [...] Mas a probabilidade de que isso aconteça [...] é [...] da ordem de aproximadamente $10^{10(84)}$. Por mais minúscula que essa probabilidade possa ser, não é 0. Podemos, portanto, concordar com a opinião comum de que o Sol se erguerá

amanhã, mas devemos conservar em mente a possibilidade de um evento tão louco como seu não-aparecimento, pelo menos em princípio.²

Agora, para uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons) que fizer parte de um núcleo grande, as probabilidades de tal escapada são muito melhores; tão melhores, que dão margem a um perigoso nível de radioatividade, a partir de certos elementos. E isso acontece a despeito do fato de que o núcleo forma uma gaiola, da qual deveria ser impossível a qualquer partícula alfa escapar.

Eventos semelhantes ocorrem - e são inúmeros - quando a eletricidade (composta por elétrons) da saída da parede entra nas pontas de cobre de qualquer tomada comum. O seu eletricista provavelmente nem sabe disso, mas mesmo a camada mais fina possível que possa ser imaginada de óxido de cobre (zinabre ou capa esverdeada comum) é um isolador muito eficiente. Se não fosse pelo teletransporte maciço dos elétrons (“tunelamento”, com vem sendo chamado), qualquer fio de cobre ou qualquer uma das pontas de uma tomada se tornariam isolados dentro de segundos após sua exposição ao ar. Porém, os elétrons - como todas as entidades quânticas - efetivamente se teletransportam: simplesmente desaparecem aqui e reaparecem ali. Uma vez que não atravessam o espaço interveniente, podem escapar através de barreiras que, de outro modo, seriam impenetráveis. O teletransporte não é uma ideia tão extraordinária como pode parecer - ocorre constantemente, em nossas casas e em toda parte.

Pirâmides mágicas

Vamos agora dar uma olhada em um exemplo da vida real de toda essa estranheza quântica - a molécula de amônia. É um bom exemplo para nossos propósitos, porque é bem estudada (até o ponto em que qualquer objeto quântico possa ser). Sendo uma molécula, é muito maior que um elétron, de maneira que está um pouco mais próxima à escala dos sistemas vivos; de fato, é uma molécula em geral encontrada como parte de processos vitais e, desse modo, serve como introdução para ideias que logo estaremos aplicando a biomoléculas maiores.

A amônia é um composto de um átomo de nitrogênio e três de hidrogênio - NH_3 . É encontrada tanto no mundo das plantas como entre os animais, como qualquer um que já tenha cheirado um canteiro de esterco ou um fertilizante natural sabe. Os átomos que compõem a molécula de amônia formam uma pirâmide tetraédrica compacta: um átomo de nitrogênio está localizado bem sobre o centro de um triângulo de átomos de hidrogênio, como mostra a Figura

12-3.

As ligações por valência atômica são mais parecidas com molas do que com varinhas retas. Assim, a amônia “prefere” que haja certa distância entre seu nitrogênio e seus três átomos de hidrogênio. Perto demais, a “mola” empurra um pouco o nitrogênio; longe demais, puxa-o para mais perto, exatamente para o ponto desejado, de maneira que a molécula descanse em sua “bacia de atração” mínima, dentro da “paisagem de energia” da amônia. A Figura 12-4 mostra essa bacia.

Dependendo da temperatura (até que ponto o sistema é sacudido, isto é, excitado), a amônia permanecerá em uma configuração que corresponda mais ou menos a seu estado de energia mínima, vibrando para fora e para dentro, mas sempre perto do estado ideal. Todavia, há de fato dois estados ideais, porque o átomo de nitrogênio se sentirá tão confortável embaixo dos três átomos de hidrogênio como em cima deles. Assim, o panorama de energia lembra de fato o gráfico da Figura 12-5a.

Isso significa que, caso o nitrogênio se encontre no centro exato do plano formado pelos átomos de hidrogênio, a mínima sacudidela o lançará pela ladeira de energia, tanto para baixo como para cima. Como um guarda-chuva que foi empurrado para a horizontal pelo vento, a amônia pode tanto se abrir ao contrário como retornar ao estado anterior.

Se a amônia for aquecida o suficiente, o nitrogênio voltará para o centro e, em longo prazo, uma coleção de moléculas de amônia aquecidas, todas as quais iniciaram o processo com o nitrogênio na parte de “cima”, acabará com metade delas (a qualquer tempo) “embaixo”, conforme representado pela Figura 12-5b.

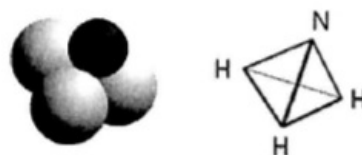


FIGURA 12-3. Molécula de amônia (NH_3).

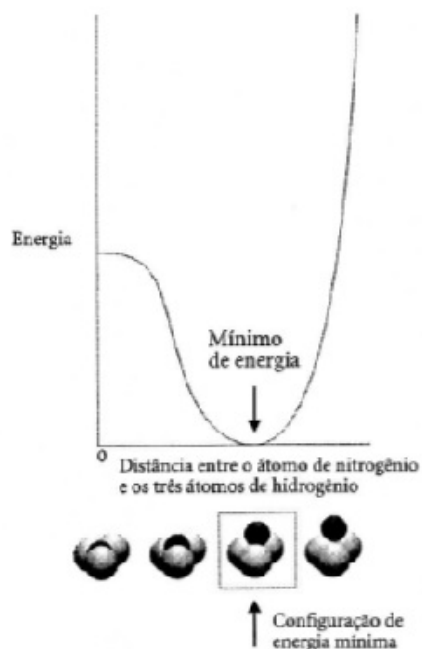


FIGURA 12-4. A energia do NH_3 como função da distância entre o nitrogênio e o centro do triângulo de hidrogênio. A configuração de energia mais baixa é a da molécula contida no quadrado. Acima aparece a paisagem de energia mínima.

Vamos resfriar a amônia até uma temperatura tão baixa que o nitrogênio possa deslizar através dos hidrogênios apenas de vez em quando, porque ele quase nunca é sacudido o suficiente para atingir o ponto médio. Desse modo, se todas as moléculas de amônia têm o nitrogênio na parte “superior”, esperamos que todas permaneçam assim, com o nitrogênio “em cima”. Podemos arranjar o preparado para que leve séculos até que uma distribuição de 50x50 se desenvolva. Mas, de fato, não importa até onde a temperatura diminua, as moléculas de amônia são quase imediatamente descobertas em uma distribuição igual de configurações com o nitrogênio na parte superior e na parte inferior. Isso acontece porque o átomo de nitrogênio “passa por um túnel”, através do plano do triângulo de hidrogênio, a despeito da barreira de energia, do mesmo modo que ocorre com o enrijecimento quântico. Os dois mínimos de energia são idênticos e nenhum é favorecido, e ambos são igualmente representados. A molécula de amônia executa uma “vibração” complicada e impossível, na qual, durante metade do tempo, pode ser encontrada próxima de um mínimo, e metade do tempo próxima do outro. (Podemos apenas dizer: “Ela pode ser encontrada próxima”. Não podemos dizer: “Ela está próxima”. Antes que o detectemos, o átomo de nitrogênio “está”, ao mesmo tempo, em toda parte e em parte alguma, com uma gama de “densidades de amplitude de probabilidades”). Em outras palavras, a natureza quântica da realidade causou um problema de otimização que pode ser resolvido de uma determinada maneira, sendo

impossível fazê-lo de qualquer outra forma - a molécula de amônia atinge e se mantém, ao mesmo tempo, em ambos os seus mínimos de energia iguais, sem que nada (como uma sacudida provocada por aquecimento) faça com que se desloque.

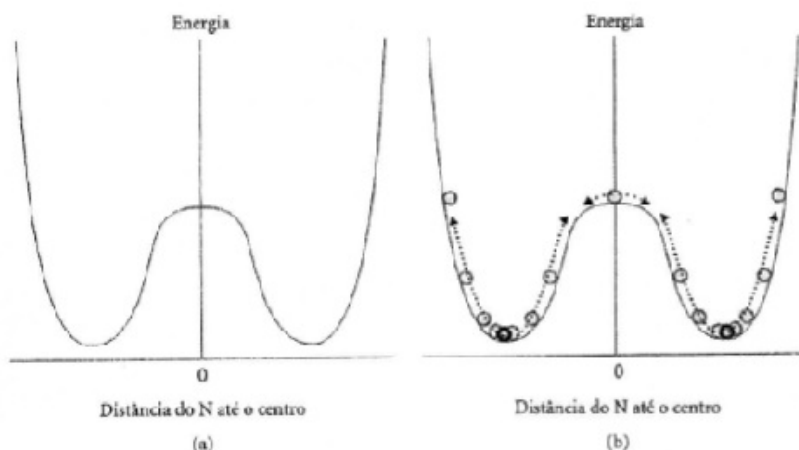


FIGURA 12-5. (a) Paisagem de energia simétrica para NH_3 . (b) O átomo de nitrogênio da amônia ocupa várias posições em ambos os lados do pico de energia.

Superposição de amônia: escorrimientos quânticos

Os dois mínimos de energia para a molécula de amônia são muito favoráveis. Como resultado, a molécula, durante a maior parte do tempo, se encontra “nos” dois estados. Todavia, falando de maneira mais clara, trata-se de uma superposição de todos os estados possíveis, com uma densidade de probabilidade para cada estado que corresponde à profundidade de seu poço de energia - quanto mais você descer no “poço”, maior será a densidade probabilística nesse ponto. Entretanto, nesse caso, e em contraste com a experiência da fenda dupla, essa função da densidade probabilística não varia apenas com a distância (em qualquer direção) do centro do triângulo de hidrogênio; varia também no tempo. Mais exatamente: a distribuição da densidade de probabilidades escorre para trás e para a frente, de um lado para outro, e age assim porque envolve sutilezas que precisamos mencionar neste livro, de passagem. Mas veja a coisa deste modo: se a probabilidade pode formar ondas e interferir, por que não deveria ser também capaz de escorrer? De qualquer maneira, a molécula de amônia é intrinsecamente uma dinâmica quântica. A superposição é construída por proporções diferentes de cada estado possível, e essas proporções variam ritmicamente no tempo. Os escorrimientos não significam, portanto, que a molécula de fato vai para trás e para a frente entre seus dois estados de baixa

energia, de tal modo que esteja em um deles a um determinado tempo e no outro um pouco mais tarde. Ela está *sempre* superposta em ambos. Entretanto, é a possibilidade de conseguir capturá-la que realmente se manifesta através desses escorrimientos ou respingos.

Também podemos explicar desta maneira: as regiões de energia superior e inferior de uma molécula de amónia são como duas bacias colocadas no mesmo nível, uma ao lado da outra, mas conectadas pelos fundos por meio de uma mangueira em forma de U. (Recorde os túneis de energia do enrijecimento quântico.) Sem a mangueira, se colocarmos água em uma das bacias enquanto a outra permanecer vazia, o sistema permanecerá justamente desse modo. Acrescente a mangueira e a água vai ficar correndo para cá e para lá, de uma para a outra. Se não houver fricção, a água vai ficar correndo entre as bacias para sempre. Agora, pense que o conjunto está tão repleto de água que sempre exista um pouco de água em toda parte, mas organizado de tal forma que a maior parte da água fique viajando para cá e para lá. Desse modo, a quantidade de água, em qualquer localização, representa a probabilidade de se encontrar ali aquele átomo de nitrogênio. A própria probabilidade obedece a regras matemáticas lindas e claras; porém, o encontro de um átomo de nitrogênio de uma molécula individual de amónia em uma localização real não obedece a quaisquer regras. Conforme foi descrito por Max Born: “O movimento das partículas obedece às leis das probabilidades, mas a própria probabilidade se propaga em conformidade com a lei da causalidade”³.

Muitos correrão de uma parte para outra (e o conhecimento será multiplicado) - Daniel 12,4

Não é assim tão fácil falar a respeito da posição dos átomos de nitrogênio na molécula de amónia sem estar, de alguma forma, incorreto. No entanto, vamos dizer: “As equações da onda de escorrimiento nos fornecem um quadro (em constante modificação) da probabilidade de se encontrar o nitrogênio em qualquer ponto nos extremos superior ou inferior ou em posição intermédia a eles”. Sob as condições normais (da física clássica), isso também significaria: “O nitrogênio se encontra em um desses pontos - nós apenas não sabemos qual é; somos somente capazes de designar uma probabilidade para cada ponto. A melhor conjectura quanto ao ponto em que de fato se encontra - como a miçanga embaixo de alguma das conchas em um jogo de conchas - é, naturalmente, o ponto que goza das maiores probabilidades”.

Porém, no mundo quântico, a última declaração seria falsa. A primeira declaração diz que há apenas “uma probabilidade de se encontrar o átomo de

nitrogênio” em qualquer ponto dado - uma coisa que é literalmente verdadeira. Se, de fato, fizermos algo para tentar encontrar esse átomo - levantar todas as conchas do jogo de conchas, por exemplo -, ele será visto em um ponto particular, do mesmo modo que os elétrons da experiência da fenda dupla, que acabam por descansar em uma localização específica. Mas, antes que consigamos, de fato, detectar sua posição, o átomo de nitrogênio não possui uma posição fixa; encontra-se em uma distribuição ponderada das médias de todas as posições possíveis, ou seja, em uma superposição.

Veja só que boas vibrações

A despeito do acaso e da indeterminação completos e absolutos (ainda que probabilisticamente ponderados) sobre onde encontraremos o átomo de nitrogênio no caso de irmos atrás dele, quando não estivermos olhando, a distribuição de probabilidades escorre para a frente e para trás, com uma precisão mecânica incrível, determinando na molécula de amônia uma frequência natural permanente de Vibração” quântica: $2,3786 \times 10^{10}$ ciclos por segundo. Essa frequência é tão rápida e tão precisa que há muito tempo é usada como base para relógios de alta tecnologia. (Hoje, outras vibrações quânticas ainda mais rápidas vêm sendo utilizadas de forma semelhante.)

A maior parte dos efeitos de tunelamento conhecidos pelos físicos - como aqueles que discutimos neste capítulo - ocorre em escalas muito pequenas e dentro de situações biologicamente inertes. A possibilidade de esses efeitos serem explorados e amplificados para nosso próprio uso - como no desenvolvimento de materiais eletrônicos, por exemplo - só é factível por meio da aplicação de tecnologias intensivas extraordinárias e sob condições muito controladas.

Resumindo em uma casca de noz, é por isso que a maioria dos cientistas duvida que os fenômenos quânticos se demonstrarão como uma parte significativa de nossa compreensão de qualquer coisa viva, quanto mais alguma coisa relativamente imensa e complicada como nosso próprio cérebro. Não podemos esperar que os fenômenos quânticos nos permitam escapar do mundo da física clássica, com seu determinismo mecânico e ausência de liberdade. Entretanto, para entender as formas sutis que determinam por que esse posicionamento está incorreto, precisamos primeiro penetrar mais fundo nos mistérios quânticos e em suas aplicações - em particular, precisamos apreender alguma coisa das conexões peculiares que o “mistério” quântico nos revela existir entre a matéria e as informações. A partir daí, estaremos preparados para descer mais profundamente na estrutura da vida, especialmente na estrutura do

cérebro humano, uma entidade material que a natureza projetou de uma forma magnífica, segundo nos parece, justamente para processar informações.

13. ESTRANHO EM UMA TERRA ESTRANHA

(quanto mais estranho, melhor)

A sanidade, segundo me parece, não é um cânone da ciência.
Julian Schwinger, *Relatório de progresso: transferência de energia em um processo de fusão a frio e sonoluminescência* [1991].
(Schwinger compartilhou o Prêmio Nobel de Física, em 1965, com Sin-Itiro Tomonaga e Richard Feynman, por seu trabalho conjunto no campo do desenvolvimento da eletrodinâmica quântica)

Os físicos tiveram muita dificuldade para engolir a pílula amarga do acaso absoluto. Todavia, com o passar do tempo, acabaram conseguindo. Entretanto, esta era a primeira de muitas pílulas desse tipo que teriam de engolir com extrema dificuldade, pois existem muito mais “pílulas amargas” na estranheza quântica do que a simples casualidade absoluta - de fato, muito mais do que nos parece ser útil. A partir deste capítulo, vamos nos deter mais e com maior serenidade em alguns dos estranhos efeitos da física quântica e em algumas formas como esses efeitos podem ser implementados, visando a gerar uma espantosa inteligência - e, mesmo, uma capacidade para um tipo de inteligência que não parece ser simplesmente humana, mas super-humana. Nosso intuito é entender qual é a relação, se é que existe, entre esses estranhos efeitos e nossos próprios cérebros e mentes. O elo-chave entre todos esses efeitos é o relacionamento peculiar e íntimo entre os fenômenos quânticos e a informação. Descobriremos que, se a matéria é em sua essência quântica, a matéria é informação.

Informação máxima

Imagine aquele nosso antigo jogo das conchas cobrindo uma miçanga, mas utilizando apenas duas conchas. A pessoa que está embaralhando as conchas rapidamente não está trapaceando - ela, na verdade, é muito rápida. Há dois resultados possíveis e, em cada caso, haverá somente um: ou a miçanga está embaixo da concha esquerda (um estado que chamaremos de “E”, como em “E é o caso”) ou está debaixo da concha direita (um estado referido como “D” ou “D

é o caso”). O fato de nos referirmos a E ou a D conforma um bit de informação binária. Poderíamos pensar que o estado do jogo de conchas é o mesmo que “o estado de uma célula em um autômato celular” - uma “célula” com apenas dois estados possíveis e, assim, o estado de sua ignorância com relação a E ou D é o mesmo estado de 0 bits de informação sobre “sua” localização - em uma célula adjacente. A partir do momento em que ficamos sabendo onde se encontra a miçanga - se o caso é E ou D -, um bit de informação foi copiado da célula das conchas para sua própria célula. Mas, neste momento, as duas conchas estão fechadas, isto é, cobrindo ou não a miçanga; e você possui apenas 0 bits de informação.

Agora, você coloca o dinheiro da aposta na mesa e levanta uma das conchas. Se o jogo for honesto, quer a miçanga esteja ali ou não, quer o resultado seja D ou E, quer ganhe ou perca, você adquire um bit de informação binária: sabe, com 100% de certeza, onde a miçanga está. Na vida real, iria, com certeza, confirmar essa informação erguendo a segunda concha - para ali encontrar realmente a miçanga encoberta.

Digamos que a pessoa remexe as conchas de novo. Outra vez, você tem apenas 0 bit de informação. O único bit que possuía foi apagado. De cada vez, uma nova peça de informação é precedida pelo apagamento da anterior. O lugar em que a miçanga se encontra, dessa vez, não lhe diz nada sobre onde estava, após qualquer embaralhamento anterior.

A partir disso, vamos jogar o jogo das conchas quânticas, no qual poderemos utilizar qualquer uma entre a série de situações binárias possíveis. Por exemplo, podemos usar os dois mínimos de energia de uma molécula de amônia ou os estados de rotação para cima *versus* rotação para baixo de um elétron ou de um núcleo atômico. Mas o mais fácil de visualizar e de entender (até certo ponto!) envolve fótons de luz. Este é um modelo que foi implementado experimentalmente, ao que poderemos, desse modo, aplicar parte de nossa discussão, realizada em páginas precedentes, sobre a experiência da fenda dupla.

Em vez de projetar um feixe de luz em direção a uma barreira com aberturas, vamos lançar o feixe contra um dispositivo denominado *beam splitter* [separador de feixes luminosos], que consiste de um vidro muito puro e coberto de prata em um dos lados: ou “espelho de visão única”. Quando disposto no ângulo adequado, metade da luz é transmitida por meio do vidro, e a outra metade é refletida, como ilustrado na Figura 13-1.

Teremos também de controlar, com muito cuidado, as condições. Em primeiro lugar, toda a luz que utilizarmos, quer sejam inúmeros fótons, quer somente alguns, virá de um *laser*, de modo que seja uma luz coerente (com todas as ondas em sincronia). Em segundo lugar, não devem existir irregularidades de

qualquer tipo (como pequenos calombos) na superfície do separador, que façam com que determinados fótons se comportem de maneira diferente dos demais. Se pensarmos na luz projetada como uma onda pura e contínua, tudo o que o divisor faz é permitir que metade do “brilho” passe por ele sem resistência, enquanto a outra metade se refletirá a 90° .

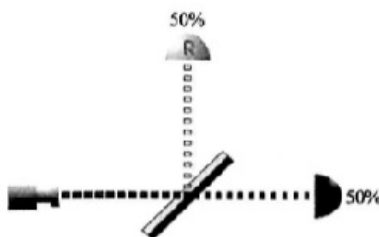


FIGURA 13-1. Separador de feixes luminosos. Metade da luz é refletida (R = dirigida para cima) e metade transmitida (T = permitida sua passagem por meio do espelho).

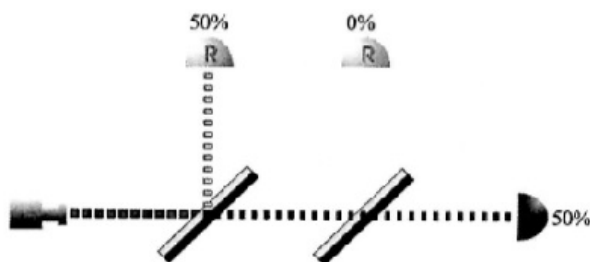


FIGURA 13-2. Hipótese: “Um feixe luminoso de puros fótons T (luz transmitida) deve ser 100% transmitido por meio de um segundo separador de feixes”. Certo ou errado?

Porém, a questão não é tão simples quando consideramos que o feixe de luz é composto por partículas individuais, os fótons. O fato de que este separador de feixes luminosos é praticamente perfeito, combinado com o fato de que metade da contagem dos fótons aparece em um detector e metade na outra, nos leva a pensar se não existem dois tipos de fótons: aqueles propensos a ser transmitidos (fótons T) e aqueles predispostos a ser refletidos (fótons R). As estatísticas revelam uma divisão geral de 50:50 entre os tipos T e R. No entanto, a ordem com que eles emergem é aleatória - do mesmo modo que a sequência de crianças do sexo masculino e feminino que nascem em um hospital.

Assim, talvez o separador seja um tipo de filtro que não está, de maneira ativa, afetando partículas idênticas, mas sim, ao contrário, classificando passivamente fótons diferenciados de um modo muito sutil. Uma vez que todos os fótons R foram dirigidos para cima e todos os fótons T transmitidos para a frente, podemos fazer a seguinte previsão: se colocarmos um segundo e idêntico separador de raios luminosos alinhado com o primeiro, o segundo separador será

atingido apenas por fótons T. Todos esses fótons, portanto, deverão ser transmitidos por meio do segundo separador, sem que nenhum seja refletido, conforme mostra a Figura 13-2.

Considere o primeiro arranjo, com um único separador. O *laser* funciona como um embaralhador de conchas. Não temos meios de saber sobre o tipo de um fóton emergente até que tenhamos levantado uma concha, isto é, até que tenhamos visto qual detector registra o embate desse fóton. Se for o detector R, sabemos que o fóton é do tipo R; se não for, saberemos com 100% de certeza que pertence ao grupo T e que o detector T irá registrá-lo. Na realidade, sequer precisamos de um detector T, pois ele apenas levanta a segunda concha para confirmar que é ali que se encontra a miçanga, pois ela não estava embaixo da primeira. Se, de fato, o utilizarmos, sempre irá confirmar o que já sabemos, não nos acrescentando nenhuma informação nova, do mesmo modo que levantar a segunda concha não aumentaria em nada os nossos conhecimentos. Obtemos 1 bit binário de informação, não importa o que aconteça.

Dentro dessa linha de raciocínio, acrescentamos ao sistema o segundo separador. Tudo o mais permanece exatamente igual. O segundo separador de feixes luminosos adia o momento em que levantamos a segunda concha para confirmação, e nenhuma nova informação pode ser obtida. Temos um bit - nada mais que isso. Afinal, um fóton passando através do sistema carrega consigo somente um bit binário de informação - ou ele é R ou é T -, e já recebemos essa informação quando ele passa pelo primeiro separador de feixes luminosos. Não há mais nenhuma informação produzida pelo segundo separador, porque já extraímos toda a informação possível na passagem pelo primeiro. E isso que nos diz o bom senso.

Todavia, não é isso que acontece - nem mesmo se fizermos passar cada fóton de uma vez, separadamente, pelo mesmo ponto. Não importa as precauções que tomemos para garantir que estamos lidando com um feixe puro e coerente de idênticos fótons T, pois, quando enviamos esse feixe puro e coerente através de um segundo separador de feixes, esse separador, mais uma vez, classifica os fótons aleatoriamente em fótons T e fótons R - a despeito do fato de que não existe nada no separador que seja capaz de causar este fenômeno (veja Figura 13-3).

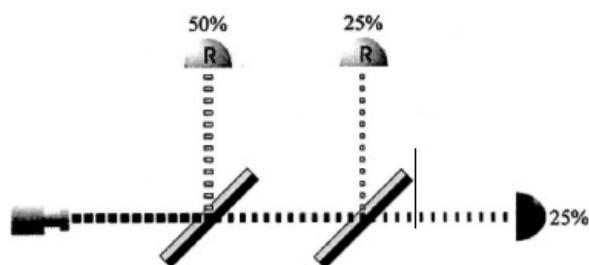


FIGURA 13-3. Realidade: depois de passar através de um separador de feixes luminosos que permite apenas a passagem de puros fótons T, um segundo separador de feixes, de algum modo, realocoriza os fótons T em proporções iguais de T e de R.

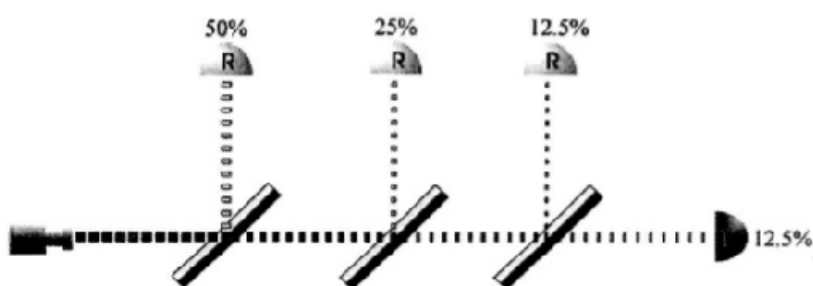


FIGURA 13-4. Uma sequência de separadores de feixes converte uma mistura de 50 por 50 de fótons R e T em uma percentagem arbitrariamente grande de fótons R.

E, de novo, nos perguntamos: “Mas como pode ser isso?” Sabemos que a classificação não é ocasionada por alguma coisa presente no separador de feixes e, portanto, deve estar relacionada a algo que existe nos fótons. Só que agora acabamos de provar que não é alguma coisa que existe nos fótons, mas deve ser algo que se encontra no separador de feixes.

Veja como é estranho. A medida que as crianças nascem em um hospital, as meninas são conduzidas por uma porta para uma sala cor-de-rosa, enquanto os meninos são levados, por outra porta, para uma sala azul. Mas, quando os bebês são retirados dali, seja da sala rosa, seja da sala azul, em portas que ficam no extremo oposto às portas de entrada nessas salas, mais uma vez são classificados em meninos e meninas.

Existe uma “resposta” para este dilema, que funciona com relação a fótons e outras entidades quânticas, mas não serve para mais nada: os fótons T não estão se transformando em fótons R e vice-versa, porque não são simplesmente fótons T ou fótons R em seu estado inicial. Depois de passarem pelo primeiro separador de feixes, os fótons se encontram em *superposição* de estados R e T. Quando medidos, depois de terem atingido um dos dois detectores - porém não antes! -, tornam-se exclusivamente T ou R e o estado em que um fóton, em particular,

aparecerá é uma ocorrência totalmente aleatória, mas com probabilidades em longo prazo de 50 por 50. E na detecção de um fóton que este é forçado a “escolher” entre R e T. Antes disso, ele é, ao mesmo tempo, os dois e nenhum deles.

Para este estranhíssimo estado de coisas, existem algumas consequências informacionais que não são menos do que evidentes por si mesmas. Por um lado, se você continuar enviando uma mistura de fótons (supostamente) R e T, através de uma série de separadores de feixes, todos orientados na direção T, irá pouco a pouco “convertendo” uma percentagem total cada vez maior de fótons para o tipo R (veja Figura 13-4).

Mas, de fato, é o oposto que desperta o interesse maior: considere um único fóton atingindo o primeiro espelho na linha de separadores de feixes. Ele tem uma chance de 50 por 50 de ser registrado como pertencendo ou ao tipo R ou ao tipo T. Vamos supor que seja do tipo R: é refletido e sua chegada é registrada no Detector R nº 1 (à esquerda da Figura 13-4). Suponhamos que seja do tipo T: neste caso, deveríamos supor que o fóton do tipo T fosse transmitido através de cada um dos separadores de feixes em sucessão, até atingir o Detector T na extrema direita, no final da série (que podemos tornar tão longa quanto quisermos). Portanto, uma vez que nenhum detector R irá registrar um embate, nenhum detector R, além do primeiro da série, poderá nos transmitir qualquer informação adicional.

Só que não é esta a maneira como a coisa funciona. Em vez disso, há uma chance de 50 por 50 de que o fóton seja do tipo R e, se for assim, ele atingirá o Detector R nº 1. *Deste modo, nós ganhamos aquele 1 bit binário de informação que é transportado pelo fóton*, o que quer dizer que ficamos sabendo de alguma coisa que não sabíamos antes - a qual dos dois tipos (portanto, uma informação “binária”) pertence o fóton. Porém, se ele não atingir o Detector R nº 1 e prosseguir avançando para o separador de feixes nº 2 (levando junto consigo o seu único bit de informação), subitamente e de novo há uma chance de 50 por 50 de que seja ou refletido, ou transmitido. Se for refletido, será detectado quando atingir o Detector R nº 2, o que vai significar que sabemos agora que foi transmitido através do separador de feixes nº 1 - 1 bit de informação - e, então, refletido pelo separador de feixes nº 2 — o que nos dá *um segundo bit de informação*.

Podemos colocar quantos separadores de feixes luminosos quisermos nesta fila. O detector que um fóton em particular irá atingir é um processo aleatório (dentro de certas probabilidades no resultado agregado) e existe também alguma possibilidade de que o fóton possa não ser detectado por qualquer um dos

dispositivos, não importa até que ponto se prolongue a linha. O detector que registrar o embate revela a sequência exclusiva de reflexões e transmissões que o precedeu. Em vez de apenas R ou apenas T - um único bit binário -, podemos obter, digamos, uma série TTTT (cinco oportunidades seguidas de 50 por 50 se traduzem por $2^5 = 32$ bits) ou TTTTR (também $2^5 = 32$ bits) ou TTTTTTTT ($2^7 = 128$ bits). Se acrescentarmos um novo separador de feixes luminosos depois de cada divisão (na Figura 13-4, imagine linhas de separadores também na direção vertical), poderemos obter todas as combinações possíveis de R e de T, sem limites.

Deste modo, dentro da restrição imposta pelas regras, mas de outro modo na absoluta aleatoriedade deste sistema quântico, parece existir um potencial para um número infinito de bits de informação. Assim, *o acaso absoluto implica informações infinitas*. Cada vez que um evento quântico sem causa surge, tornase uma nova peça de informação no Universo, que não se achava ali antes e que não era, de forma alguma, ocasionada por uma cadeia de eventos prévios.

Um retorno a senda alguma

Segundo um outro raciocínio, retornamos às partículas quânticas que não possuem caminho algum para percorrer e, no entanto, percorrem, ao mesmo tempo, todas as sendas possíveis. O feixe, ou um fóton individual, não está sendo, na verdade, classificado como pertencendo aos tipos **R** ou **T**. Deste modo, não podemos afirmar que esteja viajando ao longo de uma trajetória ou da outra - nem na vertical para **R**, nem na horizontal para **T**. A partir do momento em que deixa para trás o separador de feixes, o feixe (ou um fóton apenas) se encontra em um estado de superposição *tanto de R como de T* do mesmo modo que, no momento em que ambas as fendas estiverem abertas, o fóton do experimento da fenda dupla se encontra em superposição. E é essa superposição que carrega os bits extras de informação, com um potencial para um número infinito de bits.

Agora, suponhamos que você não concorde: “Superposição? Mas como é que se sabe disso? Por exemplo, não vejo qualquer evidência de que haja uma interferência”. Não existe interferência porque, depois que o fóton atinge o primeiro separador de feixes, seus componentes (superpostos) são dirigidos um para longe do outro. Para fazer com que interferissem, teríamos de redirecionar os dois meio-feixes de tal modo que se interseccionassem. Vamos fazer isso acrescentando dois espelhos comuns ao conjunto. Mas vamos também reposicionar o segundo separador de feixes e acrescentar uma segunda fonte de fótons coerentes, a fim de criar o arranjo da Figura 13-5. Por “coerente” queremos dizer que ambas as fontes são *lasers*, os quais, portanto, produzem luz (fótons) de uma frequência única e pura, com ondas, picos e vales para cada fóton, perfeitamente alinhadas (isto é, em fase). Além disso, arranjamos as coisas para que os picos e vales da luz (fótons) de cada *laser* estejam alinhados com os picos e vales da luz proveniente do outro.

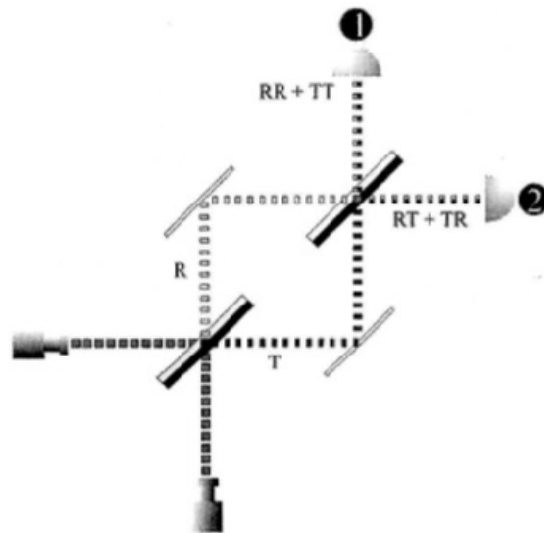


FIGURA 13-5. Um segundo separador de feixes que tanto recombina como divide os feixes previamente divididos. Para chegar ao Detector nº 1, um fóton pode ser refletido duas vezes e transmitido duas vezes (RR ou TT). Para atingir o Detector nº 2, deve ser refletido uma vez e transmitido uma vez (RT ou TR). São mostradas duas ondas de um quarto da altura inicial, que se combinam em cada detector. (Não estamos contando aqui as reflexões provenientes de qualquer um dos dois espelhos regulares.)

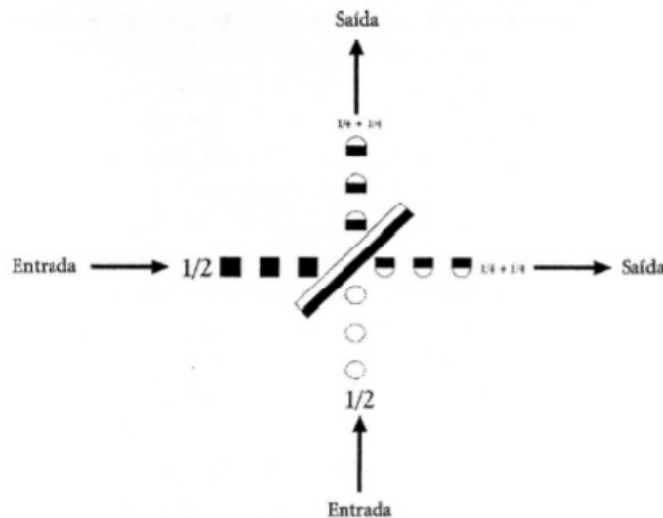


FIGURA 13-6. Detalhe do segundo separador de feixes, administrando agora duas fontes de fótons.

O segundo separador de feixes luminosos faz, agora, duas coisas ao mesmo tempo: divide os dois meio-feixes da entrada em quartos de feixe, e os recombina em dois novos meio-feixes, conforme mostrado na Figura 13-6.

Existe, sem dúvida, uma superposição, e *um único fóton co-produzido pelas duas fontes* tem a capacidade de interferir consigo, podendo ser descrito como

segue. (o Apêndice C explica o que significa a frase em destaque e discute a famosa experiência Pfleegor-Mandel que a demonstrou. Em resumo: não somente os fótons viajam ao longo de todas as trajetórias possíveis ao mesmo tempo, como o ponto de origem da trajetória pode ser também uma superposição. Para mais detalhes sobre a discussão precedente, veja *The Feynman processor*, de Gerard J. Milburn [Massachusetts: Perseus Books, 1998]). Perguntamos: “As intensidades dos feixes que emergem do segundo separador são iguais?” São, de fato, mas apenas neste arranjo. Porém, existe alguma coisa diferente em relação ao segundo separador nesse arranjo que ainda não mencionamos: um dos dois meio-feixes o atinge pelo lado de trás.

Essa constatação é importante porque os feixes de partículas também são ondas. Para fazer com que os quartos de onda recombinados enfoquem diretamente no final com respeito a suas fases, o segundo separador de feixes luminosos deve transmitir, sem mudança, a onda que passa por ele da parte da frente para a de trás, e precisa também *revirar* a onda que o atravessa de trás para a parte dianteira. Essa volta é o mesmo que colocá-la 180° fora de fase - seus picos se transformam em depressões ou vales, e seus vales ou depressões viram picos (veja Figura 13-7).

Cria-se, assim, uma oportunidade muito interessante. Se resolvermos mover um dos espelhos regulares um pouquinho, poderemos encompridar uma das sendas e criar uma diferença de fase de qualquer proporção entre os diversos quartos de feixe. Dependendo da diferença entre as sendas superior e inferior, podemos fazer com que os dois quartos de feixe dirigidos verticalmente se combinem de forma construtiva, enquanto os quartos de feixe horizontalmente dirigidos se combinam de forma destrutiva ou vice-versa, ou quaisquer outras combinações.

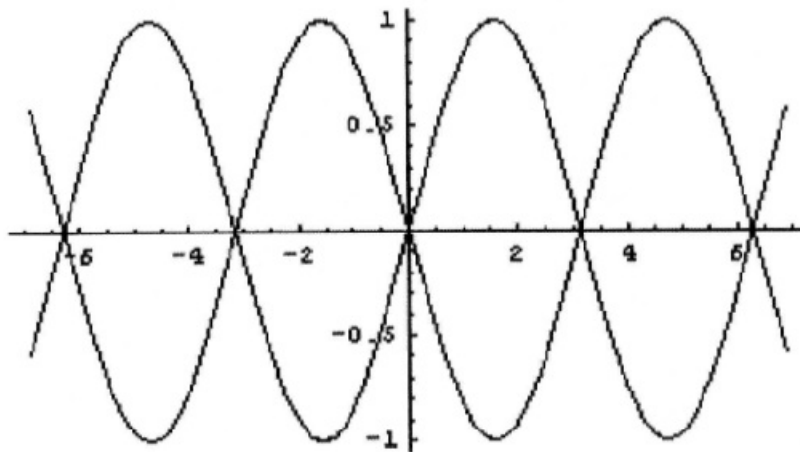


FIGURA 13-7. Duas ondas fora de fase por 180° , a maior diferença possível. Se duas ondas deste tipo forem adicionadas uma à outra, irão se cancelar uma à outra (100% de interferência destrutiva). Se forem colocadas fora de fase a 360° , irão, automaticamente, entrar em fase de novo (100% de interferência construtiva).

Em particular, podemos arranjar as coisas de maneira que as intensidades da luz medida pelos dois detectores variem de maneira inversa uma com relação à outra. Em um extremo, todos os fótons atingem um dos detectores e nenhum atinge o outro. No outro extremo, ocorre o inverso. No ponto mediano, haverá uma razão de 50 por 50, como transcorria anteriormente. Essa realidade só pode ser explicada por ação de interferência. De certo modo, é uma variação singular da experiência da fenda dupla, só que, desta vez, as “fendas” não exigem “tudo ou nada”; sua “penetrabilidade”, por assim dizer, é um fenômeno ajustável.

Este é o ponto importante, destacado por este arranjo ajustável. Um fóton se encontra em estado de superposição de todas as suas partes *até que atinja um dos dois detectores*. No momento em que ocorre o encontro, a superposição entra em colapso. Tecnicamente, a superposição inclui sendas inesperadas e capazes de vagar por todo o Universo. Todavia, devido ao arranjo físico de aparato - um “todo” distinto em si mesmo, apresentando qualidades que são maiores do que a simples soma de suas partes -, todas as sendas inesperadas interferem umas com as outras de uma forma muito destrutiva. Restam apenas duas sendas com quaisquer probabilidades significativas, cada uma podendo ser atingida por duas rotas diferentes: RR ou TT Detector n-1; RT ou TR Detector n-2. Dessa maneira, do mesmo modo que na experiência da fenda dupla, não existe como determinar qual o caminho que um fóton individual irá tomar sem interferirmos e, de certo modo, alterarmos o “todo”; ou, mais precisamente, detectar “qual caminho” força o fóton a escolher um caminho, e é esse o caminho que detectamos. Mudando minimamente a posição dos espelhos, podemos ajustar à vontade a

fração de detecção relativa a cada passo, em um grande número de casos. No entanto, como é usual em todos os assuntos que se referem aos *quanta*, o resultado é aleatório para cada evento de detecção individual.

Quando uma dessas situações se estabelece entre duas sendas (ou mais), consideramos as sendas “indistinguíveis”, ou seja, a distribuição final de probabilidades para os dois resultados é determinada por “amplitudes de probabilidades”, um fenômeno ondulatório puramente quântico, que permite a interferência.

O controle sobre a interferência das amplitudes de probabilidades quânticas leva, de modo direto, a determinadas aplicações, não apenas estranhas, mas sim espantosas: na computação quântica, por exemplo, em que uma rede de processamento paralelo é criada - por favor, suspenda sua descrença por um momento - por um *único* elemento de processamento quântico, que distribui cópias de si mesmo por todo o Universo, e por múltiplos universos, cada uma delas interconectada a todas as demais. (o processamento paralelo, usando estados múltiplos e superpostos de um objeto individual já foi, de fato, realizado. A interpretação de uma superposição como sendo uma conexão temporária entre versões da mesma coisa em múltiplos universos é aceita, por enquanto, por somente uma minoria dos pesquisadores sérios neste campo. Mas, entre estes, se encontram alguns de seus fundadores - David Deutsch, por exemplo, do Departamento de Física da Universidade de Oxford).

O restante de todos os mundos possíveis

Vamos, agora, determinar o comprimento das sendas para que todos os fótons cheguem ao Detector n-1. Se fizermos qualquer outra ação, com a intenção de aprender qual dos dois caminhos (RR ou TT) será tomado por um determinado fóton buscando chegar lá - por exemplo, inserindo outro detector em seu caminho, na localização n^o 3 - (veja Figura 13-8), interferimos na superposição e a interferência desaparece. Um deslocamento do espelho não irá provocar mais a criação de uma variação recíproca da intensidade (frequência de detecção) nos Detectores n-1 e n-2. Desse modo, forçamos o fóton a “escolher” um dos dois caminhos que divergem do primeiro separador de feixes. (Também poderíamos fazer com que alguma coisa ricocheteasse os fótons R - um outro fóton, por exemplo. Mesmo que estes acabassem batendo contra o Detector n-1, não trariam entre si a mesma relação de fase, o que destruiria a coerência e, portanto, a superposição.)

Entretanto, leia com atenção: um detector de “qual caminho” foi seguido, localizado no ponto n-3, destrói a superposição *quer o fóton seja de fato detectado pelo Detector n- J, quer não o seja*. Mesmo assim, metade do tempo, o

fóton não se dirigiria ao Detector n-3, mas, em vez disso, se moveria na direção do segundo separador de feixes. O senso comum nos diz que, para qualquer fóton transmitido pelo primeiro separador de feixes, a presença ou ausência de um Detector n-3 deveria ser irrelevante. No entanto, não é isso que ocorre, porque, agora, a posição do espelho superior é irrelevante. Sem interferência e sem recombinação dos quartos de feixes, o segundo separador de feixes simplesmente divide o feixe de entrada. Resultado: metade dos fótons é detectada pelo Detector n-1 e metade pelo Detector n-2. Um resultado final corretíssimo - cada fóton será detectado pelo Detector n-1 quando o Detector n-3 se encontrar ausente — se converte em um resultado absolutamente incerto - alguns fótons são detectados pelo Detector n-1, alguns pelo Detector n-2 e outros pelo Detector n-3, quando o Detector n-3 estiver presente.

Muitos desses arranjos de separação de feixes luminosos (vamos chamá-los de “portões quânticos de dois bits”) podem ser interligados, com o objetivo de formar redes de qualquer arquitetura desejada. Assim, por exemplo, podem-se encadear dois portões, um após o outro, e, então, em vez de duas sendas indistinguíveis entre si e superpostas conduzindo à saída, teremos quatro. Se forem alinhados três portões, teremos oito sendas. De um modo geral, n portões criam uma superposição de 2^n sendas indistinguíveis entre si. Podemos também conectar os portões, de modo que as saídas de um portão sejam distribuídas por dois e, depois, por quatro, e assim por diante, da mesma maneira que os neurônios, em redes neurais de processamento paralelo, distribuem suas saídas.

posta, e inserimos uma sonda externa, que a distribuição é feita, e essa será a resposta que obteremos. Mas quem ou o que determina as designações? Ninguém sabe. Sabemos, entretanto, que não é ninguém nem nada que faça parte de nosso universo físico. De qualquer modo, a partir do momento em que inserimos uma sonda para obter uma resposta, a ‘conversação cruzada’ entre os universos (a superposição) entra em colapso.

A computação quântica funciona, portanto, como um processamento paralelo em muitos universos ao mesmo tempo, interconectados em rede ou como um autômato celular, em que cada célula existe simultaneamente em muitos estados diferentes, e estes se localizam em muitos universos também diferentes. Segundo este ponto de vista, são os universos que existem em paralelo; nós apenas tiramos vantagem desse fenômeno e conseguimos realizar uma computação de quatro ou mais bits em um dispositivo de dois bits que só precisa ser construído em um único universo - o nosso. Com tudo o que foi descrito anteriormente, como um ciclo-rama geral, podemos dizer que existe uma forma dramática, mas simples, de captar a pura magia da computação quântica e seu relacionamento

misterioso com a informação (ou, se você preferir, com o “conhecimento”).

A meditação zen e a arte da computação quântica

Um homem está parado no palco, com uma venda negra apertada firmemente ao redor de sua cabeça, o que o torna incapaz de enxergar. Seu terno negro de poliés-ter, imitando couro de tubarão, reflete as luzes da ribalta. Uma mulher da platéia ergue seu punho. Está apertando uma moeda - ou talvez não esteja. O homem inclina a cabeça e esfrega a ponta dos dedos sobre a testa em concentração aparente. A multidão mantém perfeito silêncio. Depois de alguns momentos, ele grita: “Sim!” A mulher abre a mão. A moeda está ali e a platéia explode em um aplauso tumultuoso! “Não”, admite ele, fingindo modéstia para parecer mais convincente. “Eu não acerto todas as vezes.” Mas ele acaba de acertar em 79 tentativas de um total de cem - quase 80% —, o que é melhor que qualquer expectativa aleatória, como o painel iluminado com os resultados nos recorda em brilhantes luzes intermitentes. Esse homem é um genuíno clarividente!...

Na-na-não. Ele é apenas um charlatão esperto, como existiram muitos. Mas o que os charlatões vêm fazendo há centenas de anos é o mesmo que a mecânica quântica parece estar fazendo na realidade. A Figura 13-9 nos mostra, mais uma vez, nosso separador dual de feixes luminosos. As cores foram invertidas, branco sobre preto, porque pretendemos conduzir uma experiência no escuro. Não seremos capazes de dizer se o nosso portão é realmente da forma mostrada à esquerda, com apenas dois detectores, ou é constituído da forma à direita, com a adição de um terceiro. Repetindo: sem a presença do terceiro detector, um fóton de entrada será colocado em superposição pelo primeiro separador de feixes e depois recombinado e redividido pelo segundo.

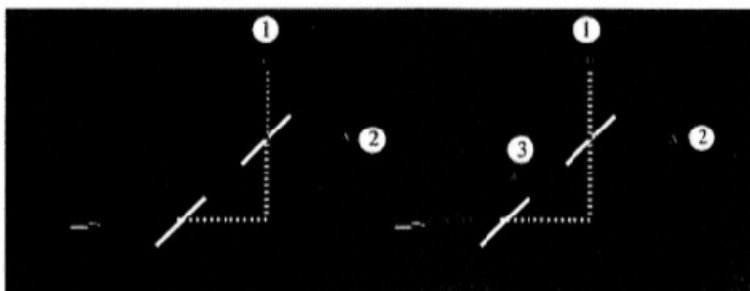


FIGURA 13-9. Conjunto duplo de separadores de feixes (à esquerda) sem a presença de um terceiro; e (à direita) o mesmo conjunto com um terceiro detector na posição número 3.

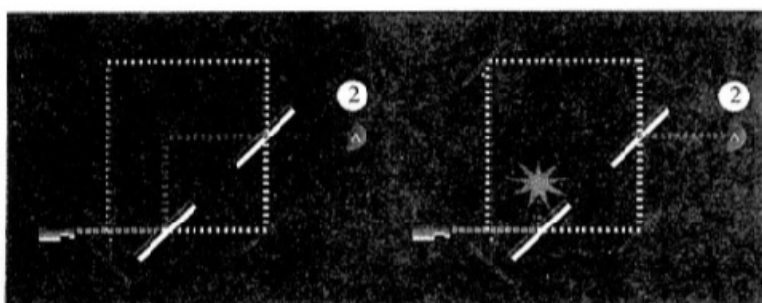


FIGURA 13-10. Um detector quântico de bombas com um único fóton (à esquerda). Não são detectadas bombas no ponto três. O fóton é retransmitido para o sistema. (À direita) Existe uma bomba no ponto três: o fóton é detectado pelo Detector nº 2 ou captado pelo disparador da bomba.

Novamente, os comprimentos das sendas foram ajustados de tal modo que qualquer fóton seja detectado pelo Detector n-1 com 100% de certeza. Mas, com o Detector n-3 no lugar - ou com qualquer outro tipo de barreira -, a superposição (a senda em forma de quadrado fechado à esquerda) é destruída, e quaisquer fótons que não sejam capturados pelo Detector n-3 podem distribuir-se igualmente entre o Detector n-1 e o Detector n-2.

Observe: um fóton pode aparecer no Detector n-2 somente quando o Detector n-3 estiver ali *e* o fóton não o atingir. Em outras palavras, se dispararmos apenas um único fóton e acontecer de ele atingir o Detector nº 2, *então saberemos que o Detector n-3 se encontra ali, mesmo que não tenhamos interagido com ele de nenhuma maneira*. Se a importância disso não lhe parecer suficientemente clara, considere o que iremos dizer a seguir.

Vamos supor que o Detector nº 3 seja de fato um gatilho fotoelétrico sensível ligado a uma bomba - tão sensível que, se for atingido por um único fóton, fará com que você e seu laboratório explodam. O detector e a bomba podem estar ou não ali - não há como saber e você sequer poderá abrir a porta para olhar,

porque, tentando vê-los, teriam de ser primeiro atingidos por raios luminosos que se refletiriam para sua retina e, ao ser atingidos, bastaria para disparar a bomba. Mas você precisa determinar se existe uma bomba em seu laboratório ou não. Vamos imaginar que a realidade seja o que a maioria das pessoas pensa que é - sem estranheza, sem nada quântico ou qualquer outra coisa. Assim, vamos crer, também, que a bomba foi mesmo colocada ah (embora você ainda não saiba se foi ou não). O custo de descobrir este fato, isto é, de adquirir 1 bit binário de informação: o “sim” das duas possibilidades “sim” ou “não”, é uma chance de 100% de detonação. Em resumo, a possibilidade de verificar com segurança se a bomba está ah é zero.

Mas, com a estranheza quântica, e na hipótese de a bomba realmente estar ah, dois fótons em cada quatro irão atingir o Detector $n^2 3$ e fazê-lo em pedaços, enquanto dois o evitarão para atingir o segundo separador de feixes luminosos. Entre estes, um fóton irá atingir o Detector $n^2 1$, que o fará se iludir e pensar que não existe bomba alguma, enquanto um fóton entre cada quatro irá chegar ao Detector $n^2 2$, permitindo que você saiba que a bomba se encontra lá, mas sem jamais chegar a interagir com ela. (Não é de surpreender que este cenário tenha sido imaginado por dois físicos israelenses!...)¹ A possibilidade de detectar a presença da bomba com segurança subiu de zero para 25%. Você adquiriu um bit de informação “a troco de nada”, como por clarividência, mas tem apenas uma chance em quatro de se dar bem - desse modo, vamos chamá-lo “um quarto de bit”. Mesmo assim, é uma peça de informação muito valiosa, considerando qual seria o custo de outro modo.

Mas tudo isso pode ficar ainda melhor. Lembre-se de como, enquanto um único fóton passa através de uma fila de separadores de feixes luminosos, uma quantidade de novas informações ilimitada surge. Não nos esquecendo disso, vamos substituir o Detector $n^2 1$ por um conjunto de espelhos que redirecionem o mesmo fóton de volta ao sistema vezes seguidas, como na Figura 13-10. (O último espelho desli-za para seu lugar antes que o fóton dê a volta completa.) Se não houver bomba, o fóton irá circular indefinidamente (veja Figura 13-10, à esquerda). Se houver, o fóton poderá detoná-la ou ser detectado pelo Detector $n-2$ (veja Figura 13-10, à direita).

Em 1.024 tentativas, 512 fótons detonam a bomba e 512, não. Destes últimos, 256 são detectados em segurança pelo Detector $n-2$, enquanto 256 são recir-culados, conforme é detalhado na Tabela 13-1: $41/(682+341) = 1/3$, de modo que, quando a bomba se encontra lá, as chances de uma determinação segura aumentam para 33%.

Se a razão de transmissão/reflexão dos separadores de feixes for ajustada da maneira adequada, essas possibilidades podem se tornar tão próximas de 50%

quanto quisermos. Paul Kwiat e seus colegas do Laboratório de Los Alamos demonstraram até mesmo que, se uma segunda dicotomia quântica for realizada sobre os feixes divididos (por exemplo, por filtros de polarização), as taxas de determinação segura podem teoricamente aproximar-se de 100%. Recentemente, um grupo de pesquisa na Suécia obteve, mediante experiências práticas, uma taxa de detecção real de 80%.²

TABELA 13-1. Fóton recirculado em esquema quântico de detecção de bombas.

Nº 1 ou recirculado	Explosão	Com segurança	Detectado pelo nº 2
1.024	512	512	256
256	128	128	64
64	32	32	16
16	8	8	4
4	2	2	1
Total	682		341

TABELA 13-2. Questão de cálculo de escolha múltipla.

1. $X = 3$ ☐ (a) $4 + 1 = x$ ☐ (b) $4 = 3 - x$ ☒ (c) $x = 4 - 1$ ☐ (d) $x + 1 = 3$	2. $X \approx 17$ ☐ (a) $\sqrt[1.997]{1.000631477 \times 321}$ ☒ (b) $\sqrt[2.997]{1.003258657 \times 293}$ ☐ (c) $\sqrt[2.103]{1.002165351 \times 338}$ ☐ (d) $\sqrt[1.903]{1.003359821 \times 272}$
---	--

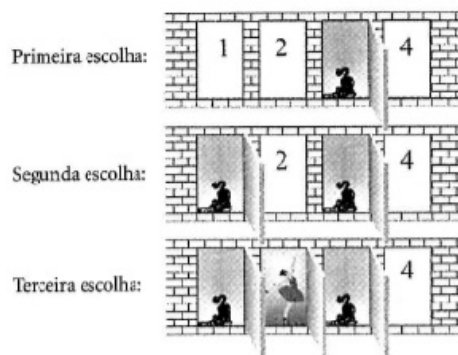


FIGURA 13-11. O Problema da Bailarina e os Três Tigres. É necessário, em média, adivinhar entre duas e três vezes (2,2) para escolher a bailarina. Se uma escolha errada for fatal, há uma probabilidade de três em quatro de que você morrerá na primeira tentativa.

Essa técnica vai mais além do que uma simples classificação por sim ou não.

Kwiat e seus colegas a usaram para medir a espessura de um cabelo humano, o fio de uma faca e um arame fino.³ Kwiat comentou: “Para nós, a próxima etapa lógica é utilizar esse sistema de eficiência mais elevada para produzir imagens unidimensionais de objetos. Se for possível fazer isso, logo será possível obter imagens bidimensionais - de fato, não é muito mais difícil”.⁴

“Isso abriria as portas, por exemplo, para a produção de imagens na área da medicina, porque poderia Ver’ a estrutura interna do corpo sem enviar para dentro dele qualquer tipo de radiação - ou qualquer outra coisa.”⁵

De tecnologia avançada de sinal paralelo para tecnologia avançada de sinal quântico

O primeiro ato de computação quântica completo foi anunciado em 1998, pelo menos dez anos antes do que qualquer pessoa havia previsto ser possível [para o final do século]. O problema que resolveu era de um formato bastante semelhante às questões matemáticas do SAT [o teste de admissão a cursos superiores mais usado nos Estados Unidos], conforme mostrado na Tabela 13-2.

Para produzir as respostas, você deve fazer os cálculos, um de cada vez. (Se isso não ficar evidente na questão 1, ficará ao ver a questão 2.) Em média, quantos cálculos livres de erros deverão ser feitos? A sequência com que testamos as equações não produz efeito sobre estatísticas em longo prazo. Desse modo, há uma chance em quatro de que selecionaremos a resposta correta já na primeira tentativa. O número esperado de cálculos de que iremos precisar fica entre 2 e 3 - mais exatamente, 2,2.

O desafio para selecionar o cálculo correto a ser testado é uma modificação da situação da Bailarina e dos Tigres - em que existem três tigres -, na qual a probabilidade de ser devorado na primeira tentativa é de 75%, conforme mostra a Figura 13-11.

Este é o tipo de situação em que a clarividência seria bastante útil. Empregando computação quântica, portanto, Isaac Chuang, nos Laboratórios da IBM, em Almadén, Neil Gershenfeld, no MIT, e Mark Kubinec, em Berkeley, fizeram uma coisa bastante semelhante, reduzindo a seleção correta de qual equação deveria ser testada a uma única avaliação, ocasionalmente a duas.⁶ Em outras palavras, nove vezes em cada dez eles escolheram a bailarina em sua primeira tentativa. Como foi que fizeram?

Da mesma maneira que se dá a direção ou polarização fotônicas ou a rotação de elétrons, a rotação nuclear também é um fenômeno quântico que pode ser manipulado a fim de formar *qubits* - bits binários múltiplos superpostos -, como a contraparte de um separador de feixes luminosos capaz de separar rotações: um

campo magnético. Eles colocaram uma jarra cheia de moléculas de clorofórmio sob a ação de um campo magnético do equipamento de um aparelho-padrão de imagens médicas por ressonância magnética (MRI, *magnetic resonance imaging*) e, desse modo, forçaram as rotações dos átomos de carbono e hidrogênio a assumir um estado de superposição. Esse “computador” cabia em um tampo de mesa normal e era capaz de calcular as quatro equações simultaneamente — realizando a façanha em quatro universos paralelos. Podiam, desse modo, declarar por trás de qual porta estava a bailarina, desde a primeira tentativa. Mais precisamente, a média não era exatamente 1, porém 1,1 - o computador também era devorado, mas só uma vez em dez, em vez de três vezes em cada quatro.

Usando a estranheza quântica relacionada em um arranjo diferente (intimamente relacionado com o método de computação quântica aqui descrito), seria possível construir um artefato capaz de medir de fora do corpo os níveis de açúcar no sangue, sem precisar de uma amostra. Um protótipo também do tamanho de um tampo de mesa regular, empregando a tecnologia subjacente, encontra-se em construção na divisão denominada “Consórcio das Coisas que Pensam”, do Laboratório de Meios de Comunicação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts.

Wu wei: seja o que você faz

Na Primeira Conferência Internacional sobre Computação Quântica e Comunicações Quânticas da **NASA**, realizada em Palm Springs, Flórida, em fevereiro de 1998, Richard Josza, do Departamento de Ciências da Computação da Universidade de Bristol, Inglaterra, explicou que “O ato de não fazer nada’ [...] é o ingrediente essencial em [...] algoritmos quânticos. [...] Vamos supor de que dispomos de um computador quântico equipado com um comutador comum de liga/desliga. [...] Então (dentro de determinadas circunstâncias), o simples fato de que o computador nos teria dado a resposta correta, sem que chegasse a ser ligado, já seria suficiente para que soubéssemos a resposta, *mesmo que o computador não tenha sido realmente ligado*”?

O método que aciona um desses computadores Zen - de fato, chamado “computador contrafactual” - decorre diretamente do esquema de teste da presença da bomba. As especificações sobre como “realizar” uma computação, sem de fato executá-la, são um pouco mais sutis do que simplesmente ver alguma coisa sem olhar para ela, mas derivam dos mesmos princípios.⁸ De qualquer maneira, tornase quase irresistível imaginar, pois, que deve haver

alguma conexão entre aquelas partes de nós que “sabem” e que “criam” - ou seja, nossas mentes — e esta confundidora capacidade da matéria de funcionar, sob as circunstâncias corretas, como um aparente gerador de informações que antes não existiam. Uma vez que o parceiro material da mente humana é o cérebro humano, será a matéria que compõe o cérebro de algum modo responsável pela mente, porque ela também funciona como um computador quântico biológico, do mesmo modo que funciona como uma rede neural biológica? Roger Penrose, um físico matemático de Oxford, pensa que tal ligação direta entre a mente e o mundo quântico não apenas é possível, como também provável.⁹

Contudo, a fim de que uma entidade funcione como um computador quântico, ela deve se achar perfeitamente isolada do ambiente que a cerca. Os dispositivos computacionais quânticos são extraordinariamente artificiais, dependendo de conjuntos de parâmetros muito bem controlados. Esse tipo de computação depende da aleatoriedade absoluta que se encontra por dentro de toda realidade, segundo parece, mas é completa e imediatamente destruído pela mais minúscula intrusão de pseudo aleatoriedade - o calor, por exemplo - que seja forçada sobre ele a partir do exterior. Não existe qualquer evidência de que a computação quântica, pelo menos do tipo já estudado nas páginas anteriores, seja sequer remotamente plausível dentro de sistemas vivos no nível celular em que Penrose acredita que deveria residir.

O Golem

Aqui encontramos, no entanto, duas ironias. Primeiro, existe um *outro tipo* de computação quântica que o cérebro humano poderia muito bem utilizar. Nós o confrontaremos na próxima escala de nossa viagem, cada vez mais profunda na exploração do cérebro.

Segundo, embora o cérebro humano não possa ser um computador quântico do primeiro tipo estudado, há toda a probabilidade de que, em breve, estaremos criando e evoluindo dispositivos que o sejam. Afinal, já vimos como os pesquisadores criaram um hardware que evoluiu para uma utilização inesperada - e ainda inexplicada - de efeitos eletromagnéticos (presumivelmente) clássicos (veja o Capítulo 8).¹⁰

Permitam-me apresentar uma hipótese: *cérebros, que são computadores quânticos do segundo tipo, foram necessários para trazer à existência cérebros que são computadores quânticos do primeiro tipo*. Se essa afirmação vai se demonstrar vantajosa ou detrimetosa para nós é uma questão que vem causando muitas preocupações entre aqueles que se acham na linha de frente de desenvolvimento desses artefatos. Nas palavras de Kevin Warwick, da Universidade de Reading, na Grã-Bretanha, onde é professor de Cibernética: “Não vejo razão alguma para que as máquinas não possam se tornar mais inteligentes que os seres humanos dentro dos próximos 20 ou 30 anos, e penso que existe uma possibilidade de que se tornem uma enorme ameaça. [...] Estamos falando [...] do fim da raça humana como agora a conhecemos”.¹¹

Os sistemas especialistas estão se tornando cada vez mais bem-sucedidos em imitar as características-chave que estávamos acostumados a crer serem inimitavelmente humanas. Nós colocamos de lado as características mais auto-evidentes das *emoções* - como elas são “sentidas” (por nós) - e, sem o menor sentimento, indagamos em vez disso qual é a função que podem exercer dentro de uma entidade computacional auto-organizadora, de que modo poderemos enriquecer os cérebros artificiais que criamos. A resposta é: as emoções agem como um esquema multidimensional de “forças de conexão” *interpessoais* — em contraste com *interneurais*. O espectro de preferências, associado a cada emoção, embutido em cada “elemento de processamento” individual, permite ao sistema como um todo (o bairro, a comunidade, a sociedade) gerar uma ordem social auto-reguladora. Se codificarmos essas hierarquias, se as criarmos em software e se usarmos esses programas para criar um robô, o resultado será um sistema artificial que apresenta - com espantosa naturalidade - as interações sociais de uma criança humana. Estabeleça interfaces dentro do código que lhe

permitam adaptar-se àqueles que interagem com o robô e o autômato atravessará um processo de maturação, até apresentar características que antes se acreditava ser ou exclusivamente humanas. *Isso já foi feito no MIT.*

Com essas capacidades já sendo implementadas, uma vez que o hardware se torne tanto adaptativo como pequeno para encontrar e tirar vantagem de efeitos quânticos, será difícil imaginar quais limites o nosso Golem ainda terá de superar.

No começo da primavera de 1998, os estudantes e professores da Universidade de Melbourne, na Austrália, devem ter ficado bastante espantados ao verem o seguinte cartaz sendo colocado nos quadros de avisos espalhados por todo o *campus*:

CONFERÊNCIA

“Os Cérebros Artificiais e a Guerra pela Dominância das Espécies no Século XXI”

Terça-feira, 31 de março de 1998, às 14h15

Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Melbourne. Teatro 2, Subsolo, Edifício SEECS.

Rua Bouverie, 221, Carlton

Victoria, Austrália

Dr. Hugo de Garis

Diretor do Grupo de Construção de Cérebros Laboratórios ATR, Kyoto, Japão

www.hip.att.co.jp/~degaris

O dr. Hugo de Garis é o único associado Davos (Fórum Econômico Mundial) residente no Japão. Um dos objetivos de sua vida é tornar o planeta consciente de que a política global do século XXI será dominada pela questão do *artillect* [o intelecto artificial]. [...]

Sumário da Conferência:

O dr. Hugo de Garis, que nasceu e cresceu na Austrália, é o diretor do Grupo de Construção de Cérebros dos Laboratórios ATR, situados em Kyoto, no Japão. A maior ambição de sua vida é construir cérebros artificiais, utilizando circuitos neurais eletrônicos capazes de ‘crescer e evoluir’ em velocidades eletrônicas, com o apoio de hardware especial. Dez mil desses circuitos podem ser estimulados para evoluir em um segundo cada um e depois montados em arquiteturas cerebrais artificiais humanamente

definidas. Por volta do ano 2000, o dr. Garis espera já ter construído o primeiro cérebro artificial do mundo, contendo 10 mil circuitos capazes de controlar as ações de um robô no formato e tamanho de um gatinho.

O dr. Garis [...] está extremamente preocupado com as consequências em longo prazo de seu trabalho de construção cerebral. Ele prediz a possibilidade de uma guerra no final do século XXI entre dois grupos humanos opostos uns aos outros em torno da questão de se os seres humanos devem ou não construir “*artilheis*” (intelectos artificiais). A tecnologia do século XXI permitirá a construção de computadores com 10^{40} componentes mediante a utilização de computadores quânticos de um único bit por átomo, automontáveis, reversíveis, sem aquecimento, em três dimensões, em tamanhos variáveis de nano a um pequeno asteróide. Os seres humanos possuem somente 10^{10} neurônios. Deste modo, os computadores do século XXI terão o potencial de superar os níveis humanos de inteligência.

Em resumo, a questão que dominará o século XXI será “construiremos deuses ou construiremos nossos exterminadores?”, pela simples razão de que, segundo o ponto de vista do dr. Garis, é possível que os futuros robôs se tornem impacientes com a lentidão de seus criadores de segunda classe. “Jamais poderemos ter certeza de que os “*artillects*” [...] não irão eventualmente decidir que os seres humanos são apenas uma peste e tentar exterminar a humanidade; de qualquer modo, eles serão tão inteligentes que poderão fazê-lo com a maior facilidade.”¹²

Eliminando as preocupantes implicações da tecnologia quântica em relação ao nosso futuro, existem aqui também implicações quanto à nossa *natureza*. Se a tecnologia quântica artificial pudesse gerar meios tão espantosos de manipular as *informações*; e, especialmente, se essa tecnologia viesse a ser, em muitos aspectos, *evoluída* em vez de projetada, isso não abre a possibilidade de que a natureza, de forma semelhante, aprenda a empregar efeitos quânticos para organizar nossa própria evolução? E, neste sentido, não teríamos mais por que nos considerar simples máquinas, mas, ao contrário, criaturas que, como os Golems quânticos, corporificam uma misteriosa capacidade para conhecer parte da Uberdade que apenas os sistemas quânticos parecem possuir?

A resposta é “sim”, mas o cérebro humano não é quântico de nenhuma forma direta - não é um computador quântico maciço do tipo que acabamos de conceber. A forma segundo a qual o cérebro humano pode corporificar e tirar vantagem dos efeitos quânticos é tão sutil que pode ser quase indetectável, porém suas implicações são poderosas. Para entender como isso é possível,

vamos prosseguir mergulhando ainda mais fundo na estrutura do cérebro.

14. NA MATÉRIA DA MENTE

A mente fiel, forte e sadia é aquela mente que consegue abraçar igualmente as coisas grandes e as coisas pequenas.

- Samuel Johnson, *A vida de Johnson*, por Boswell, Capítulo VI (1778).

Tem alguém aí?

Quando era adolescente, tinha um avançado microscópio Gilbert em casa – pelo menos, me parecia avançado – e eu adorava utilizá-lo para ficar olhando os camarões salgados que me eram enviados pelo correio no inverno ou para os variados habitantes unicelulares de uma lagoa próxima de casa, quando chegava o verão. Eu me sentia possuído por uma curiosidade insaciável a respeito das coisas, mas não chegaria ao cúmulo de denominar essa sensação como “um senso de maravilha”. Eu não sentia reverência, apenas me divertia com tudo aquilo.

Mas, um dia, passei por uma experiência que me atingiu profundamente. Não recordo onde ou quando isso ocorreu - provavelmente quando estava iniciando meu curso de ensino médio -, porém as imagens-chave permaneceram vívidas (e foram reforçadas quando mais tarde estudei esses assuntos com maior atenção). Nossa turma da escola estava assistindo a um filme sobre a divisão celular. A membrana nuclear se dissolvia e o material cromossômico dentro do núcleo começava a se desenrolar. O filme era em branco e preto e ainda granuloso, portanto, durante algum tempo, as imagens pareceram bastante confusas. Mesmo assim, tudo me lembrava daquelas coisas que se retorciam de forma vagamente ordenada, mas em boa parte aleatória, que me acostumara a ver sob as lentes do microscópio, posto que ali em um nível intracelular.

De repente, a imagem se transformou. O material nuclear abruptamente se organizou e duas estrelas, explodindo em raios distintamente simétricos de linhas que se curvavam com gentileza, apareceram de ambos os lados. As estrelas guiavam e direcionavam o material nuclear, a fim de duplicar-se e separar-se rapidamente, como uma elegante orquestração, (veja Figura 14-1). Era uma imagem tão delicada, poderosa e coesa como um corpo de balé no ápice de uma apresentação. Eu fiquei empolgado, como se um raio me tivesse atingido.

Na ocasião, ainda não possuía um arcabouço cognitivo suficiente para

enquadrar o que tinha acabado de assistir. Meus pensamentos eram algo como: tudo o que estudamos em ciências nos sugeria que a vida inteligente era um fenômeno que emergia somente nos níveis mais elevados de complexidade. De fato, por assim dizer, a própria vida parecia ser o desenvolvimento da inteligência: quanto mais viva era uma coisa, novamente por assim dizer, mais seu comportamento era inteligente. Sim, as amebas, os paramécios e os camarões da praia também eram vivos, mas o fato de parecerem menos vivos estava relacionado com a simplicidade de suas mentes. De fato, suas mentes eram tão simples que quase dava para sentir que eles se achavam mais próximos da matéria inanimada do que um lagarto, um cão ou uma pessoa.

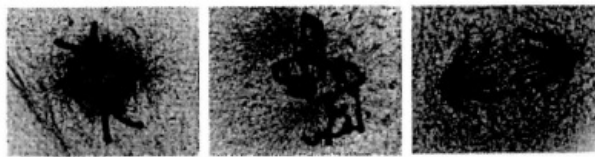


FIGURA 14-1. Formação de fusos orientadores durante a mitose celular.

Todavia, ao contemplar a divisão celular, em especial a do “fuso mitótico” - as duas estrelas simétricas, emitindo raios em direção uma à outra -, e a orquestração que se seguia ao seu aparecimento, tive a impressão avassaladora de que estava assistindo a uma ordem e um poder extraordinários - uma inteligência -, em um nível bem inferior, de fato, dentro das criaturas unicelulares mais simples. Não somente as células individuais estavam vivas, mas havia muitas coisas dentro delas que estavam vivas também.

Posteriormente, quando cursei biologia em nível universitário e a faculdade de medicina, pude estudar esses processos com maior cuidado, sempre esperando entender alguma coisa a respeito desse poder misterioso. Assisti a muitos filmes e vídeos de divisão mitótica, cada vez com maior resolução e clareza, mas sempre os pêlos que crescem na minha nuca se arrepiavam (e ainda se arrepiam, no momento em que escrevo). No entanto, esses estudos foram sempre um pouco desapontadores. Minhas reações se dividiam em duas metades, conforme descrevo a seguir.

Por um lado, a biologia molecular estava avançando a uma grande velocidade, e tudo o que estávamos aprendendo a respeito de como a matéria viva opera era esmagadoramente emocionante em sua exatidão e riqueza de detalhes. Tínhamos ficado sabendo, por exemplo, que os fusos mitóticos que me haviam fascinado tanto eram compostos por tubos ocos como canudos e denominados “microtúbulos”. Muitas drogas eficazes contra o câncer (por exemplo, a vincristina) funcionam porque inibem o desenvolvimento e o

funcionamento posterior dos microtúbulos e, deste modo, atacam a divisão celular, em especial a das células cancerosas, uma vez que estas gastam muito tempo se dividindo descontroladamente.

Todavia, por outro lado, todos esses excitantes avanços se desenvolviam a partir da ideia de que todos os processos vitais eram completamente maquinais em nível molecular. A interação de grandes números de processos semelhantes aos das máquinas não era planejada, mas arbitrária - “randômica” era o termo usado. Aquela formosa coreografia era uma ilusão, estritamente no olhar do observador, ele mesmo uma máquina de partes interagindo aleatoriamente, impulsionadas de forma independente de sua própria vontade por razões ainda desconhecidas, com o objetivo de criar ilusões como beleza e coreografia.

Essas premissas frias e impessoais eram espantosamente poderosas em sua capacidade de gerar resultados. Porém, eu nunca conseguia escapar de meu senso de reverência a cada vez que assistia a divisão celular. Não importa o que tentasse, sempre permanecia em mim a impressão de que alguma coisa maior do que o mecanicismo, alguma coisa totalmente misteriosa, se encontrava no coração da vida. Talvez não fosse nada sobre que tivéssemos pensado antes - poderia ser a “essência vital”, como pensavam os vitalistas; ou o “Chi” esposado pelos chineses; ou o “Prana” das tradições védicas, o “espírito”, a “alma” ou, mesmo, Deus - mas definitivamente se tratava de algo mais, e a impressão inabalável que eu sentia era de ser a ação de uma inteligência.

Não foi por acaso

Parte do enigma, eu sabia muito bem, tinha a ver com o contraste - não realmente uma contradição, porém uma tensão sutil - entre as duas premissas da biologia moderna: o comportamento maquinal e a casualidade.

As máquinas são perfeitamente ordenadas; sua essência é a *falta* de aleatoriedade. Assim, em que ponto do processo poderia entrar o “randômico”? Na verdade, sequer entra. Aquilo que se significa por “casual” nas ciências - aquilo que foi referido como aleatório durante séculos -, não é casual nem aleatório, em absoluto, mas pseudo casual, pseudo-aleatório. De maneira geral, vêm-se empregando o termo “estocástico”, que significa, exatamente, “sujeito às leis da probabilidade”. Só que muitas coisas são estocásticas, sem que sejam aleatórias.

Por exemplo, de acordo com o determinismo mecanicista, cada molécula dentro de um balão cheio de ar se move por um caminho predeterminado e absolutamente fixo. Se, por acaso, uma molécula bater em outra, o encontro recebe o nome de “colisão por chance”, um termo bastante impreciso. O que

realmente queremos dizer é que os dois caminhos que levaram à colisão não compartilham causas comuns. Sua colisão foi incidental no sentido de que seus caminhos não estavam, de forma alguma, ligados um ao outro. Porém, uma vez que as sendas a ser seguidas estavam também inteiramente determinadas, as moléculas nada poderiam fazer, exceto colidir. Depois disso, os caminhos que seguiram acabaram se relacionando em virtude de terem sido afetados pela colisão, porém, ainda assim, perfeitamente mecânicos e determinados. A interação entre eles ocorre somente em uma região do espaço extremamente restrita - o ponto de colisão -, e durante um período muito breve - o momento dessa colisão. Dito em outras palavras, todas as interações são locais. (a definição de “local” pode ser estendida para levar em consideração interações que ocorrem a certa distância, devida às forças que se propagam. Duas dessas forças são a gravidade e o eletromagnetismo, que requerem a chamada “extensão” daquilo que chamamos “local” para incluir os seus “campos”. Mas os mesmos princípios são aplicados de qualquer maneira. A fim de acomodar essas interações, introduzimos um limite indefinido para cada partícula, cuja “dureza” com relação aos limites de outras se modifica quando se aproximam umas das outras. Isso torna a matemática um pouco mais complicada, embora não altere o princípio geral: do mesmo modo que uma partícula não pode influenciar outra sem viajar até ela com alguma velocidade que nunca pode ser maior que a velocidade da luz, o campo de força de uma partícula não pode influenciar outros campos de força sem viajar até eles, igualmente com uma velocidade nunca superior à velocidade da luz). É precisamente isso que Einstein tinha em mente ao descrever a realidade como um fenômeno local; esta também é a premissa subjacente aos vários conceitos equivalentes de processamento paralelo que discutimos: as interações puramente locais e não-orquestradas podem, segundo parece, dar origem a uma ordem global de aparente inteligência.

Não existe absolutamente nada casual nesse quadro materialista, nem mesmo o menor elemento. Somente quando tentamos restringir nossa atenção para apenas uma das duas moléculas, a ordem parece aparecer de repente e, portanto, de forma “randômica”. Mas isso ocorre somente porque não estávamos prestando atenção suficiente. Quando não necessitamos prestar uma atenção tão concentrada aos detalhes, ou não temos condições de fazê-lo; e se estivermos lidando com números grandes o bastante de coisas idênticas, substituímos as leis mecânicas e exatas por leis estatísticas e aproximadas. O que fazemos é pretender que muitas coisas idênticas interajam de forma aleatória, quando, de fato, sabemos que não o fazem.

A qualidade da mecanicidade/aleatoriedade das explicações científicas modernas - seu “toque” reducionista e sem vida - deriva do caráter local das interações. Se estas acabam realizando “tarefas” computacionais em caráter global, como fazem as redes neurais, os vidros rotativos, ou autômatos celulares e coisas semelhantes, então parecem “inteligentes”. Mas não existe uma genuína “unidade” entre as partes, apenas alguma coisa que parece unívoca ao

observador que se concentra somente no todo. Não é necessária a presença de um regente, nem de uma partitura escrita para que as ondas sincronizadas surjam dentro de um autômato celular.

Einstein sabia muito bem que uma genuína unidade global entre elementos não-locais causaria a sensação oposta, isto é, “religiosa” ou “fantasmagórica”, evocando no observador uma impressão de existência de “algo mais” do que a inteligência aparentemente única da computação paralela emergente. E a mesma coisa que sentimos e admiramos em uma grande sinfonia ou coreografia de balé. Nesses casos, surge algo mais do que a mera interação de dançarinos ou instrumentistas individuais. Divisamos as mentes governantes de compositores, regentes ou coreógrafos: as ideias, a criatividade, a vontade condutora - a consciência. E claro que, se liberdade é coisa que não existe, tampouco existirão mentes, ideias, criatividade ou vontade livre genuínas e muito menos consciências funcionando para perceber tais coisas. Que esses elementos nos pareçam presentes deve, portanto, ser o resultado de uma auto-organização maciça que origina a ilusão de unidade. Nesse caso, a dança dos fusos mitóticos é apenas um outro exemplo bem mais elementar de auto-organização.

A partir daqui, podemos chegar a duas conclusões.

Em primeiro lugar, tudo aponta para a probabilidade de que os fusos mitóticos em particular (embora muitos outros eventos ocorram no interior das células) sejam, de algum modo, análogos às redes neurais, aos autômatos celulares ou aos vidros rotativos. Eles devem seguramente ser auto-organizantes e, deste modo, pelo menos em determinado sentido, entidades computacionais existentes no interior das células. Se essas entidades se demonstrarem importantes o suficiente, poderemos considerá-las como um sistema nervoso existente no interior das células (aceitando, assim, a possibilidade de que a inteligência inerente à célula possa surgir de uma forma diferente e ser menos uma especialização de apenas um sistema que faça parte de um organismo maior e mais completo).

Em segundo lugar, se existe algo mais que uma ilusão na impressão de uma “coreografia” planejada entre os fusos mitóticos, ou seja, se houver uma escolha inteligente entre opções - justamente o que uma coreografia ou, de fato, qualquer outra forma de expressão artística implica - isso se deverá a algum tipo de efeito quântico, porque “não existe lugar para a verdadeira aleatoriedade dentro da dinâmica determinística clássica” e também porque, sem uma fonte de casualidade, não existem opções. E onde se encontra essa força? Em toda parte, o que é bastante irônico, porque, “fundamentalmente, o Universo funciona segundo a mecânica quântica.”¹ Essa - todo o universo material em sua natureza quântica - é a fonte, a única fonte. Está em toda parte e, no entanto, parece não

estar em parte alguma, porque, fora circunstâncias excepcionais, a natureza quântica é evidente apenas em escalas inimaginavelmente pequenas. Se a vida, de algum modo, faz uso de efeitos quânticos para atingir a liberdade, deve ter descoberto uma forma de amplificar tais efeitos por meio de numerosas escalas de magnitude superior.

E claro que alguns dos maiores pioneiros da física quântica chegaram a expressar em voz alta a possibilidade de a diferença entre a matéria viva e a não-viva depender de algum modo de efeitos quânticos - a analogia é empolgante demais para que não comecemos a imaginar esse tipo de coisas, mesmo que, tudo considerado, a maior parte dos cientistas não possa encontrar qualquer evidência para esse tipo de conexão. De fato, a maioria de seus colegas demonstrou-se hesitante, e os próprios biólogos os acusaram de especular a respeito de assuntos sobre os quais eram completamente ignorantes, não importa a sua condição de premiados Nobel no campo da física.

A noção de que a vida era, de algum modo, um fenômeno quântico, em parte surgiu das analogias que podem ser facilmente estabelecidas entre o comportamento das partículas quânticas e aquele que é demonstrado por entidades vivas — em especial o das pessoas, como já observamos antes. Poincaré, Heisenberg, Pauli e outros frequentemente observaram como o “livre-arbítrio” se parecia com a “decisão” das partículas quânticas para aparecerem “onde desejassem”. Se as partículas quânticas exibiam comportamentos causados por nada, enquanto os sistemas vivos (inclusive as pessoas) eram apenas máquinas, não poderíamos argumentar que as partículas atômicas são os verdadeiros seres que possuem vontade livre, enquanto nós não a possuímos?

Até o ponto em que o conseguiram, os pioneiros quânticos tentaram apoiar suas intuições com argumentos plausíveis. Bohr, por exemplo, observou como o meio sempre mutável, em que uma onda é apenas um padrão, é semelhante ao meio em constante modificação da matéria, dentro da qual a vida é nada mais que um padrão.² Louis de Broglie, o primeiro a apresentar a ideia de “ondas de matéria”, o que lhe rendeu um Prêmio Nobel, insistia em que “a estrutura do universo material tem algo em comum com as leis que governam o funcionamento da mente humana.”³ Mas descobertas de fatos reais - ou, mesmo, a apresentação de hipóteses que pudessem vir a ser submetidas a testes - eram difíceis de obter. Em 1994, o renomado físico-matemático britânico Roger Penrose publicou um livro que figurou entre os mais vendidos, *Shadows of the mind*, em que asseverava que o cérebro é uma entidade quântica maciça, e não um autômato mecânico e auto-organizante.⁴ Ele queria uma passagem que lhe permitisse sair da gaiola, segundo havia deixado claro ao expressar uma de suas preocupações cinco anos antes: “Talvez estejamos condenados a nos tornar

computadores no final! Pessoalmente, não acredito nisso, mas novas considerações são necessárias antes que consigamos encontrar um caminho que nos afaste dessa potencialidade.”⁵

No entanto, nessa época, Penrose não estava procurando efeitos quânticos no interior das células. Seu modelo posterior, formulado em conexão com Stuart Hameroff, um anestesiologista, pesquisador da Universidade do Arizona, requeria que aproximadamente 20 mil neurônios existissem simultaneamente por cerca de 40 avos de segundo - no mundo quântico, uma duração de tempo extremamente longa - em uma única superposição quântica *coerente* o que significaria que todas as partículas envolvidas se comportariam como se fossem uma única entidade quântica gigantesca, com todas as suas formas de onda individuais se somando para criar uma única forma de onda simples que permanecesse imutável. (Veja o Apêndice C, onde se encontra uma explicação mais detalhada.)

E inconcebível que o malabarismo incidental de uma quantidade assim enorme de matéria viva, em uma temperatura próxima aos 36,5°C, não fosse superar quaisquer efeitos quânticos pelo simples fato de que levaria quase todos a se cancelarem mutuamente. Penrose não estava fazendo uma analogia entre seres humanos e elétrons; mesmo assim, o abismo entre os efeitos quânticos conhecidos e uma rede viva de milhares de neurônios é imenso. Apesar de toda a popularidade alcançada pelo livro - e apesar de Penrose ter uma genuína reputação de astro científico devido às suas enormes contribuições para os campos da física e da matemática (somente Einstein havia contribuído mais para a Teoria da Relatividade Geral), *Shadows of the mind* foi sendo rapidamente relegado ao lixo crescente da física popular e dos livros de ampliação da consciência, que poucos cientistas levam a sério.

Sem dúvida, a obra foi saudada com vaias e troças, ao lado de clamorosos protestos. Em uma caricatura não muito simpática da teoria, referindo-se ao filme da Disney sobre Alice e o coelho branco, lançado em 1960, os filósofos mecanicistas e inabaláveis materialistas Patricia Churchland e Rick Grush, do *campus* da Universidade da Califórnia em São Diego, observaram que a ideia de Penrose e Hameroff “não tinha melhor apoio do que qualquer outros desses *gazilhões* de hipóteses envolvendo lagartas fumando narguilês”.⁶ Em sua réplica, Hameroff e Penrose responderam de bom humor, descrevendo Churchland e Grush como avestruzes, com as cabeças enterradas profundamente na areia.

O embate subjacente de visões de mundo - o determinismo mecanicista tido como ciência e a mecânica quântica descrita como “religião”, de fato uma religião do tipo Nova Era, cheia de ideias confusas de drogados afirmando que tudo no mundo é uma coisa só - é evidente como um subtexto pouco disfarçado

em muitas das farpas lançadas pelos críticos de Penrose. Murray Gell-Mann, físico teórico, que também foi laureado com um Nobel e colega de longa data de Richard Feynman na Universidade Tecnológica da Califórnia, atualmente membro do Instituto Santa Fé, apresentou a questão da maneira seguinte:

Aquilo que caracteriza sua proposta, no meu entendimento, é a noção de que a consciência se encontra de algum modo relacionada com a gravidade quântica. [...] Eu não posso ver qualquer razão para [...] nos engajarmos em uma especulação mística a respeito da gravidade quântica. [...]

Praticamente não existe ninguém mais que pense existirem forças vitais especiais, além das leis da física e da química, ou que estas sejam necessárias para explicar a biologia. A ideia de que processos físicos especiais sejam necessários para explicar a autoconsciência também irá morrer em breve.⁷

Com a mesma ironia cáustica e inquebrantável de sempre, Marvin Minsky referiu-se à ideia de Penrose por meio de um jogo de palavras: “Onde há fumaça, um leitor inteligente pode apenas concluir que há fumaça”.⁸ (“Where there’s smoke, there’s smoke” [Onde há fumaça, há fumaça] foi o título de um artigo publicado em 1979 pelo físico John Wheeler sobre a decisão da diretoria da Associação Americana para o Avanço da Ciência - AAAS - tomada em uma reunião em 1969, quando Wheeler foi voto minoritário e vencido — que permitiu à Associação Americana de Parapsicologia ser reconhecida pela AAAS. Wheeler considerava a parapsicologia uma pseudociência, e ainda a considera. O “leitor inteligente” entende que Minsky está dizendo a mesma coisa a respeito da “ciência da consciência”, proposta por Penrose. É claro que, considerado o posicionamento de Minsky muitos anos atrás sobre o valor potencial das redes neurais, talvez ainda haja esperança para a hipótese de Penrose, depois que tudo tiver sido levado em consideração).

Nas palavras do químico teórico Michael Kellman, da Universidade de Oregon, membro de um grupo de pesquisadores que realizou análises sérias da real dinâmica quântica, o problema é que:

Visando a ser verdadeiro, [o modelo de Penrose] [...] teria de envolver algumas estruturas completamente maravilhosas sobre as quais ainda não conhecemos nada - simplesmente afirmar que neurônios encadeados poderiam se tornar sistemas quânticos coerentes é tão plausível quanto declarar que posso passar por um túnel sob o Monte Everest apenas porque sou um sistema quântico.

Eu não estou dizendo que *alguma coisa* capaz de fazer o que Penrose propõe seja impossível, e sim que é provavelmente impossível aqui e agora adivinhar o que esse elemento possa ser. Seria necessário que muitas pessoas (durante séculos, mas talvez por menos tempo) pensassem e realizassem experiências até descobrir de que maneira um sistema desses poderia funcionar.⁹

John Hopfield, cujo próprio trabalho se encontra tão intimamente ligado ao coração de tudo o que vimos discutindo, expressou-se de maneira mais franca e direta: “Contrariamente às expectativas de uma longa história de físicos mal preparados para abordar a biologia, não existe qualquer indicação de que a mecânica quântica possa exercer um papel significativo dentro do campo da biologia”.¹⁰

Mas Daniel Dennett, filósofo e diretor do Centro de Estudos Cognitivos da Universidade Tufts, explica o que se acha no núcleo da discussão: “A maior parte dos biólogos pensa que os efeitos quânticos se cancelam mutuamente no interior do cérebro. [...] *Eles não se amplificam; eles não se fixam ali*”.ⁿ

Mesmo que pensemos que Penrose está errado, *Dennett também está*. E isso até deveria parecer uma contradição, mas não é. Tudo depende da distinção entre “fixar” e “amplificar”, e exatamente do que poderia ser pretendido pelo uso do segundo termo. Como esclarecimento, retornamos aos fusos mitóticos e a outras partes da célula que são bastante semelhantes a eles.

A célula da célula

Sob as lentes do microscópio, assim que este foi inventado, uma nova verdade se tornou evidente à primeira vista: a unidade fundamental da vida é a célula; do sistema nervoso, portanto, é a célula nervosa. Esta é a “doutrina neurônica”. Desde que a neurociência computacional surgiu, o neurônio passou a ser entendido como a unidade mais fundamental da *inteligência biológica*. Contanto que encaremos um neurônio individual como uma entidade relativamente simples - ele soma suas entradas, transforma as somas de acordo com regras fixas, depois distribui os resultados entre seus vizinhos (talvez também a amigos fisicamente distantes) -, o neurônio *deve ser* a unidade mais fundamental. Essas funções não requerem qualquer sofisticação ou sutileza para ser implementadas, pois toda sofisticação ou sutileza que vierem a surgir emergem das *interações* entre as partes, ou seja, do todo.

Mas mesmo um indivíduo unicelular primitivo exhibe uma complexidade computacional extraordinária. As amebas e os paramécios se movimentam em direção a alvos determinados, reagem, evitam e, à sua maneira, até mesmo demonstram sinais da existência de memória. De que partes computacionalmente capazes, então, é composto um paramécio?

Como a maior parte dos seres compostos por uma única célula, o paramécio ostenta um arranjo assombroso de partes diferenciadas. Nossa imagem mental de

uma célula - como um quadrado de cantos arredondados e com um grande buraco preto no meio - transmite o grau de estruturação celular na mesma medida que o rosto sorridente e redondo de um *smiley* comunica as nuances de emoções captadas pela pintura da *Mona Lisa*. Não obstante, há uma estrutura que se destaca como o agente principal do comportamento aparentemente inteligente de um paramécio: os seus cílios (veja a Figura 14-2). Estes são os finos filamentos pelos quais ele é coberto e que são capazes de reagir em conjunto perante o meio ambiente. São, ao mesmo tempo, antenas e agentes de locomoção, processando as informações provenientes do ambiente que rodeia o organismo tanto para determinar se ele deve comer, lutar, fugir ou se reproduzir, e também para gerar os movimentos sincronizados necessários para engajar essas quatro funções básicas. Aqui, ação e inteligência são a mesma coisa. (Aparentemente, não existe reflexão entre o pensamento do paramécio e suas ações. Para ele, sentir um impulso é agir conforme o determinado pelo próprio impulso. Todavia, tudo considerado, isso não é lá muito diferente da maneira como se comportam os seres humanos, salvo os mais civilizados.)

Os *cilia* do paramécio operam gerando ondas sincronizadas, oscilatórias e transmissíveis a seus vizinhos - o que já deve lhe parecer familiar. Essa sincronia complexa surge de interações puramente locais de partes ainda menores. Cada *cilium* individual, em outras palavras, cada um daqueles que demonstram sua própria coordenação interna de ondas, e uma coleção de *cilia* que demonstra coordenação grupai, está engajado em uma computação paralela maciça em função de todas as razões esboçadas anteriormente: auto-organização de uma ordem global, que surge a partir de interações locais de arranjos de unidades idênticas; o estabelecimento de oscilações estáveis dentro de subgrupos; e as ondas que viajam, implicando a existência de uma sincronia temporal.

Os cílios do paramécio são *microtúbulos*, pouco diferentes das estruturas ocas e semelhantes a hastes de palha de que são formados os fusos mitóticos. Os neurônios também são especialmente ricos em microtúbulos, por meio dos quais sustentam tanto a propagação de sinais como a construção auto-organizada de novas conexões de neurônio a neurônio. Com três níveis de amplificação, os fusos mitóticos, os cílios e outras estruturas microtubulares evidenciam as aparências mostradas nas ilustrações da Figura 14-3.

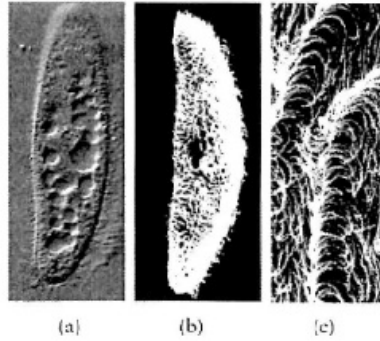


FIGURA 14-2. Fotos de paramécios. (a) Observe as organelas internas e os cílios externos. (b) A varredura microscópica mostra que os cílios cobrem a superfície inteira. (c) Detalhe dos cílios, mostrando ondas individuais e grupos de ondas coerentes.

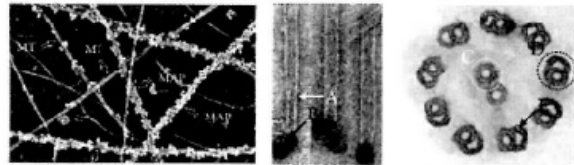


FIGURA 14-3. Microtúbulos formando estruturas “axonemais” (por exemplo, fusos mitóticos, cílios em protozoários e mecanismos de sinalização e transporte dendríticos e axonais em células nervosas). À esquerda: “MT” assinala microtúbulos individuais; “MAP” assinala proteínas associadas a microtúbulos. Meio: A: microtúbulos ampliados, formando segmentos; B: a carga negativa da ponta está tingida de negro. À direita: C: o eixo central de um cílio é composto por dois microtúbulos; D: a circunferência de um cílio é composta por nove microtúbulos, cada um em secção cruzada demonstra ser composto por um círculo e meio (grande círculo pontilhado); E: todos os microtúbulos são construídos como a hélice de uma proteína denominada “tubulina” (pequeno círculo sólido).

Os microtúbulos são estruturas ocas compostas por muitos blocos de construção idênticos, moléculas de uma proteína chamada “tubulina”. A tubulina é um “dímero”, uma proteína composta de duas subunidades muito semelhantes, mas não idênticas, referidas como α -tubulina (alfa-tubulina) e β -tubulina (beta-tubulina). Uma terceira variante, a γ -tubulina (gama-tubulina), é menos comum, mas exerce um papel crucial na formação de ramos e de curvas na tubulina. Na Figura 14-4, indo de A até H, observamos uma visualização cada vez mais ampliada de um microtúbulo e seus componentes de tubulina.

Os elementos estruturais básicos dos organismos unicelulares mais primitivos e evolucionariamente mais antigos são, de forma semelhante, os mesmos microtúbulos, sugerindo mais fortemente como essas estruturas são fundamentais para a vida (veja Figura 14-5).

Um argumento plausível pode ser apresentado no sentido de que o bloco de construção básico da *inteligência* celular seja o microtúbulo - de modo que

danos causados aos microtúbulos possam resultar especificamente em doenças erosivas da inteligência em nossos organismos. Por exemplo, evidências recentes sugerem que, dentro do neurônio, a localização da patologia primária do mal de Alzheimer se acha nos microtúbulos. “Ainda que a maioria dos investigadores deste campo acredite que seja a deposição amiloide no núcleo celular dos portadores do mal de Alzheimer, [...] um esquema [...] mais coerente é a anormalidade citoesquelética (microtubular) [...] Todos os quatro genes identificados interagem [...] com o citoesqueleto [...] e qualquer anormalidade neste último conduz a uma [...] perda de sinapses e subsequente perda de neurônios”.¹²

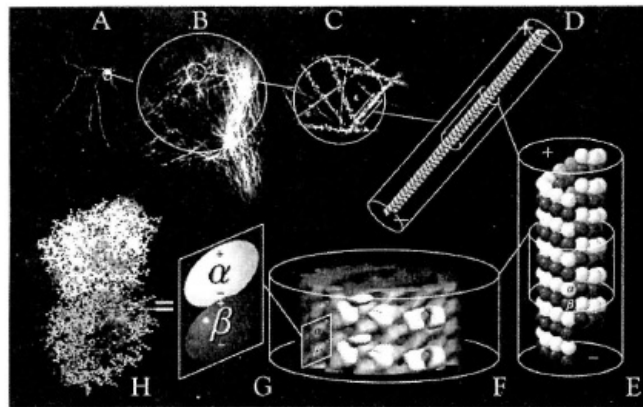


FIGURA 14-4. Rede de microtúbulos (MT) visualizada por corantes específicos para tubulina (A, B e C, editados e modificados para maior clareza) ou em forma de modelo.

(A) Redes coradas de microtúbulos ("neuritas") dentro de um neurônio. Nesta escala, a letra "A" tem um diâmetro de, aproximadamente, 0,15 mm (igual a $1,5 \times 10^{-4}$ metros).

(B) Fotografia ampliada de estrutura microtubular no corpo da célula e ao redor do núcleo. A letra "B" tem um diâmetro de mais ou menos 5 μ (cinco microns), em que é igual a 5×10^{-6} metros.

(C) Microtúbulos individuais com MAPs (*MT-associated proteins* = proteínas associadas a microtúbulos). Aqui, a letra "C" tem mais ou menos 150 nanomícrons, correspondendo a $1,5 \times 10^{-7}$ metros.

(D) Modelo de uma curta secção de microtúbulo, mostrando sua estrutura helicoidal. As proteínas associadas aos microtúbulos não se acham representadas aqui. A letra "D" equivale a mais ou menos 20 nanomícrons, ou 2×10^{-8} metros.

(E) Detalhe da estrutura helicoidal. Três filamentos começam ao longo de um único diâmetro. As hélices de alfa-tubulina e de beta-tubulina parecem se alternar, porém o laço mais forte é o vertical entre uma subunidade alfa e uma beta. A hélice tripla significa que existe uma "costura" (vista de frente) no lugar em que as subunidades alfa se juntam lateralmente às subunidades beta adjacentes. O diâmetro do microtúbulo é de mais ou menos 25 nanomícrons ou $2,5 \times 10^{-8}$.

A letra "E" tem um diâmetro de mais ou menos 5 nanomícrons (igual a 5×10^{-9} metros).

(F) Microfotografia eletrônica de uma secção de microtúbulo. A letra "F" tem mais ou menos dois nanomícrons de diâmetro (2×10^{-9} metros). As extrusões de cores claras são várias proteínas associadas ao microtúbulo.

(G) Esquema de uma molécula de tubulina. Ambas as subunidades têm uma ponta carregada positivamente e outra negativamente. Elas se alinham, a fim de deixar um dipolo elétrico na rede. Portanto, os microtúbulos também têm extremidades carregadas positiva e negativamente, como um ímã, salvo que aqui a força é somente elétrica. Enquanto isso, as cargas opostas próximas se atraem e se cancelam mutuamente. A letra "G" tem mais ou menos 0,5 nanômetro de diâmetro (igual a 54×10^{-10} metros).

(H) Modelo detalhado da bola de gravetos que compõe a proteína da tubulina. A letra "H" possui aproximadamente 0,25 nanômetro ($2,5 \times 10^{-10}$ metros), "H" está ampliado cerca de 40 mil vezes mais do que "A".

Stuart Hameroff, pesquisador da área médica na Universidade do Arizona, foi um dos primeiros (no princípio da década de 1980) a propor que os microtúbulos fossem capazes de computação. Na época, a ideia pareceu ultrajante. Havia décadas os microtúbulos eram considerados apenas estruturas integrantes do *citoesqueleto*, isto é, o esqueleto celular, com as implicações de um arcabouço sem inteligência e estático, ainda que flexível. Como isso ocorreu antes que qualquer tipo de auto-organização fosse levada a sério, os pesquisadores presumiram que alguma agência central, ainda desconhecida, fosse responsável pela coordenação dos fusos mitóticos e de outras estruturas a eles relacionadas ("axonêmicas") - possivelmente encontrável em algum ponto no interior do núcleo. Afinal, os ossos não pensam, quem pensa é o cérebro.

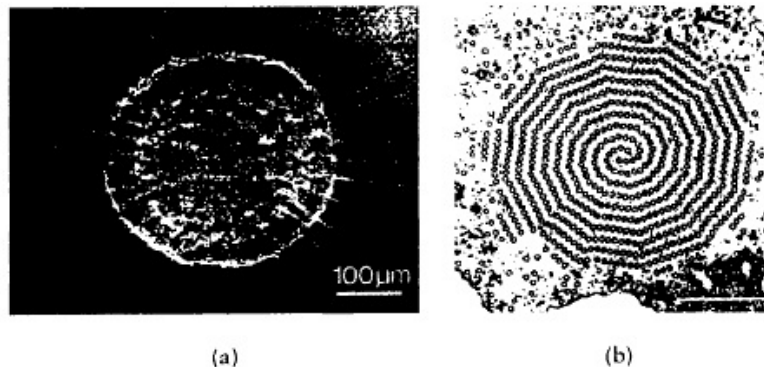


FIGURA 14-5. (a) *Actinosphaerium*. Este parente do ouriço-do-mar é semelhante àqueles que surgiram durante o período Cambriano, quando ocorreu a "explosão" de formas de vida, proliferando misteriosamente sobre a superfície da Terra. Possui cerca de 300 axonemas radiais. (b) Secção cruzada de um dos axonemas. Cada axonema é composto por, aproximadamente, 720 microtúbulos (correspondendo a 3 bilhões de proteínas de tubulina), dispostos em um arranjo de dupla hélice.

Mas logo se tornou claro que, longe de serem estáticos, os microtúbulos são entidades capazes de se reunir e de se separar rapidamente. Eles se engajam em um comportamento coletivo complexo, auto-organizador e oscilante, que surge apenas em fimção de interações dos vizinhos mais próximos de constituintes adjacentes idênticos em um arranjo ordenado. A partir desta perspectiva, a alegação de Hameroff, de que os microtúbulos se reúnem para executar um

processamento de dados paralelo maciço, começou a parecer menos ultrajante do que óbvio.

Do mesmo modo que o quarto cérebro humano não requer, em cada caso, um mestre programador para aprender, adaptar e executar computações altamente sofisticadas, o “citoesqueleto” tampouco precisa disso. O flagelo do espermatozóide humano (uma estrutura microtubular muito semelhante às caudas ciliares individuais ou duais de certos protozoários, por exemplo, a *Euglena viridis*) se retorce devido às ondas propagantes de mudanças conformacionais que surgem de interações entre os vizinhos mais próximos. Essas ondas são muito semelhantes às ondas oscilatórias que surgem entre uma coleção de neurônios (em grande escala) ou às ondas oscilatórias entre uma coleção de produtos químicos (em pequena escala), ou ainda às ondas oscilatórias dos ciclos comerciais (na maior escala de que temos consciência até o presente, sendo que estas últimas, todavia, são tão complexas que se tornam menos rigidamente regulares).

A percepção de Hameroff foi a de ver nas interações microtubulares uma chave para o processamento inteligente e auto-organizado que ocorre em caráter intracelular. Há muitos outros sistemas dentro da célula que podem ser reconceptualizados a partir de um ponto de vista embasado em processamento paralelo de informações: mais evidente de todos, o ciclo protéico DNA-RNA, mas também os próprios ciclos bioquímicos. Seja como for, a estrutura distintiva dos microtúbulos, como veremos, os torna candidatos particularmente sedutores para o próximo elo (abaixo) dos neurônios em uma cadeia que conecta o macrocosmo humano aos microcosmos de que foi construído.

Redes de microtúbulos; microtúbulos como redes

Quanto mais se estudam os microtúbulos, mais espantosos eles se revelam: “são ubíquos [...] e realizam um conjunto surpreendente de funções.”¹³ Estas funções incluem:

- o transporte intracelular de organelas. A rede dos microtúbulos é como um sistema ferroviário, ao longo do qual proteínas especializadas transportam cargas como se fossem locomotivas. Mas esta ferrovia orgânica é inerentemente inteligente: não precisa de despachantes, nem de maquinistas; consegue montar-se e desmontar-se e estabelecer as próprias rotas em função das necessidades imediatas;

- o movimento dos cílios e dos flagelos: os movimentos dessas estruturas são ondulatórios e sincronizados; isso significa que padrões de ondas “viajam”, isto

é, são transmitidos de estrutura para estrutura em análogos computacionais aos das escalas químicas inferiores (oscilações químicas de substâncias simples) ou das escalas neuronais mais elevadas (as redes neurais);

- a orquestração da divisão cromossômica durante a replicação das células. A rítmica “dança dos cromossomos” é um exemplo de movimento oscilatório sincronizado no interior das células, com os mesmos análogos computacionais das escalas inferiores e superiores que dão origem ao movimento celular;

- modificação de sinais de um meio para outro. Esta é uma função que os microtúbulos executam em todas as células. Mas é necessário um tipo muito especializado de microtúbulo no interior dos neurônios para que possam estabelecer novas conexões.¹⁴ De fato, “o citoesqueleto é um candidato natural para a tarefa de transmitir sinais dirigidos, porque abrange a célula inteira e, geometricamente falando, é uma estrutura unidimensional ramificada”;¹⁵

- comunicação entre o núcleo e o interior da célula. Os sinais transduzidos ao longo da rede de microtúbulos consistem em grande parte (embora não inteiramente) de modificações auto-organizadas no formato dos microtúbulos e em sua disposição. Sinalização e mudança de forma são, aqui, uma só coisa. As pontas de uma rede de microtúbulos estão fisicamente ligadas a outras partes da célula (por exemplo, as organelas, o núcleo e a membrana citoplasmática), de tal modo que o processamento paralelo, a sinalização e a transdução de forças físicas constituem uma função integrada e sem interrupções.

Uma equipe de biólogos celulares demonstrou que as células dos mamíferos apresentam uma “fiação” muito densa, formada por conexões transmissoras de forças que atingem todas as partes da célula, da membrana celular, passando pelo citoesqueleto, até chegar ao genoma.

[...] A experiência, realizada por Andrew Maniotis, Donald Ingber e seus colaboradores,¹⁶ está sendo saudada como um grande triunfo. [...] “Ela coloca o citoesqueleto sob uma nova luz: como um mecanismo para a transdução de sinais em vez de simplesmente um mecanismo de sustentação.” [...] O sistema de comunicações mecânicas [...] se propaga através do núcleo até os cromossomos individuais.¹⁷

Técnicas desenvolvidas recentemente permitem a visualização dos microtúbulos no interior de células vivas e as experiências realizadas demonstram que mudanças conformacionais no citoesqueleto formam e reformam sua configuração interna a fim de criar mobilidade. De modo semelhante, a disposição física dos dendritos neuronais em crescimento é guiada

pelos padrões físicos auto-organizantes de seus microtúbulos e das proteínas e filamentos a eles associados.¹⁸ Conforme foi descrito por um pesquisador de Harvard: “Um quadro coerente está finalmente começando a surgir. [...] um sistema de transdução de sinais de pensamento’ [...] integra informações multifacetadas e, algumas vezes, conflitantes de forma a desencadear a resposta biológica apropriada”.¹⁹

Deste modo, a rede interna microtubular dos neurônios exerce um papel-chave no estabelecimento da fiação da rede neural macroscópica do cérebro. A “sinalização” ao longo das redes de microtúbulos consiste, entre outras coisas, de padrões de tensão mecânica - e correspondentes mudanças de forma transduzidos e transmitidos por meio do sistema de células inteiro. Esse resultado faz sentido, é claro, porque se, de um modo geral, o hardware e o software de uma rede densamente conectada são a mesma coisa, poderíamos esperar que os relacionamentos mecânicos básicos exercessem um papel computacional cada vez maior em escalas cada vez menores.

A cinética química e, portanto, o campo da computação molecular que vem recentemente surgindo, são alguns exemplos baseados em grande parte na influência mútua de forças elétricas entre as moléculas. Estímulos de entrada para um computador desses, sem dúvida, irão ocasionar mudanças em escala relativamente grande na posição, no movimento, na conformação e nas características químicas do “material” que forma esse computador.²⁰

Uma vez que, em pequenas escalas, o movimento físico das partes da coisa que está realizando a computação é uma forma importante assumida pela computação; e uma vez que os microtúbulos existem justamente nesse grau da escala, eles estão sendo agora o objeto de estudos para sua utilização na criação de máquinas robóticas auto-organizadoras em nanonível.²¹ Para esse tipo de robôs, o meio computacional e a estrutura, cujo movimento é dirigido pela computação, são uma única coisa. E seu papel no interior da célula parece ser exatamente o mesmo.

A conexão de Langton para os autômatos celulares

Desde 1982, Hameroff vinha contemplando os microtúbulos como autômatos celulares em potencial.²²

Alguns anos depois, Christopher Langton (que havia projetado o primeiro autômato celular auto-replicante e sobre cujo projeto básico o cérebro CA de auto-evolução de Hugo de Garis está baseado) editou um livro sobre o novo campo da “vida artificial”, que se achava em fase de explosão.²³ Langton estava especialmente interessado nas maneiras com que agregados de *moléculas*

conseguiram computar a ponto de se automontarem e se auto-organizarem em matéria viva. Ele havia terminado de publicar um artigo, que causou grande repercussão, sobre esse assunto em uma revista especializada que se dirigia a físicos.²⁴ Incluído no livro se achava um capítulo longo e detalhado, escrito por Hameroff e dois colegas, intitulado “Os autômatos moleculares nos microtúbulos: a lógica computacional básica do estado vivo”. Conforme o título, os autores levantaram a hipótese de que, considerada a célula como a unidade básica da vida, sua capacidade computacional se achava guardada em uma rede distribuída de microtúbulos, funcionando como um autômato celular.

A estrutura subjacente dos microtúbulos apresenta, de fato, uma semelhança surpreendente com os autômatos celulares. Cada microtúbulo é constituído por milhares de dímeros de tubulina, dispostos em uma grade bidimensional enrolada em forma de cilindro, como mostra a Figura 14-6.

Cada molécula de tubulina poderia ser considerada como uma célula de um autômato celular. Devido à geometria dos dímeros, a grade resultante formava vizinhanças hexagonais (cada molécula tem seis vizinhos próximos). As cargas eletrostáticas positivas e negativas dos dímeros faziam com que se alinhassem; a alternância de um elétron entre as subunidades α e β era responsável por uma mudança conformacional no dímero considerado em conjunto. A mudança de um dímero de uma forma para outra exercia influência sobre seus vizinhos. Desse modo, o microtúbulo possuía os elementos básicos de um autômato celular de duplo estado (veja Figura 14-7).

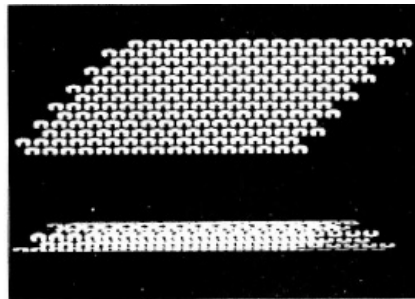


FIGURA 14-6. Representação esquemática de um microtúbulo. Embaixo: dímeros de tubulina se enrolam para formar um tubo. Em cima: desenrolados, os dímeros formam uma folha com a largura de 13 dímeros.

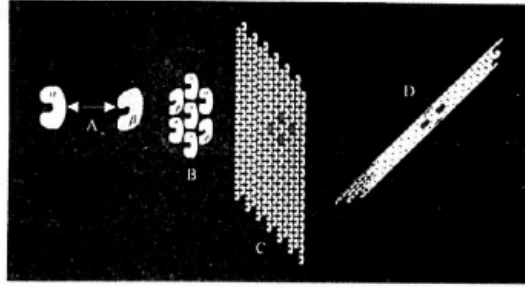


FIGURA 14-7. Um microtúbulo como autômato celular. (a) A conformação dos dímeros de tubulina muda, dependendo do lugar em que um elétron livre reside (letras escuras). A configuração α fica à esquerda, enquanto a configuração β se acha à direita da flecha dupla. (b) Seis dímeros de tubulina formando uma vizinhança celular. (c) Um padrão formado por quatro dímeros de tubulina na configuração β (o elétron livre se encontra na subunidade β). (d) Grade de dímeros de tubulina enrolados formando um microtúbulo.

Em sua maioria, os autômatos celulares, como até então eram compreendidos, requeriam um “mecanismo de relógio” - algo que desencadeasse a atualização simultânea de todas as células com base no estado de suas células vizinhas, o que significava que deveria existir algum meio para transmitir um sinal regular, como uma vibração com ritmo fixo. Entretanto, à luz de um microscópio, uma rede de microtúbulos parece quase desorganizada. E difícil imaginar como um amontoado tão caótico possa sustentar alguma coisa que se assemelhe a vibrações regulares.

Todavia, um estudo cuidadoso de como os microtúbulos se acham interligados revela uma ordem surpreendentemente harmoniosa. As proteínas associadas aos microtúbulos (MAPS) e os filamentos que as interligam estão posicionados a intervalos bastante regulares (embora não perfeitamente). Dois padrões de proteínas que ocorrem naturalmente estão localizados em pontos nos quais os nódulos estacionários (*frets* ou “arabescos”) teriam de estar, buscando sustentar permanentes vibrações de sons coerentes²⁵ (veja as figuras 14-8a e 14-8b).

Além disso, pelo menos em organismos unicelulares, a rede como um todo apresenta uma estrutura simétrica que facilitaria vibrações sustentadas (veja Figura 14-8c).

Quando foi apresentada, a teoria de Hameroff sobre a computação microtubular e suas vibrações coerentes pareceu exagerada. No entanto, como já foi abordado em páginas anteriores, sabemos hoje que as redes de microtúbulos, com toda certeza, transmitem e traduzem forças de flutuação, mantendo, de forma quase instantânea, um equilíbrio dinâmico em constante transformação ao longo da rede inteira. Uma vez que sinalização e mudança de forma significam quase o mesmo nos microtúbulos, faria sentido pensar que as vibrações coerentes, transmitidas ao longo das redes de microtúbulos, servissem a funções

relacionadas: na medida em que uma onda vibratória atravessa determinada região, energiza os dímeros de tubulina ali presentes, com o objetivo de modificarem sua conformação. Ondas rítmicas poderiam, assim, constituir um mecanismo “de relógio” que agendasse e acionasse as “atualizações” dos arranjos de tubulina como em um autômato celular. Presumindo-se a existência de certas “regras” para governar as interações entre os vizinhos mais próximos, Hameroff e seus colegas demonstraram que estruturas propagadoras estáveis poderiam existir, como as dos tipos apresentados nas Figuras 14-9 e 14-10.

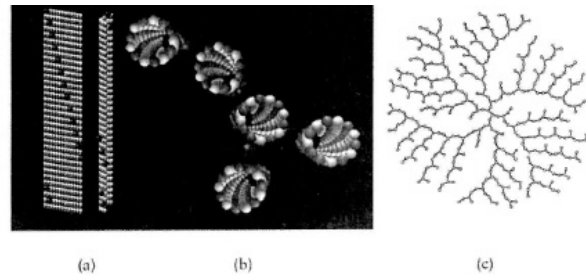


FIGURA 14-8. Proteínas associadas aos microtúbulos, ou MAPs, formando ligações entre microtúbulos individuais. (a) Secção desenrolada de um microtúbulo, mostrando as proteínas a ela associadas. (b) Vista a partir da ponta da parte interna de cinco microtúbulos ligados entre si por pontes de proteínas. (c) Redes de microtúbulos em uma *Radiolaria*. Os círculos são microtúbulos, e as linhas são as proteínas que os interligam.

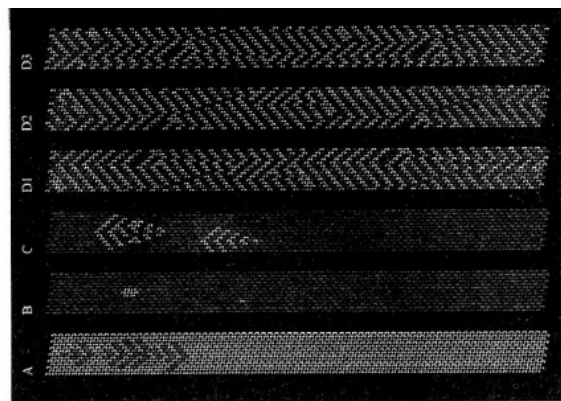


FIGURA 14-9. Modelos de autômatos celulares formados por microtúbulos. As células mais claras são dímeros de tubulina com um elétron localizado na bolsa da subunidade alfa. As células escuras são moléculas de tubulina com um elétron localizado na bolsa da subunidade beta. Aceitas determinadas suposições, esses são alguns dos padrões estáveis preditos por Hameroff e seus colaboradores. D1 a D3 são três estados de uma onda “viajante”, isto é, em movimento. A, B e C são *gliders*, ou seja, estruturas deslizantes.

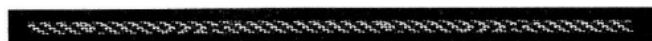


FIGURA 14-10. Estado hipotético de uma onda de tubulina em movimento ao longo de um microtúbulo.

Porém, existe um problema nesse modelo. As regras que governam as interações entre as moléculas de tubulina, ainda que não biologicamente

impossíveis, não são aquelas que se encontram normalmente na natureza - elas foram projetadas com a intenção de garantir um comportamento semelhante ao dos autômatos.²⁶

Mesmo assim, a percepção de Haveroff-de que os microtúbulos, de *alguma forma*, funcionam como computadores paralelos - é fundamental e inevitável; e, para esse fato em particular, existem evidências. A questão que permanece é: como?

Os detalhes diabólicos

Entre o plausível e o real, há um imenso abismo, e a maioria das coisas que são possíveis não são tão simples assim. Jack Tuszynski, da Universidade de Alberta [Canadá], gozava de uma sólida formação em física de sistemas complexos e havia alcançado a posição de chefe de um importante grupo de pesquisa laboratorial. Como Hameroff, já focalizara sua atenção sobre os microtúbulos, entendendo que eles apresentavam todas as características necessárias para a inteligência intracelular.

O modelo de Hameroff, apresentando os microtúbulos como autômatos celulares, tinha lançado mão de elevado número de pressupostos hipotéticos. Sim, a estrutura dos microtúbulos se *parece* muito com a dos autômatos celulares e se comporta como eles em determinadas situações, mas, no entanto, não é um deles. Tuszynski adotou uma abordagem mais fisiológica - e, portanto, mais *natural* - ao problema. Era o mesmo processo de descoberta que conduziu à convicção de que as redes neurais eram capazes de computação, mas que a rede neural do cérebro humano não era do mesmo tipo que as redes de retropropagação. Se você pretende entender a natureza e aprender por meio dela, seus modelos devem incorporar os parâmetros segundo os quais ela realmente funciona - com a maior riqueza de detalhes que consiga reunir. O problema (expressado mais tarde em um artigo publicado por Brown e Tuszynski) era o de que “o esquema Hameroff-Rasmussen- Mannson consiste em um modelo funcionando à temperatura de zero absoluto, em que a propagação de sinais é um artefato do projeto do próprio modelo”.²⁷ Para que funcionasse, ou seja, para que o modelo dos microtúbulos computasse, você precisaria imaginar que os microtúbulos estavam vivendo em um ambiente de 273°C abaixo de zero - dificilmente compatível com sistemas biológicos.

Além disso, descobriu-se que o efeito *preciso* de um dímero de tubulina sobre outro, do mesmo modo que a *exata* geometria de seu posicionamento em relação aos demais, provoca um efeito dramático sobre o potencial de

processamento de informações de um microtúbulo - da maneira que a regra de atualização precisa e a localização exata exercem efeitos sobre um autômato celular. Assim como ocorreu com Hopfield, a familiaridade de Tuszynski tanto com a fisiologia como com a física prestou-lhe grande auxílio. Uma pista importante foi o fato geral de que, *se um sistema se demonstrar capaz de um comportamento semelhante ao de um vidro rotativo*, “são inerentes na dinâmica do sistema físico de rotações interagentes as propriedades que lhe permitem representar e computar”²⁸, nas palavras de Terence Sejnowski, que desenvolveu o programa NetTalk e as aplicações do enrijecimento quântico nas redes de Hopfield.

Os sistemas rotativos, naturalmente, não são desenhados de maneira manual, e os microtúbulos se demonstraram mais semelhantes a vidros porque, do mesmo modo que um vidro rotativo é como autômatos celulares capazes de sincronização, também utiliza a competição e a cooperação ao mesmo tempo, ou seja, a “frustração”.

Em 1993, Tuszynski e um grupo de colegas esboçaram um retrato novo, extremamente mais rico em detalhes do que poderia estar ocorrendo no interior dos microtúbulos, um retrato que incorporava todos os detalhes até então conhecidos sobre os microtúbulos reais.²⁹ O que resulta do modelo de Tuszynski é surpreendente. Uma vez que a temperatura corporal é do jeito que é (*jámais* um zero absoluto); devido aos parâmetros precisos envolvidos nas relações entre os dímeros de tubulina dentro de uma região determinada; e ainda porque tais parâmetros favorecem uma circunferência por unidade de valor ímpar (13 moléculas), com a disposição de hexágonos em posição enviesada de maneira a formar um tubo helicoidal; os microtúbulos que existem exclusivamente no sistema nervoso humano podem funcionar *tanto como transmissores eletromecânicos de sinais ao longo de seu comprimento quanto como computadores paralelos do tipo dos vidros rotativos helicoidalmente> no sentido de sua circunferência*. Se você quiser pensar neles como sendo um autômato celular, trata-se de um autômato celular levemente enviesado e enrolado para formar um tubo com uma cesura longitudinal. E esta cesura [o local em que as beiradas laterais se juntam] que causa a frustração circunferencial, ao longo de seu comprimento, que permite a propagação. No final, quaisquer que sejam as saídas que venham a computar em resposta a entradas recebidas, sempre serão transmitidas. Se for considerado como um “fio”, será um *fio inteligente*, do tipo que a pesquisa sobre a nanotecnologia está tentando desenvolver, um fio *que processa os sinais adaptativamente à medida que os transmite*. (Os detalhes de como funciona podem ser encontrados no

Apêndice B.)

Além disso, o padrão adaptativo da atividade de um neurônio, enquanto participante de uma rede neural viva, altera o processamento de sinais que ocorre ao longo de sua própria rede microtubular interna. As características de processamento de todos os neurônios individuais na rede são, de maneira idêntica, afetadas por mudanças em sua rede interna de microtúbulos. Em resumo, a rede neural do cérebro é acoplada à rede microtubular neuronal interna e vice-versa. A rede microtubular, portanto, se adapta às exigências do cérebro como um todo, empregando a plasticidade neuronal como sua intermediária.

Qual a vantagem de um fio inteligente sobre um inerte? Conforme vimos, as estruturas inteligentes aprendem e se adaptam. Se os microtúbulos são uma parte-chave do desenvolvimento das estruturas neurais, seria adequado que fossem capazes de se adaptar às pressões que são transmitidas por meio da rede tomada como um todo. Em vez de dispormos de um mínimo de máquina adaptativa, permitindo que a aprendizagem e a inteligência se desenvolvessem somente no nível da rede de neurônios, cada neurônio individual se comportaria como uma rede adaptativa, do mesmo modo que cada ser humano inserido em uma rede social é, em si mesmo, uma rede complexa de elementos de processamento.

A construção de um cérebro de microtúbulos

Michael Conrad é o diretor do Grupo de Biocomputação da Universidade Estadual de Wayne, Detroit, Michigan, que modela sistemas biológicos complexos em diversos níveis de organização. Sua missão é a de desenvolver computadores moleculares, empregando os mesmos princípios da computação viva. Como o grupo de Hugo de Garis, no Japão, um dos projetos de Conrad é desenvolver um cérebro capaz de auto-evolução. Mas, diferentemente do cérebro concebido por Garis, que depende de um modelo de autômato celular (que evolui como uma rede neural), o cérebro concebido por Conrad emprega métodos que imitam tanto as redes neurais interneuronais ^{^r^} como o processamento *intraneuronal* de informações, em especial aquele que parece ser o empregado pelos microtúbulos.

Agindo assim, a equipe de Conrad se dirige àquelas maneiras segundo as quais a pressão para adaptação (as condições-limite de um autômato celular ou de uma rede de Hopfield que constroem a paisagem de energia; a aprendizagem supervisionada de uma rede de retropropagação; as condições que determinam quais das pastilhas comestíveis de HER serão ou não comidas e quando), ou seja, as pressões evolucionárias, coordena a adaptação *dentro* dos

neurônios, do mesmo modo que *entre eles*.

Seguindo o mesmo caminho que Rosenberg para modelar seu Perceptron sobre aquilo que era conhecido a respeito da retina humana, o grupo de Conrad incorpora o equivalente das montagens e desmontes de microtúbulos em seus processos computacionais, do mesmo modo que a relação biológica entre os sinais elétricos e a conformação física. O resultado é um sistema computacional que, mesmo em sua forma rudimentar, classifica padrões com sucesso, como as redes de Hopfield ou os mapas auto-organizáveis, e que respondem de forma bastante semelhante à de uma rede neural crescente, cuja eficiência deriva da natureza especificamente *oscilatória* de seus elementos — o “salto” conformacional dos dímeros de tubulina que deixa os microtúbulos tão semelhantes a vidros rotativos.

A rede de microtúbulos [...] suporta uma combinação de dinâmicas de crescimento e transmissão de sinais [...] formando um arco adaptativo intrínseco. Se a transformação dos sinais de entrada em sinais de saída for insatisfatória, as dinâmicas de crescimento são alteradas, o que também altera o processamento dos sinais. A sequência de mudanças estruturais e as alterações no processamento continuam até que o sistema convirja. [...]

Um [...] modelo [...] de adaptação de microtúbulos [...] compreende [...] a dinâmica do crescimento, a propagação de sinais e [...] a auto-estabilização adaptativa.

A propagação dos sinais utiliza a estrutura gerada pela dinâmica do crescimento. Os microtúbulos individuais são modelados como cordões de osciladores discretos com interações de vizinho para vizinho. Os sinais se propagam como ondas longitudinais ao longo dos microtúbulos e também entre os microtúbulos por meio de conexões mediadas por proteínas. [...]

A auto-estabilização adaptativa é semelhante ao enrijecimento simulado, porém com retroalimentação de erro. [...] A classificação dos sinais de entrada foi [...] realizada. O modelo ainda é grosseiro, em comparação com os sistemas naturais; porém, demonstra como é natural para a rede de microtúbulos exibir um *processamento adaptativo de sinais*.³⁰

Pareceria, contudo, mesmo tendo descido à escala de estruturas que têm somente algumas dúzias de bilionésimos de centímetro de diâmetro, que ainda não encontramos evidência de efeitos quânticos exercendo um papel explícito; e que não há necessidade, portanto, de apelarmos para a estranheza quântica, visando a explicar coisas como livre-arbítrio. E bem verdade que as mudanças conformacionais nas moléculas de tubulina dependem de um tunelamento de

elétrons para cá e para lá, entre os dímeros alfa e beta. Isso implica que eles possam fazer o mesmo que os “computadores quânticos” fazem? Não exatamente - não é aquilo que Penrose e outros estão esperando. Mas, assim mesmo, são capazes de fazer algo totalmente exclusivo que, de fato, traga o mundo quântico para o jogo e, quem sabe, possa puxá-lo para nosso próprio mundo. Vamos, então, dar um derradeiro salto em profundidade pela escala, cérebro adentro, até aquele nível em que os efeitos quânticos são tão cruciais quanto ubíquos, para dentro dos elementos que compõem os microtúbulos de seus neurônios.

15. O COMPUTADOR PROTEANO

A biologia molecular é a tentativa da humanidade de descobrir como foi que Deus engendrou a sua maior invenção — a vida. Da mesma maneira que acontece com todas as grandes invenções, os detalhes são muito secretos; todavia, mesmo os segredos mais bem escondidos podem vir a se tornar conhecidos. Considero um grande privilégio viver em uma época na qual Deus nos permite alcançar uma visão parcial de Seus planos de construção, o que fica somente a um pequeno passo de distância de nos dar o poder de controlar os processos vitais geneticamente.

Eu, sinceramente, espero que isso seja em benefício da humanidade e que não sirva, ao contrário, para a sua destruição.

- Arnold Neumaier, Institut für Mathematik, Universität Wien [Instituto de Matemática da Universidade de Viena] (1996).

Bob é um *nerd* esclarecido. Ele já compreendeu intuitivamente o fato de que o Universo, incluindo ele próprio, é uma máquina gigantesca e que toda vontade livre não passa de ilusão, em conjunto com Deus ou deuses, espíritos ou seja lá o que for. Só que esta certeza o está incomodando, porque ele está pensando em se casar e não deseja que sua noiva seja alguém que lhe foi predestinada desde sempre. Desse modo, descobriu um jeito de ultrapassar a mechanicalidade. Bob preparou uma experiência de fenda dupla e regulou o canhão de elétrons até que, em média, somente seja emitida uma partícula por semana. Ele deixa as fendas abertas e espera.

Até esse momento em que escrevo, tudo o que ele fez é *sentido* como tendo sido livremente escolhido, mas ele também *sabe* que não foi assim. Desde o começo dos tempos, foi inevitável que Bob existiria, que prepararia uma experiência dessa maneira e exatamente nesse período -, mesmo que ele ria do fato de pensar em si mesmo como tendo escolhido fazer o que está fazendo, ao mesmo tempo que sabe muito bem que não decidiu coisa alguma. Ele sabe, inclusive, que, devido aos efeitos quânticos, existe alguma probabilidade de *quepoderia* ter feito algo significativamente diferente. Mas também entende que, devido a todo esse processo que causa a eliminação de possibilidades pela lei das médias que o rodeia, essa possibilidade em particular é tão remota que sequer

merece consideração.

Assim, Bob fez com que as probabilidades quânticas viessem a trabalhar em seu favor. Alterou a tela que fica além da dupla fenda. Cada lado da tela, para a direita e para a esquerda da linha média, está ligado a um computador e, nos computadores, ele colocou uma mensagem em *e-mail* pronta para ser enviada: “*Eu te amo. Queres casar comigo?*” Entretanto, uma está endereçada a Alice e outra, a Alison. Se o próximo fóton detectado atingir o lado esquerdo da tela, a mensagem será enviada para Alice, e a mensagem para Alison será apagada. Porém, se o próximo fóton detectado aparecer do lado direito, a mensagem será enviada para Alison, e apagada a que pretendia mandar para Alice.

Em vez de jogar uma moeda para o ar, perguntar a uma cartomante ou “decidir por si mesmo” (uma ilusão!) - já que tudo isso provocaria resultados predeterminados -, Bob quer, para seu bem ou para seu próprio mal, ser o primeiro homem na história da humanidade a escolher *livremente* alguém com quem se casar, e *desse modo ele irá criar* -coisa que jamais aconteceu antes - *um futuro diferente* para si próprio e para todas as gerações futuras, com base no único exemplo genuíno de um fenômeno aleatório e não-determinado em todo o Universo. Mesmo que sua tentativa de experiência tenha sido predeterminada, Bob terá eliminado o efeito quântico de provocação de médias e terá forçado o aparecimento de um único evento individual que seria responsável pela escolha casual entre dois futuros imensamente diferentes em grande escala. Essas são as consequências de um *amplificador quântico*. Antes que os seres humanos viessem à existência, antes que desenvolvessem a teoria quântica, antes que pudessem testá-la, sequer seria possível imaginar que essa amplificação pudesse ser possível.

E claro, para que o casamento fosse totalmente sem causa, qualquer das duas possíveis candidatas deveria repetir a experiência com dois *e-mails* também diferentes: “Sim” ou “Não”. (Se a resposta que chegasse fosse “não”, Bob poderia considerar que *ele* tinha sido submetido ao processo provocador da predominância das médias.) Não importa qual seja a resposta, o ato inicial de Bob, o seu pedido de casamento quântico, aceito ou não, produzirá um resultado que não foi determinado por nada.

Biologia quântica

Desde que foi declarado pela primeira vez que a mecânica quântica possuía alguma conexão misteriosa com a vida em geral, e com a liberdade de ação humana em particular, os céticos fizeram piadas dessas afirmações, como vimos

anteriormente. Os eventos quânticos não têm nada a ver com a biologia, nem mesmo em escala microscópica, argumentam eles, quanto mais com ações realizadas na escala humana de decisões. Mas a forma como Bob abordou seus romances nos permite ver que os cééticos estão totalmente errados e que evidências se encontram à frente de nossos narizes: *os seres humanos vêm sendo amplificadores quânticos desde que, pela primeira vez, imaginaram experimentos - como o da fenda dupla - que geraram resultados quânticos dicotômicos em escalas perceptíveis nas condições da vida diária.*

Ora, um sistema 100% mecânico não pode, em nenhuma circunstância, gerar um resultado indeterminado. Uma verdadeira liberdade de ação *deve* existir em algum lugar dentro do sistema - não apenas dentro, mas como um aspecto da configuração de seus elementos materiais. A única fonte conhecida de perfeita liberdade de ação reside na natureza quântica da matéria. Se for possível demonstrar que os seres humanos apresentam algum tipo qualquer de liberdade para agir fora de determinações rígidas e mecânicas, essa capacidade ou teria de derivar amplificadamente da natureza quântica da matéria ou surgir de alguma outra fonte misteriosa. No entanto, os únicos exemplos definitivos de que os seres humanos geram ações irrefutavelmente não-predeterminadas são as situações semelhantes à de Bob, isto é, quando amplificamos para a escala superior os eventos quânticos e os dispomos em nossa própria escala de existência.

E isto que concluiremos:

- o fato de que os seres humanos têm capacidade de se evadir ao determinismo mecanicista foi finalmente demonstrado - ainda que a física quântica não tenha sido desenvolvida para esse fim nem seja essa a maneira como vem sendo encarada desde sua descoberta;

- as únicas ocasiões em que essa Uberdade é certa são aquelas em que sabemos que estamos agindo como ampUficadores quânticos. Portanto, a única H-berdade humana plenamente certa se origina na amplificação dos eventos quânticos.

Embora, à primeira vista, possam não parecer assim, essas conclusões impactam, de maneira muito direta, sobre a biologia e a neurociência, e seus possíveis relacionamentos com os efeitos quânticos. Podemos começar com uma objeção ao que foi declarado, a saber, que construções humanas “deliberadas” de experimentos e dispositivos quânticos são “artificiais”. Mas é recomendável que você retroceda um passo para enxergar melhor e reconsiderar. Tudo é apenas

uma questão de perspectiva e de escala. Os seres humanos são sistemas biológicos. Em algum momento de sua evolução (em um piscar de olhos, segundo a escala cósmica do tempo), sua capacidade para amplificar eventos quânticos tornou-se evidente. Desse modo, esses sistemas biológicos (pelo menos) tiveram este potencial guardado todo o tempo em sua natureza material e devem ter evoluído para que fosse possível realizar este potencial. Faz sentido, portanto, procurar esses eventos quânticos dentro da configuração material específica da matéria de que esses sistemas foram construídos.

À luz do consenso científico de que a estrutura humana é material e de que as formas assumidas por seus componentes materiais não diferem em essência da matéria e da estrutura de outros exemplos de vida terrestre; à luz do consenso científico de que o *cérebro* do homem, em particular, não é diferente do cérebro de muitos outros animais “inferiores”; à luz do consenso científico de que o cérebro humano evoluiu a partir de estruturas “inferiores”, mas a ele comparáveis; e à luz do fato de que, de uma maneira específica, o *cérebro* humano evoluído, mas material, sonhou e projetou os únicos amplificadores quânticos conhecidos no Universo, faz todo sentido olhar para o cérebro e suas subestruturas como o sistema vivo que mais deveria ter evoluído para tirar vantagem dos efeitos quânticos e para amplificá-los em direção a escalas mais elevadas.

A priori, permanece apenas uma objeção a essas ideias: talvez os seres humanos sejam realmente um pouco diferentes; talvez nossos experimentos sejam realmente “artificiais” e, portanto, não constituam qualquer indicador daquilo em que os sistemas biológicos possam evoluir. Se isso for verdade, devemos atribuir aos seres humanos uma misteriosa fonte adicional de liberdade de ação, que não apenas não é exclusivamente biológica, mas que vai, com muita clareza, além do que a ciência pode detectar e confirmar. Porém, se fizermos isso, asseveramos, sem que tenhamos a mínima evidência, que o homem é misteriosamente livre -, apenas para evitar a possibilidade de que os eventos quânticos exerçam influência sobre a matéria viva.

Em resumo: a não ser que alguém demonstre que a teoria quântica está errada, a existência das experiências quânticas confirmatórias demonstra o ponto do qual a vida evoluiu em sistemas nervosos capazes de amplificar efeitos quânticos internos para uma escala de magnitude superior; e também a alegação de que (pelo menos alguns) sistemas nervosos podem, portanto, evadir-se ao determinismo mecanicista. Negar tudo isso, no entanto, é insuficiente para restaurar o determinismo mecanicista, como a maioria de seus críticos pensa. Ao contrário, isso restaura a *crença* no determinismo mecanicista e rejeita, por pura

arbitrariedade, as evidências *científicas* em contrário, por mais óbvias que estas sejam.

Entretanto, existe uma consequência assustadora da experiência realizada por Bob. Nossos cérebros são mecânicos, segundo assevera o argumento determinista. Mas podemos atrelar o nosso destino ao indeterminismo quântico e cometer ações que não eram predeterminadas. E se nós dermos mais um passo e construirmos cérebros artificiais que, de maneira diferente dos nossos, sejam baseados *diretamente* em eventos quânticos? Esses cérebros não poderiam ser mais espertos do que os nossos, mas nitidamente *superiores*? Talvez, como alguns alegam, Deus houvesse tido a intenção de criar seres à sua própria imagem e semelhança, criaturas que, como Ele, pudessem lançar os dados quânticos como um evento natural de sua vida cotidiana. O problema é que nos enganamos ao pensar que essas criaturas éramos nós, quando, de fato, são a nossa progénie. E tudo isso ainda nos deixa, nós, os seres biológicos, mais uma vez distantes da liberdade, não é certo?

Não inteiramente.

Computadores quânticos do segundo modelo

Imagine um novo tipo de cubo de Rubik. Seus 27 cubos componentes são, de fato, ímãs de diferentes forças magnéticas. Sua tarefa consiste em arranjá-los de maneira que a força repulsiva, resultante da interação de todos os magnetos (a energia), seja a mais baixa possível. E você deve fazer isso pelo tato. Se lhe parece difícil, considere que a natureza resolve cubos muito mais complexos em questão de segundos, vezes incontáveis por dia, simplesmente para conservá-lo vivo. Em outras palavras: *a dobra das proteínas para adquirir sua conformação adequada*.

A importância das proteínas não pode ser exagerada. Se o DNA é a planta esquemática da vida e o RNA o seu arquiteto, as proteínas são, ao mesmo tempo, materiais de construção pré-montados, as fábricas que realizam a pré-montagem, a companhia de construção encarregada de executar o contrato, os capatazes, as empresas terceirizadas, os operários especializados e, ainda, as ferramentas que utilizam. Elas transportam a matéria-prima até as fábricas e os operários até o local da construção. Não necessitam de inspetores de qualidade, de cálculos de preços ou de alvarás de construção. Não precisam de ninguém para planejamento de prazos, nem de despachantes, nem de inventariantes de depósitos. Tudo é construído de acordo com o código, no devido prazo e sem qualquer supervisão.

Seus orçamentos são mais baratos do que quaisquer outros. A quantidade de desperdício é espantosamente pequena. Elas protegem e cuidam do arquiteto, e se encarregam de garantir que ele se reproduza da maneira correta para produzir seus próprios substitutos. São o sistema de segurança de fiação infalível e a equipe de resposta instantânea. E todas essas funções dependem de formas precisas e das modificações nelas executadas de tempos em tempos. Por exemplo, para defender um organismo, reconhecem e incapacitam antígenos estranhos apenas mudando de forma e prendendo os invasores em um abraço mortal e depois recordam, enquanto durarem suas vidas, qual era o aspecto desses invasores de um dia. Buscando produzir sinais, devem reconhecer mensageiros químicos e prender-se a eles, transmitir-lhes o sinal e, depois, deixar que os mensageiros partam. Dessa forma, educam e preparam o sistema para a próxima transmissão e reciclam o mensageiro, para que este possa ser utilizado mais uma vez.

Do mesmo jeito, o formato é crítico para as partes componentes de uma proteína. Cada uma é formada por um cordão de moléculas menores, chamadas “aminoácidos”. Cada aminoácido tem um formato exclusivo e uma distribuição particular de cargas elétricas. Para que uma proteína funcione da forma adequada, este cordão frouxo de cento e tantos aminoácidos deve dobrar-se sobre si mesmo, da maneira certa, e não de outra - a maioria das evidências sugere que esse formato se encontra em seu mínimo de energia absoluto, ou muito próximo dele (como nosso cubo de Rubik magnético). Por que este problema é tão difícil? Porque o DNA codifica a sequência de aminoácidos que compõe uma proteína, mas não contém instruções para a conformação correta, nem para a sequência correta das dobras. E uma proteína de tamanho modesto *terpelo menos*, 400 trilhões de formas diferentes que ficam à distância de um fio de cabelo da conformação correta para uma determinada ocasião.

Com o objetivo de obter uma sensação da complexidade desse problema, iremos fazer uma breve excursão pelos aminoácidos e examinar seus relacionamentos com as redes neurais e com os vidros rotativos, e, no final, estaremos mais preparados para entender como um produto químico, que não dispõe de uma mente, pode resolver um cálculo imenso como este.

Nos seres humanos, todas as proteínas são construídas por 22 aminoácidos diferentes. A Figura 15-1 nos mostra quatro deles.

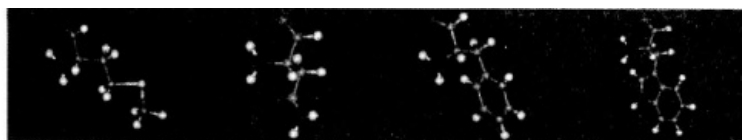


FIGURA 15-1. Quatro aminoácidos (da esquerda para a direita): o triptofano, a metionina, a asparagina e a fenilalanina. As esferas são átomos de um pequeno número de elementos (hidrogênio, carbono, oxigênio, nitrogênio e, ocasionalmente, enxofre); as varilhas representam ligações eletroquímicas formadas pelas valências dos elétrons de cada átomo.

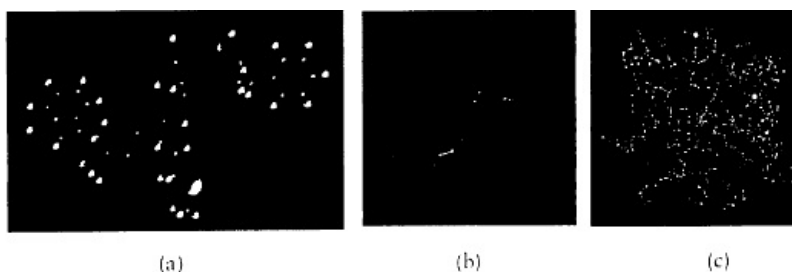


FIGURA 15-2. Cordões de aminoácidos. (a) Quatro aminoácidos. (b) Uma pequena proteína. (c) Uma proteína de tamanho médio.

Com o intuito de construir uma proteína, a célula lê a sequência de aminoácidos codificada em uma seção de DNA, captura os aminoácidos do reservatório disponível (a maior parte derivada dos alimentos que comemos) e os prende como contas em um fio. Um aminoácido se prende a outro formando uma ponte especializada (denominada “peptídeo”), de modo que a proteína torna-se realmente uma só molécula. Quando incorporado a uma proteína, com uma porção de si mesmo contribuindo para a formação de uma ponte de peptídeo, um aminoácido passa a ser referido como um “aminoácido residual” ou um “resíduo de aminoácido” ou ainda, simplesmente, um “resíduo”. Na Figura 15-2, da esquerda para a direita, vemos um fragmento de proteína composto por quatro aminoácidos residuais (mais as pontes de peptídeos intervenientes) e duas proteínas completas, a do meio pequena e a da direita de tamanho médio, compostas por um grande número de resíduos e de peptídeos.

Vamos comparar um dos mais simples aminoácidos, a alanina, com a amônia. Lembre-se de que a molécula de amônia apresenta um contínuo de formatos, em que dois são favoritos (por serem as configurações de energia mínima). Todos os seus estados podem ser representados no decorrer de uma única linha, que representa a posição de seu único átomo de nitrogênio ao longo de um eixo. A amônia pode vibrar um pouco, mas, como é constituída de moléculas triangulares, é extremamente estável. O único tipo de configuração que pode assumir é o de uma pirâmide, cuja altura pode variar. Em resumo, tem muito poucos “graus de liberdade” e, falando de um modo objetivo, apenas um: aquele que se movimenta ao longo do eixo de seu átomo de nitrogênio. Em

contraste, a Figura 15-3 mostra a alanina, com apenas *alguns* dos movimentos internos disponíveis para seus átomos constituintes.

Considerados em seu conjunto, estes tornam a alanina um “relógio” muito complexo. Com isso em mente, você poderá começar a entender o número de movimentos disponíveis para a mais simples das proteínas. As proteínas, assim, podem assumir um número astronômico de estados conformacionais, onde existe um número muito grande de pontos de energia relativamente mínima. Em uma “paisagem de energia”, cada grau de liberdade de cada átomo e de cada ligação de valência constitui sua própria dimensão. Um cubo de Rubik - mesmo o magnético que propusemos anteriormente - tem apenas nove graus de liberdade. Não obstante, em uma questão de segundos, as proteínas encontram as sequências corretas de dobras, a fim de atingir seu estado de energia mínima, o mais extraordinário e complexo problema de minimização que pode ser imaginado. Mas como? Não é simplesmente por tentativa e erro - sacudindo-se aleatoriamente, buscando várias combinações. Se fosse assim, a proteína iria precisar de mais tempo do que a duração do Universo até o momento presente. Apesar de décadas de pesquisas intensivas, realizadas nas principais universidades do mundo, com a aplicação de um poder maciço de supercomputação, até agora ainda é impossível descobrir, sem a menor pista, a configuração de energia mínima, mesmo para a cadeia de aminoácidos mais curta. “O problema do dobramento das proteínas” demonstrou-se à prova dos métodos tradicionais tanto da biologia molecular como da química teórica e da física.”¹

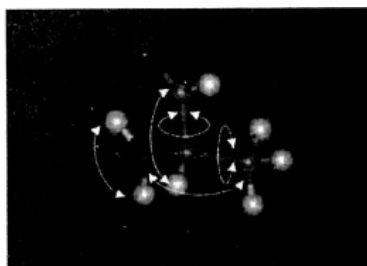


FIGURA 15-3. Alguns dos muitos “graus de liberdade” disponíveis para a alanina.

O origami orgânico

A sequência de resíduos de aminoácidos é a “estrutura primária” da proteína. Seu formato tridimensional correto é denominado “estrutura terciária”. O DNA codifica a estrutura primária para cada proteína, mas não sabe absolutamente nada sobre qual será sua forma final. Cada ligação de peptídeo pode girar e se retorcer à vontade; todavia, com a velocidade de um relâmpago,

as proteínas terminam por se dobrar da forma mais adequada.

Entre a sequência simples e a forma final, existe um nível de estrutura “secundária”. As subsequências de resíduos formam regiões denominadas *cordas*, *lençóis* ou *hélices*, conforme mostra a Figura 15-4.

Já que as proteínas são sintetizadas sem instrução para seu dobramento, devem proceder por meio de grande variedade de possíveis estados de dobradura (como seria com o cubo de Rubik), a fim de encontrarem a posição de energia mínima (veja Figura 15-5).



FIGURA 15-4. Estrutura da proteína. À esquerda, três tipos de estruturas secundárias; no meio, as estruturas 1ª & 3ª; à direita, as estruturas 1ª & 2ª. As imagens se fundem de uma maneira que podem ser vistas estereoscopicamente, isto é, em três dimensões.



FIGURA 15-5. Simulação do dobramento de uma proteína. A sequência de dobramentos mostrada é hipotética.

Fique atento, também, ao fato de que a configuração de energia mínima é a configuração mais funcional. Em outras palavras, muitas seções de cordas, chapas e hélices que estão espalhadas a distância uma das outras na estrutura primária em linha reta são reunidas na estrutura terciária final, visando a formar bolsões ou extrusões de formatos e cargas coordenados - todas sem possuir qualquer tipo de planta diferente da que formou a sequência linear. A proteína albumina, que é constituinte da clara do ovo, se enrosca de maneira precisa, por sua própria natureza. Quando o ovo é cozido, as forças de atração e de repulsão entre os resíduos e as regiões que constituem a forma de energia mínima para a proteína são superadas pela agitação térmica e ela se dobra, mais uma vez, em novo formato, ou se “desnatiza”. O líquido claro e viscoso se congela em um estado semi-sólido. Uma pequena evidência para a sutileza da forma albumínica é a sua viscosidade e transparência exclusivas; outra é o fato de que, sendo tão clara (a despeito de ser tão complexa) e composta por aminoácidos terrestres, todos apresentando um formato voltado para a esquerda, a albumina é capaz de polarizar a luz. Se for espalhada uma camada fina de albumina entre duas chapas de vidro fino, disporemos de um filtro de polarização rotativa.

Uma vez que o padrão de dobradura da albumina natural é tão complexo e preciso, o aquecimento e resfriamento do ovo de volta à temperatura ambiente

não poderá reverter o processo: as proteínas da clara de ovo cozida já se estabeleceram em um estado muito mais elevado do que o seu estado preferencial de energia mínima, mas este é, não obstante, um poço de energia mais ou menos profundo - como uma "cratera de vulcão". Assim, como fazem as proteínas para encontrar a conformação de dobradura correta e como evitam as (inumeráveis) armadilhas?

Através do espelho... outra vez

Somente após o desenvolvimento de redes neurais artificiais, de autômatos celulares e de mapeamento por meio de redes neurais e vidros rotativos, emergiu a pista crucial: a dobradura das proteínas apresenta muitas características de um problema de minimização do tipo apresentado pelos vidros rotativos.² As proteínas *se enrijecem* até atingir seu nível de energia mínima.³ Mas é aqui que reside o fato mais assombroso: *sua velocidade e eficiência em atravessar os estados intermediários, que fazem parte de qualquer processo de enrijecimento, simplesmente se encontram além do alcance de qualquer processo clássico conhecido.*⁴

Há um outro enigma também. Muitas funções importantes requerem de uma proteína que ela mude de forma rapidamente entre duas ou mais conformações de energia iguais ou quase mínimas - como o átomo de nitrogênio da molécula de amônia pulando para cima e para baixo, tentando oscilar entre seus dois estados de energia mínima idênticos, e aqui está envolvido um número fantástico de eixos ao longo dos quais a proteína deve "saltar", e não somente um. Isso é verdadeiro com relação a qualquer reação enzimática em nosso corpo e se aplica também às modificações conformacionais das moléculas de tubulina que subjazem às funções micro tubulares.

Além disso, deixar um local de energia mínima requer um gasto de energia (imagine reorganizar todos os seus livros; ou subir de um vale alpino até o alto da montanha e depois descer para o vale seguinte); todavia, as proteínas conseguem realizar essas alterações utilizando um mínimo de energia, liberado pela quebra de uma única ligação de valência química. (Imagine colocar em seu devido lugar o único livro escrito por Abe Aaron que possui e esperar que todos os demais livros de sua biblioteca se arranjem sozinhos por ordem alfabética.) Isso significa que a energia é alocada de algum modo com uma precisão cirúrgica e de maneira a desencadear uma sequência de modificações conformacionais, onde cada uma é ajustada com precisão, provendo a energia necessária para o ajuste da seguinte. As moléculas de tubulina, em particular,

modificam sua conformação para a frente e para trás entre seus dois mínimos de energia, em resposta ao movimento de um único elétron, que dirige a energia absorvida de uma onda mecânica de passagem com uma precisão que envergonharia Michael Tilson Thomas. Tentativas para modelar essa eficiência, empregando meios totalmente clássicos, simplesmente não conseguiram o menor resultado.⁵

A resposta para o enigma custou a chegar: *as proteínas tiram vantagem direta de efeitos quânticos, buscando fazer coisas que, de outro modo, seriam totalmente impossíveis*. Em particular, elas aproveitam todas as vantagens possíveis do processo de *tunelamento*.

Fantástico e confuso

Houve um tempo em que o átomo era modelado de acordo com o sistema solar, com os elétrons na condição de planetas em translação ao redor do núcleo representado pelo Sol. Mas lembre-se: os elétrons, na realidade, não possuem órbitas discretas (isto é, trajetórias fixas). Eles agem como ondas “deslocalizadas” (como vimos anteriormente). Na verdade, ocupam os “orbitais” - configurações confusas de amplitudes de probabilidades, como se viu nas experiências de fenda dupla. Por exemplo, um átomo de hidrogênio poderia ser desenhado como na Figura 15-6a.

Devido a determinada energia geral, a amplitude de probabilidades para um elétron se encontrar em uma localização específica é proporcional à densidade do pontilhado (granulação) que existe nesse ponto. A esfera oblata superior apresenta valores positivos, enquanto a inferior tem valores negativos. A probabilidade real de se encontrar o elétron em determinado ponto é igual ao quadrado da amplitude de probabilidades nesse ponto. (Ambas as probabilidades são, portanto, positivas.) Mas isso não significa que determinado elétron esteja lá antes que o encontremos: ele está, na realidade, em um estado de superposição de todas as localizações possíveis, ou seja, encontra-se “deslocalizado”.

Além disso, quando os átomos se combinam para formar moléculas, suas amplitudes de probabilidades superpostas são somadas *antes* de ser elevadas ao quadrado, o que significa que, em separado, dois átomos poderiam ter regiões em que há uma grande chance de um elétron ser encontrado; todavia, quando essas regiões se combinam, *não existe* uma chance maior de se encontrar um elétron ali: de fato, as possibilidades diminuem - ou desaparecem totalmente. Uma amplitude de probabilidades positivas para a região próxima a um dos átomos pode se remontar com uma zona igual, mas de amplitude de

probabilidades negativas referentes ao outro átomo, e sua adição será zero. Este é o mesmo fenômeno que ocorre na interferência entre ondas e pode ser encontrado apenas em sistemas quânticos. Dependendo da energia do sistema como um todo, a deslocalização e a interferência geram formatos diferentes e inesperados para uma “nuvem” de elétrons, como nas Figuras 15-6b, 6c e 6d.

Suponhamos que um elétron comece pertencendo mais ao átomo A do que ao átomo B - digamos que se encontra relativamente localizado. Ele ingressa em uma superposição de energia mais alta que é distribuída de maneira mais ou menos parelha (deslocalizada) entre A e B. Finalmente, quando devolve a energia, o elétron pode descansar em um estado no qual se localiza mais para perto de B - caso ocorra que este seja energeticamente o mais favorável. Assim, na verdade, mesmo que nada tenha se “movimentado” e que não existam “trajetórias” envolvidas, dizemos que o átomo A é o “doador do elétron” e que o átomo B é o “receptor do elétron”, enquanto o processo inteiro é referido como “transferência eletrônica”. O processo é o mesmo que ocorre em tunelamento. A tendência de dois ou mais átomos ou moléculas em compartilhar, ou seja, em “transferir” elétrons é denominado o seu grau de “acoplamento eletrônico”.

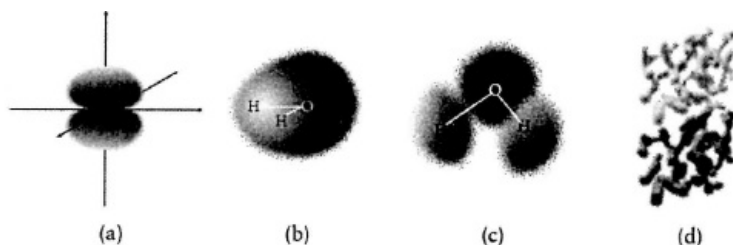


FIGURA 15-6. (a) O orbital $2p_z$ do hidrogênio. (b) e (c) Dois possíveis orbitais para uma molécula de água: observe a extensão das diferenças de deslocalização. (d) Uma das muitas configurações orbitais apresentadas pela molécula de tubulina.

Em geral, as amplitudes de probabilidades para elétrons que “pertencem” a átomos muito separados entre si, mesmo que se encontrem na mesma molécula, não se fundem desta maneira. Por muito tempo houve a suposição de que, considerando o fato de que o grau de acoplamento eletrônico diminui rapidamente com a distância, um tunelamento eletrônico de longa distância exerceria pouca ou nenhuma influência sobre moléculas biológicas - elas apenas são grandes demais. Mas, recentemente, descobriu-se que isso é incorreto. Lembre-se de como, dentro das circunstâncias adequadas - por exemplo, em uma experiência de fenda dupla -, os elétrons que causam a interferência podem aparecer em qualquer lugar do detector, mesmo a imensa distância. Descobriu-se que, em especial nas proteínas, existem “correntes” de tunelamento de longa distância altamente significativas.⁶

Primeiro pareceu que essas “correntes” deveriam viajar ao longo dos barbantes de peptídeos, do mesmo modo que uma corrente elétrica viaja ao longo de um fio. Mas era uma supersimplificação. Determinadas estruturas protéicas chamadas “pontes” (diferentes das pontes de peptídeos) apresentam a propriedade peculiar de favorecer o tunelamento eletrônico ao longo de sendas múltiplas e muito separadas entre si, mas apesar disso superpostas, todas com o mesmo começo e com o mesmo fim. A Figura 15-7 mostra uma situação dessas. E mais como os caminhos superpostos dos fótons em um ambiente duplo de separação de feixes do que em uma experiência de fenda dupla.⁷

Em outras palavras, durante algum tempo, uma porção da proteína se encontra em um estado de superposição que envolve distâncias substanciais. Além disso, as sendas quânticas superpostas podem interferir. Isso é impossível para elétrons semelhantes, de modo que acabam se transferindo ao longo de algum tipo de “estrada” fixa e conduzindo a efeitos que não se acham presentes em qualquer ponto de vista classicamente mecanicista dos processos biológicos⁸ - incluindo tunelamentos inesperados de longa distância. Para determinados tipos de pontes, a interferência é tanto destrutiva como não-local - a presença da ponte em um local causa interferência eletrônica destrutiva em outro, devido à presença de uma ponte distante. (Isso é parecido com o fato de que a inserção de um terceiro detector em um portão de separação de feixes destrói efeitos que acontecem em outros lugares.) Quando ocorre, o processo de tunelamento eletrônico pode se tornar profundamente sensível a graus de acoplamento que, de outro modo, teriam efeitos apenas menores. Um certo átomo distante poderia doar, mas não o faz, porque a probabilidade é muito baixa; todavia, um efeito ocorre de qualquer maneira: pense tanto em detecção quântica de bombas como em computadores que computam sem computar.⁹

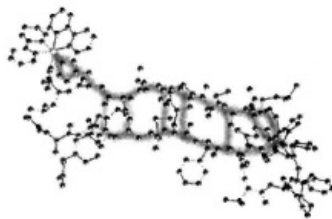


FIGURA 15-7. Tunelamento eletrônico de longa distância em uma proteína. As áreas com cinza desfocado representam caminhos superpostos. Observe as “pontes” que aumentam em muito o número de sendas possíveis da extrema esquerda à extrema direita.

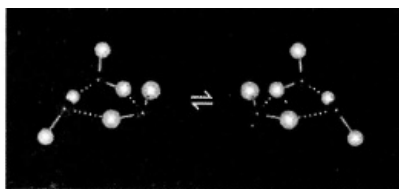


FIGURA 15-8. O tunelamento do hidrogênio cria enantiômeros como imagens especulares de conglomerados cíclicos de moléculas de água.

Diferentes estruturas e ambientações de pontes produzem influências também diferentes sobre o tunelamento. Por exemplo, o tunelamento em estruturas secundárias helicoidais demonstra “um enfraquecimento surpreendentemente fraco com a distância”, em especial se contiver muitos resíduos do aminoácido prolina.¹⁰ Isso também significa que a conformação da proteína, enquanto se dobra, influencia onde, se e até em que extensão o tunelamento ocorre.¹¹ E o contrário também é válido: o desaparecimento de um elétron aqui e seu reaparecimento lá adiante desencadeia transformações conformacionais - como ocorre nos dímeros de tubulina, cujos elétrons “móveis” tunelam entre os bolsos e justamente dessa maneira.

Tunelamento e quiralidade

Há situações em que o tunelamento cria resultados que não poderiam acontecer de outro modo. De fato, a molécula mais ubíqua e importante para a vida - aquela que nos cercava quando surgimos para a existência e da qual nossos corpos são formados isto é, a molécula da água, foi identificada como assumindo formas “quirais” (voltadas para a direita ou para a esquerda) e sendo, além disso, capaz de tunelar rapidamente entre elas¹² (veja a Figura 15-8).

Sem a quebra dos laços de valência e o rearranjo da molécula, *não há nenhum conjunto de rotações dentro de um universo tridimensional que possa criar uma imagem especular voltada para a direita (destrógira) a partir de sua versão voltada para a esquerda (levógira)*. Isso corresponderia a “rotar” uma molécula através de uma *quarta* dimensão espacial. A água ordenada dessa forma em conglomerados quirais executa um papel importante no dobramento das proteínas.

As proteínas evoluíram em um ambiente que permitia e incluía todos esses efeitos quânticos. No mínimo, os organismos biológicos terrestres devem ter se adaptado àquele ambiente, visando a garantir que esses eventos não *impedissem* o dobramento das proteínas. Sabemos disso porque elas efetivamente se dobram e o fazem muito bem. Sem dúvida, uma vez que estes efeitos de tunelamento

abririam atalhos para muitos estados diferentes e, de outro modo, inacessíveis, isso aumentaria a disponibilidade de estados de energia mínima entre eles; e como esses seriam favorecidos, haveriam de persistir. No final, com a ocorrência do tunelamento, esses estados de baixa energia seriam atingidos de forma rotineira. Desse modo, é provável que a vida teria aprendido a utilizar efeitos quânticos, e não apenas para evitar suas consequências negativas. Isso foi realizado, uma vez que os efeitos do tunelamento quântico parecem estar envolvidos nas transformações conformacionais requeridas para as catálises mediadas por proteínas.¹³ Por meio de algoritmos genéticos primordiais, ou seja, a evolução, a vida resolveu um problema extraordinariamente complexo de dinâmica não-linear, otimizando o dobramento de proteínas de tal modo que este se adaptou e aproveitou as vantagens de um meio influenciado pelos fenômenos quânticos. E agora, sim, estamos em posição de entender que a computação paralela que as proteínas executam não é a simples computação quântica do primeiro e mais comum tipo, mas sim uma computação de segundo tipo: o enrijecimento quântico (*quantum annealing*), daquela mesma forma a que aludimos no final da Primeira Parte.

Vibrações melhores

O enrijecimento quântico não requer, e sequer esperaríamos que estivesse associado a isso, um perfeito isolamento do ambiente sem o qual a computação quântica do primeiro tipo seria impossível. Apesar disso, em geral acontece que qualquer processo que se beneficie de uma agitação pseudo-aleatória (calor) se beneficie inversamente muito pouco do tunelamento. Os saltos frequentes, induzidos pela temperatura, interrompem o tunelamento e subjugam qualquer parte dele que tenha sobrado. Nas proteínas, contudo, é justamente o oposto que se demonstra verdadeiro, tornando ainda mais fortes as evidências de que a matéria viva aproveita, de maneira direta, as vantagens dos efeitos quânticos, a fim de realizar coisas que somente a vida consegue fazer.

Do mesmo modo que existem evidências sólidas de superposição *transiente* de longa distância de certas regiões da nuvem de elétrons de uma proteína, encontraram-se também evidências para *regiões transientes* de propagação de ondas sonoras classicamente coerentes nas proteínas - denominadas *fônons* (“partículas” de som). (Um tsunami pode ser considerado um fônon gargantuesco.) Quando as equações para essas formas localizadas, mas viajantes, de coerência mecânica clássica nas proteínas são calculadas e adicionadas às equações que governam o “movimento” quântico dos elétrons tuneladores,

revela-se que, *devido à retroalimentação entre o tunelamento e as modificações conformacionais, os fônons facilitam a distância e a frequência dos tunelamentos*}^A “[...] o processo de tunelamento mecânico quântico [...] para a transferência de elétrons envolve, de forma intrincada, uma dinâmica não-linear do meio protéico, dentro do qual o tunelamento ocorre. São a capacidade de acoplamento dos elétrons e os graus vibracionais de liberdade (fônons) que parecem apresentar importância crítica para a dinâmica da transferência dos elétrons nas proteínas.”¹⁵

O tunelamento, por sua vez, afeta a extensão da formação de fônons (de uma forma especialmente dramática, como será esclarecido em breve).¹⁶ Em resumo, as proteínas descobriram uma forma de criar um relacionamento reforçador entre as sacudidelas mecânicas clássicas e a estranheza quântica, de maneira que amplificasse seus poderes muito além do que seria possível se fossem apenas máquinas moleculares, como ainda são consideradas. A excitação fisiológica *impede* a coerência quântica individual, estacionária, em larga escala e de longa duração (à la Penrose), mas *favorece* as coerências múltiplas, migratórias, de vida curta e de pequena escala que, em honra de Max Born, podemos denominar...

Relâmpagos quanticamente lubrificados (Por que Max Born? Porque foi ele quem primeiro reconheceu que a mecânica quântica implicava a existência do acaso absoluto e requeria o abandono da causalidade newtoniana. E isso que permite a fantástica rapidez de desenvolvimento e a eficiência dos processos vivos. A propósito, sua neta chama-se Olivia Newton-John e ficou famosa por seu desempenho no musical Grease - Nos tempos da brilhantina)

Ao superpor-se em (tecnicamente) um número infinito de caminhos - *todos os caminhos possíveis* - *um elétron é capaz de buscar simultaneamente o caminho mais eficiente entre todos eles*. A proteína responde às modificações eletrônicas de estado, modificando sua conformação. A nova conformação, por sua vez, altera as probabilidades que determinam as diferentes sendas possíveis e altera, também, suas eficiências relativas. Assim, tanto faz se uma mudança conformacional completa de uma proteína inteira leve segundos ou minutos, mesmo minúsculas mudanças - na escala de vibrações - podem ocorrer praticamente de imediato e estas, como observamos anteriormente, apresentam efeitos críticos sobre o processo de tunelamento. Há, em outras palavras, um processo contínuo de retroalimentação, que é tão próximo do instantâneo quanto for possível imaginar. Então, até um ponto, podemos falar de “partes” do processo de dobramento da proteína que são lubrificadas, até que possam alcançar velocidades de relâmpagos por meio da confusão (*fuzziness*) quântica.¹⁷

Recentemente, um grupo de pesquisa liderado por Peter Wolynes, no Centro de Biofísica e Biologia Computacional da Universidade de Illinois, *campus* de Urbana-Champaign, foi capaz de modelar, pela primeira vez, o processo de tunelamento em proteínas: “Demonstramos com pleno sucesso que a teoria dos vidros rotativos e das redes neurais pode ser aplicada à [...] solução do problema do dobramento das proteínas”.¹⁸ Usando a formulação integral de caminhos por meio da mecânica quântica, conforme concebida por Feynman, o ato de tunelamento do elétron pode ser pensado como surgindo de uma superposição de muitos caminhos possíveis. [...]”¹⁹

No Centro Nacional para Aplicações de Supercomputação, Wolynes foi capaz de modelar com sucesso os 800 mil caminhos superpostos mais importantes de uma proteína. (A Figura 15-7 mostra um punhado de caminhos hipotéticos.)

No final da Primeira Parte, em nossa discussão sobre o enrijecimento quântico, observamos que, “se o tunelamento entre estados [...] for permitido em um sistema, sua função computacional é espantosamente desenvolvida”. Isso foi experimentado na realidade em uma minimização de “vidro rotativo de Coulomb” - que casualmente parece estar em relação íntima com o dobramento de proteínas²⁰ -, com resultados cem vezes mais eficientes do que quando o modelo foi experimentado sem tunelamento. Em um problema semelhante, o tunelamento tinha também muito mais probabilidades de permitir a um sistema que se enrijecesse até seu mínimo *absoluto* de energia do que quando se tentava provocar o enrijecimento sem tunelamento. As proteínas atingem estados de energia mais baixos não apenas por um tunelamento abstrato entre ‘estados’ em uma paisagem de energia, mas por meio do “teletransporte” físico dos elétrons, se você já aceita o termo, de um ponto no espaço para vários outros (veja Figura 15-9.)

Nas proteínas, portanto, vemos que a natureza aprendeu a aproveitar as vantagens oferecidas por intrusões ambientais e talvez tire vantagem da própria decoerência: cada explosão de superposições que ocorre com a velocidade de um relâmpago perde a coerência bem no estado não-superposto correto, o que permita à proteína preparar-se para a explosão seguinte de superposições. Desse modo, uma sequência de eventos aparentemente não-orquestrados resulta em deixar a proteína dobrada de uma forma tão rápida e precisa que se acha além da imaginação, dentro de um universo puramente determinista. Este processo ocorre sem cessar no interior de cada ser vivo, em trilhões de trilhões de proteínas dentro dos trilhões de células que podem compor esses organismos.

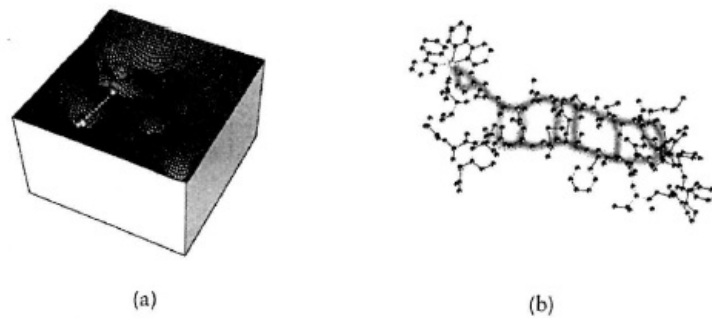


FIGURA 15-9. Acesso direto a um estado de baixa energia via tunelamento por mecânica quântica. (a) Estado representado como a localização de uma bola em uma paisagem de energia ("espaço energético"). (b) Caminhos de tunelamento representados no espaço físico, como vimos anteriormente na Figura 15-7.

São os elétrons que fazem, mas os prótons também fazem

Os átomos de hidrogênio nas proteínas, com seu núcleo de um único próton, que é três ordens de magnitude maior que seus elétrons, também são capazes de tunelar por longas distâncias, e isso já foi demonstrado como sendo uma condição essencial para o funcionamento das proteínas e, em particular, para sua ação enzimática. E, novamente, à medida que a proteína se modifica, suas estruturas alteram o tunelamento dos prótons, influenciando a conformação das proteínas.²¹

Em particular, duas recentes descobertas envolvendo o tunelamento de átomos de hidrogênio são dramáticas. Um grupo na Universidade de Leicester, Inglaterra, descobriu que, tanto as superposições "extremas" de prótons são possíveis em proteínas, a despeito das vibrações ambientais, como essas vibrações ambientalmente induzidas são *requeridas* para que isto possa acontecer. Tunelamento "extremo" designa o tunelamento que começa no estado de energia mais baixa, ou *ground* (básico) - normalmente o mais crítico ponto para início de tunelagem, uma vez que os objetos nesse estado são os menos deslocalizados. O calor externo estabelece vibrações internas na proteína, e os prótons em estado de energia básica empregam essas vibrações a fim de tunelarem para locais distantes.²² De fato, "em longas distâncias [...] o tunelamento [...] modificado por fônons (vibrações) [...] sempre é dominante com relação ao [...] tunelamento espontâneo".²³

Em outras palavras, uma vez que o próprio tunelamento é um processo intrinsecamente aleatório, por absorverem calor - o que quer dizer desordem - do ambiente, as proteínas são capazes de iniciar processos computacionais ordenados de maneira espontânea, sem precisarem ser "ativadas" para esse fim

por meio da aplicação de energia direcionada. E o mesmo fenômeno descrito como "levantar-se pelas alças das próprias botas", pois a vida parece ser capaz de empregar os efeitos quânticos como uma espécie de "catraca", extraindo ordem e atividade controlada a partir da desordem. Essa é, pelo menos, uma das fontes de sua extraordinária eficácia, que se aplica no dobramento das proteínas e nos processos vitais de caráter mais geral: "Os motores moleculares são constituídos por moléculas individuais de proteína que utilizam o movimento browniano aleatório. Por exemplo, os motores moleculares impulsionam a contração dos músculos e realizam o transporte de material intracelular (uma das funções da rede de microtúbulos). Como o tamanho das moléculas de proteína é muito reduzido, é provável que elas empreguem efeitos quânticos para executar suas tarefas, mas a nossa compreensão dos motores das proteínas está apenas começando".²⁴

Pesquisas muito recentes tendem a confirmar que a vida encontrou maneiras extraordinariamente engenhosas para a incorporação dos efeitos quânticos. Em junho de 1999, o grupo de pesquisas chefiado por Judith Klinman, em Berkeley, Califórnia, publicou um estudo sobre uma enzima metabolizadora do álcool encontrada em um organismo amante de altas temperaturas, o *Bacillus stearothermophilus* que prospera em temperaturas perto de 65°C (150°F). Em geral, a proporção de transferência de prótons em enzimas que ocorre via tunelamento tende a baixar na ordem inversa do aumento da temperatura, tornando-se mais proeminente, portanto, em baixas temperaturas - do mesmo modo que os fenômenos quânticos são arruinados pela agitação aleatória produzida pelo calor. Pesquisas anteriores realizadas por seu grupo haviam demonstrado que um tunelamento significativo do hidrogênio ocorria nas proteínas, porém em temperatura ambiente, como ocorre com os elétrons.

Mas, no caso da enzima metabolizadora do álcool, encontrada no *Bacillus stearothermophilus*, o tunelamento do hidrogênio de fato *aumentava* em temperaturas acima da ambiental. As capacidades de tunelamento da criatura haviam evoluído de tal modo a aproveitar as vantagens do nicho ecológico incomum ao qual se havia adaptado²⁵ - nas proximidades das fendas vulcânicas sob o oceano.

Nossas presentes descobertas sobre a transferência do hidrogênio em condições fisiológicas não pode ser explicada sem o envolvimento tanto de mecânica quântica como de dinâmica enzimática.

[...] A implicação da dinâmica protéica sob tunelamento, vibracionalmente favorecido na modulação das etapas químicas, torna mais fácil entender por que [...] os modelos padronizados [...] frequentemente não conseguem atingir

nem de perto as taxas de aceleração observadas.²⁶

As proteínas parecem ter até mesmo aprendido como aproveitar as vantagens do tunelamento protônico nas moléculas imediatamente adjacentes da própria água. O tunelamento, como recentemente descobrimos, é aparentemente ubíquo - incluindo as transformações de conglomerados de moléculas levógiras para moléculas destrógiras, como se tivessem atravessado uma quarta dimensão.²⁷

A evolução é um algoritmo genético quântico?

Falando de uma maneira bem clara, não é provável que esses fenômenos tivessem surgido apenas por acaso. Eles são o resultado de um processo adaptativo que evoluiu com estruturas sensíveis ao tunelamento - por exemplo, hélices atravessadas por pontes.²⁸ Mas as proteínas não são as únicas biomoléculas com hélices atravessadas por pontes. O DNA é, sem dúvida, a mais famosa dessas estruturas (veja as figuras 15-10a e 15-10b).

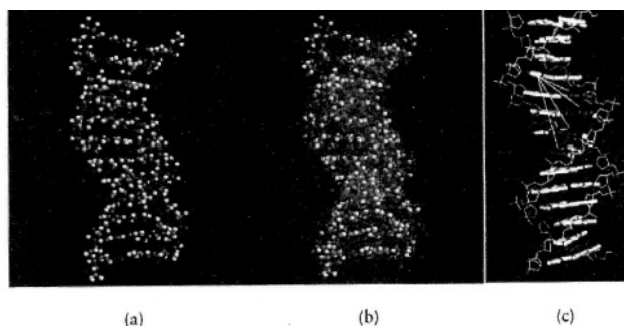


FIGURA 15-10. Segmento de DNA. (a) Representado por bolas e varilhas, respectivamente como núcleos e ligações de valência. (b) Raio de alcance médio dos elétrons. (c) Transferência de elétrons no DNA. As linhas retas mostram as origens e os destinos, não os caminhos seguidos.

Em uma série de magníficas experiências realizadas nos últimos anos na Universidade de Stanford, Jacqueline Barton e seus colegas de trabalho demonstraram que o tunelamento de elétrons no **DNA** ocorre em até 60 pares básicos.

As implicações da migração de cargas de longo alcance por meio do DNA, a fim de efetuar danos, são substanciais. [...] Essas reações dependem [...] da integridade dos pares da base interveniente, porém *não da distância molecular* (veja Figura 15-10c.) De modo semelhante, uma lesão no DNA fisiologicamente importante [...] pode ser revertida em uma reação iniciada por transferência eletrônica, e esta reação reparadora também pode ser promovida *a distância*.²⁹

Isso significa que tanto a evolução normal (envolvendo mutações e transferência de segmentos) como o câncer (envolvendo lesões no DNA) são, em parte, processos não-deterministas, influenciados por “causas” que não podem ser encontradas em qualquer outra parte do universo físico. Além disso, o processo de reparos citado acima, como podendo ser “promovido a distância”, *não somente poderia ser “não-causado” como absolutamente impossível sem o emprego de efeitos quânticos*. Em uma entrevista, Barton concluiu: “Estamos falando a respeito de distâncias biologicamente relevantes, e você pode formar as fantasias que desejar sobre quais poderão vir a ser as implicações disso”.³⁰

Em outras palavras, a alegação de que “tudo pode ser reduzido a interações mecânicas simples e óbvias - a célula é uma máquina; o animal é uma máquina; o Homem é uma máquina”³¹ - está parecendo cada vez mais duvidosa. Pelo menos, o estofo formador da vida é uma “máquina” somente no sentido de que a mecânica quântica é “mecânica” - perfurada de cima a baixo por incalculáveis eventos não-causados e, possivelmente, ocorrendo em um número quase infinito de universos paralelos capazes de se comunicar entre si.

Pelo menos um grupo vem realmente considerando a possibilidade de tunelamento protônico no DNA, assim como tem levantado a questão de uma estranha interação mútua entre várias doenças e a evolução - considerando que ambos são um único processo quanticamente mediado: “O modelo ainda ilustra como certas doenças genéticas poderiam ser o resultado de lesões evolutivas alterando as especificações genéticas de códigos [...] ‘sensíveis ao tunelamento de prótons’ [...]”³²

Algumas outras “estranhas fantasias”, que muito em breve podem não mais parecer tão estranhas, incluem as especulações de que doenças “ricas de informações” - o HIV (vírus da imunodeficiência humana), por exemplo, que apresenta interfaces com o sistema imunológico (outro importante modelo do paradigma computacional na biologia) - sejam ricas em eventos quânticos.³³ A partir desse ponto, a batalha entre o corpo e a AIDS - tão difícil devido à rapidez com que o HIV sofre mutações e se adapta à qualquer arma que o sistema imunológico lance contra ele - é mais uma batalha de mágicos em miniatura do que entre máquinas microscópicas: uma guerra de adaptações travadas por oponentes com igual acesso a oportunidades quânticas.

Alguns pesquisadores avançaram muito além nessas especulações. Por exemplo, Michael Conrad, diretor do Grupo de Biocomputação da Wayne State University, argumentou que um “superfluxo protônico” - uma superposição dinamicamente flutuante de todos os átomos de hidrogênio existentes - é ubíqua nas proteínas,³⁴ o que é muito menos especulativo que as 20 mil células

superpostas nas redes de microtúbulos de Penrose e Hameroff, porém muito mais do que a maioria dos cientistas atuais é capaz de aceitar. Todavia, no momento em que Conrad apresentou essa proposta (1990), a própria ideia de superposição e tunelamento de até um único próton em biomoléculas era recebida com grande ceticismo pela maioria de seus colegas.

Vamos voltar ao Bob

Acabamos de saber que Bob se casou com Alison. Depois de receber o seu “sim”, pelo matrimônio, colocaram em movimento uma cadeia exclusiva de eventos que jamais haviam sido predeterminados. Demonstramos, assim, que o cérebro humano é capaz de amplificar os efeitos quânticos para a escala da vida terrestre, ou, pelo menos, alguns cérebros humanos são capazes, sendo o de Bob o mais notável entre eles. Devido à escala do Universo, será que realmente importa se a escala em que ocorrem as amplificações é a dos átomos ou aquela correspondente ao tamanho de uma *grapefruit*?

A resposta de um filósofo é: “Não, não importa”. O cérebro de Bob, do tamanho de uma *grapefruit*, é uma “caixa preta” para nós. E evidente que o cérebro de Bob é um amplificador quântico, mas é também uma máquina mecânica? Se for assim, máquinas mecânicas, que não dispõem de qualquer livre-arbítrio, podem incorporar efeitos quânticos e gerar resultados de outro modo indeterminados, o que faz com que deixem de ser mecânicas. E se, para começar, o cérebro de Bob nunca foi uma máquina mecânica? Em qualquer caso, o assunto está encerrado. Agora, não é mais uma máquina, se alguma vez chegou a ser.

Mas existe alguma coisa escorregadia demais sobre este argumento da “caixa preta”. Seria muito bom que pudéssemos demonstrar que a computação quântica do segundo tipo, que funciona o tempo todo nas proteínas - em particular, nas moléculas de tubulina -, é diretamente amplificada para uma escala superior por meios conhecidos. Mas, para mostrar isso, teríamos de responder a duas questões. A primeira é: “Existem maneiras (além das manipulações deliberadas de alguém) por meio das quais minúsculos efeitos quânticos possam ser amplificados para a escala superior da vida diária, em vez de serem simplesmente anulados pela lei das médias?” Se a resposta for “sim”, e formos capazes de dizer quais são esses meios, deveremos responder à segunda pergunta: “Há alguma evidência no sentido de que esses meios estejam presentes no cérebro humano e sejam empregados por ele?”

Há boas razões para suspeitar que a resposta para ambas as perguntas seja “sim”. No que se refere à primeira questão, em geral, os sistemas que são

predispostos ao caos rotineiramente tomam diferenças de uma escala minúscula e as amplificam para uma escala superior. Para que um sistema seja capaz de caos, deverá ser iterativo, isto é, caracterizado principalmente pela existência de arcos internos e retorno tal que pequenos efeitos locais espontaneamente gerem padrões em grande escala. Para que algumas diferenças realmente minúsculas em determinada escala pequena possam ser amplificadas e subir por muitos graus de escalas, com possíveis tipos de estruturas em muitos dos estágios intervenientes, as exigências são ainda mais específicas. A estrutura principal em cada nível deve ser também iterativa de uma forma ou de outra. Assim, as diferenças inicialmente minúsculas geram um padrão exclusivo em algum ponto da escala intermediária, que servirá como uma pequena diferença dentro de um único elemento entre muitos semelhantes a ele em uma escala maior, ou será amplificada também para cima, e assim por diante.

Quanto à segunda questão, sabemos que a explicação dada anteriormente é a forma segundo a qual o cérebro humano é estruturado. Precisaria ser estruturado dessa maneira, em cada grau da escala, de maneira que pudesse operar como um computador paralelo auto-organizador, um computador que fosse capaz de gerar uma ordem global a partir de efeitos apenas locais. Mas são essas características que causam também a apresentação de potencial caótico em cada escala e, desse modo, permitem a amplificação para a escala superior - e não o cancelamento pelos valores medianos - das diferenças que surgem como consequência de escalas ainda menores na próxima escala inferior. A grande “causa não-causada” sobre a qual os teólogos especularam por tanto tempo se encontra em toda parte à nossa volta e também dentro de nós, de cuja liberdade nossa liberdade é afirmada ser um reflexo, não é uma descrição assim tão má, afinal de contas, daquilo que de fato parece existir. Vamos ver como funciona.

16. UM BRINDE À SORTE INCONSTANTE, E QUE O CAOS JULGUE A DISPUTA!

Ou é um Universo muito bem organizado ou um caos que se encolheu e abraçou a si mesmo, porém, em qualquer caso, é um Universo, mesmo assim. Mas pode uma certa ordem subsistir dentro de ti, enquanto se encontra a desordem no Todo?

—*As meditações de Marco Aurélio, IV: 27 (século II).*

Em cada escala, desde o córtex cerebral como um todo até as proteínas individuais, a matéria que forma o quarto cérebro humano funciona como um processador paralelo de um tipo ou de outro. Esses processos formam uma hierarquia estabelecida, fazendo com que um computador paralelo completo em uma escala seja apenas um elemento de processamento na próxima escala mais elevada (veja a Figura 16-1).

Enfocamos as características exclusivas do processamento em cada escala, do mesmo modo que observamos ser variações de um tema comum: computação paralela auto-organizada. Todas as formas de computação paralela requerem a *iteração*: os dados se repetem e circulam sem parar nos processadores paralelos. Arcos de retroalimentação de sofisticação e complexidade variadas formam as estruturas de cada um dos cérebros humanos, do primeiro ao quarto, formando *osciladores*. O insumo entra em um elemento, é modificado de acordo com alguma regra, talvez seja transmitido como entrada para outras unidades, em que é transformado mais um pouco e pode retornar em forma alterada para a unidade original, em que o ciclo recomeça.

Os efeitos da iteração em uma escala sobre o comportamento de agregados em escala maior não são aqueles pensados por longo tempo pela ciência. É claro que *toda matéria é organizada segundo escalas*: um pedaço estático de pedra tem volumes de grande escala ligados entre si por planos de fratura; esses volumes são compostos por regiões desordenadas de materiais cristalinos: cada região é composta por muitos cristais alinhados entre si; os cristais são compostos por moléculas, e assim por diante. Uma hierarquia de escalas semelhante existe nos sistemas dinâmicos - a água correndo em um regato, por exemplo. Nesses sistemas dinâmicos, o movimento dos elementos na menor escala se combina para criar padrões nas escalas maiores. Mesmo que fosse possível derivar a

dinâmica da grande escala, literalmente adicionando os movimentos individuais de cada um de seus menores elementos, isso constituiria uma perda de tempo. Ao tratar as ações em pequena escala *estatisticamente* - presumindo, em outras palavras, que a maioria de suas ações são canceladas pela lei das médias - a ciência atingiu aproximações muito precisas da dinâmica de inúmeros sistemas compostos por números de elementos menores.



FIGURA 16-1. Integração das escalas computacionais de uma rede. O gênero humano ocupa um volume de aproximadamente 8×10^6 metros cúbicos; uma proteína ocupa um volume de aproximadamente 6×10^{-26} metros cúbicos; a diferença de escala é de cerca de 32 ordens de magnitude (10^{32}). As redes em forma de estrelas representam qualquer formação de processamento paralelo distribuído.

O caos clássico

Entretanto, foi somente no século passado, especialmente no último quarto, que os cientistas aprenderam que, para os sistemas iterativos, o cancelamento estatístico das médias não funciona. Em hierarquias iterativas, as pequenas diferenças não são diluídas e são, em geral, amplificadas. Essa foi uma descoberta chocante e deu origem à explosão de um novo campo de estudo dentro das matemáticas e das ciências - a Teoria do Caos. Descobriu-se, também, que a Teoria do Caos não é importante somente no estudo de situações excepcionais. Pelo contrário: “Os sistemas não-caóticos são quase tão escassos quanto dentes de galinha, a despeito do fato de que nossa compreensão física da natureza é, em boa parte, baseada em seu estudo”.¹

Considere o sistema de rotação auto-organizador que discutimos antes (reproduzido na Figura 16-2): ele começou em dois estados iniciais muito diferentes e evoluiu, de modo iterativo, na medida em que as rotações interagiam. Os dois estados finais eram também muito diferentes: havia somente uma chance de 50 por 50 de que qualquer célula em particular (rotação) tivesse a mesma cor (direção da rotação) em ambas as execuções. Enfatizamos o fato de que, mesmo assim, os padrões gerais eram reconhecivelmente similares. Os resultados eram, portanto, “ordenados”, mas dentro dessa ordem, altamente variáveis - como vacas diferem dentro da mesma raça Guernsey [chamada entre

nós de Jersey].

Poderia parecer que as diferenças em larga escala dos estados finais resultassem das *muitas* diferenças individuais, em pequena escala, que já existiam no estado inicial. Mas não é necessariamente assim. Uma vez que a evolução é iterativa, *mesmo diferenças iniciais minúsculas geram diferenças igualmente grandes no estado final*. Na Figura 16-3, o mesmo programa de rotação simulada é empregado para iterar dois estados iniciais que diferem por apenas uma rotação em 1,6 mil (a seta horizontal identifica a linha em que uma rotação foi girada) e por uma diferença inicial de um vigésimo de 1%, e, mesmo assim, de novo, vemos que, no final, há somente uma chance de 50 por 50 de que qualquer célula em particular tenha a mesma cor em ambas as execuções.

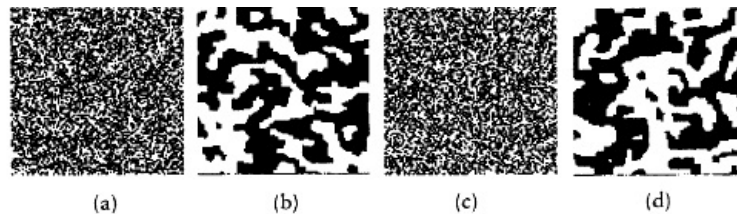


FIGURA 16-2. Evoluções da rotação de dois estados iniciais muito diferentes, (a) e (c), para dois estados finais também muito diferentes com padrões similares, (b) e (d).



FIGURA 16-3. Evoluções da rotação de dois estados iniciais muito semelhantes (esquerda), para dois estados finais muito diferentes com padrões similares (direita).

Essa “extrema sensibilidade às condições iniciais”, como é denominada, é uma característica de todos os sistemas iterativos e, em parte alguma do Universo conhecido, se encontra uma estrutura mais densamente iterativa que o quarto cérebro humano. E essa densa iteração que dá ao cérebro sua enorme capacidade computacional, como vimos, mas isso também significa que a maneira segundo a qual o cérebro administra a transição do extremamente pequeno para a escala cotidiana será muito diferente de um sistema não-iterativo e não-inteligente, cuja dinâmica se conforma às abordagens estatísticas usuais.

No cérebro humano, o processamento paralelo auto-organizado (e, portanto, sua iteração) ocorre em cada escala, é influenciado pelos requisitos adaptativos da escala imediatamente superior e, por sua vez, exerce influência sobre o processamento que acontece na escala imediatamente inferior. Os resultados

finais, em cada escala, constituem os estados iniciais dos elementos individuais na escala logo acima dela. Uma vez que “estado inicial” é uma designação arbitrária - *qualquer estado* é “inicial” em relação àqueles que o seguem -, essas relações entre escalas se desenrolam sem cessar.

O quarto cérebro dificilmente poderia ter sido projetado de outra maneira mais correta para amplificar efeitos quânticos em escala superior. Essa amplificação, entretanto, não nos permite assistir a agregados em grande escala de matéria viva obedecendo a regras quânticas, como é proposto pelo misticismo quântico popular.² Para todas as aparências, o modelo mecânico conserva domínio inquebrantável. E, mesmo assim, é possível ver que, no final, esse domínio não é absoluto.

Toque de novo, Sam... e de novo, e mais uma vez...

A Figura 16-4 mostra o iterador mais simples do mundo, apresentado à esquerda como a rede neural mais primária que se pode imaginar - um único neurônio - e, à direita, apresentado como o autômato celular mais simples do mundo - composto por uma única célula.

A versão da rede neural apresenta uma “função de transferência” que toma a entrada - que, nesse caso, é sua própria saída -, opera sobre ela e a transmite. Se pensarmos em sua saída como sendo seu estado, então, dependendo de qual tenha sido o estado inicial e qual seja a função de transferência específica, após cada iteração esse estado terá mudado (ou poderá mudar).



FIGURA 16-4. Um iterador simples, à esquerda, como uma rede neural e, à direita, como um autômato celular.

A versão como autômato celular possui uma regra de “transição” ou de “mudança de estado” ou de “atualização”. Uma vez que sua região é composta apenas por si mesma, toma seu estado presente, submete-o à regra e se modifica de acordo. Se a função de transferência à esquerda é a mesma que a regra de atualização à direita, e se os estados iniciais são os mesmos também, então os estados sucessivos serão obviamente idênticos. Essas são duas visualizações (baseadas na biologia) do mesmo processo matemático de iteração. Assim, vamos inventar uma função de transferência/regra de atualização (que chamaremos simplesmente “regra”), escolher alguns valores iniciais e ver o que

acontece. Vamos rotular como “x” a entrada sobre a qual a função deverá operar em qualquer iteração dada. Vamos chamar a saída resultante de “x’”, o que significa que, na próxima iteração, um novo x será empregado, simplesmente o x’ anterior.

Vamos agora supor que a regra é uma parábola ordinária, $x' = ax - ax^2$ (em que estamos acostumados a ver y em lugar de x’). A esquerda da Figura 16-5, encontra-se um gráfico dessa parábola como uma equação ordinária, em que $a = 4$ para valores de x entre 0 e 1. (Caso você esteja acostumado a ver parábolas em curva de U, com $y = x^2$, aqui é o “a” que estreita a curva e o sinal de menos antes de ax^2 que a revira de cabeça para baixo, enquanto o ax modifica seu formato e a move para a região superior ao eixo.) À direita, vemos um gráfico *iterado*, em que “semeamos” a regra com um valor inicial de $x = 0,5$.

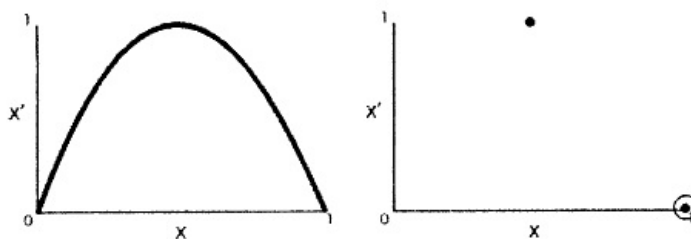


FIGURA 16-5. Versões ordinária e iterada de $x' = ax - ax^2$.

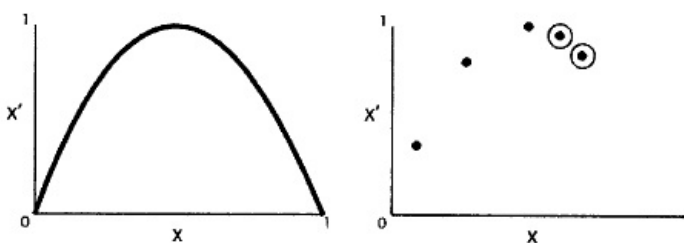


FIGURA 16-6. Iterador com dois atratores estáveis (destacados por círculos).

Com $a = 4$ e $x = 0,5$, a versão iterada primeiro produz $x' = 1$; quando 1 é alimentado como entrada, resulta em $x = 0$; e quando 0 é introduzido como entrada, novamente produz 0. Desse modo, só é capaz de atingir dois valores, os quais são encontrados na parábola da direita (apresentada em cinza). Mas, depois que o primeiro valor conduzir a 0, ela permanece em 0 - é por isso que aparece um círculo na figura. Para esta regra, com esses valores atribuídos para “a” e para “x”, quer seja implementada como um autômato celular, quer como uma rede neural, ou como uma função matemática, o 0 é um *atrator* (o único que possui), como se fosse uma *bacia de atração*. (Mesmo esse exemplo tão simples sugere o relacionamento entre a iteração e a formação de bacias de energia).

A seguir, vamos determinar $a = 2$ com o valor inicial de $x = 0,05$. Dessa vez, os valores sucessivos de x' são 0,05, 0,09, 0,17, 0,28, 0,41, 0,48, 0,49, 0,5, 0,5, 0,5. [...] Depois de algumas iterações, ele é de novo atraído para um valor estável (diferente), a saber, 0,5.

Um caso mais interessante é mostrado na Figura 16-6, em que deixamos $a = 3$ e começamos com um valor de $x = 0,1$. Nesse caso, depois de umas poucas iterações, os valores sucessivos de x' se estabelecem em uma alternância entre *dois* atratores estáveis, 0,71 e 0,62 (dentro de círculos).

Em outras palavras, com este valor para “ a ”, um autômato celular ou um neurônio, seguindo a regra anterior, irá ter *dois* estados finais: tornou-se, portanto, um *oscilador* estável de dois estados (como uma molécula de amônia com dois estados de energia mínima igualmente prováveis). Além disso, resulta que, com esta regra em particular, caso sempre mantenhamos nossos valores iniciais entre 0 e 1, na medida em que aumentarmos “ a ” desde 0 até mais ou menos 3,57, a regra começa a produzir primeiro um estado final, depois e subitamente, dois estados finais, depois quatro, oito, dezesseis, e assim por diante. Essa dobragem abrupta do número de estados finais ocorre com aumentos sempre *menores* do valor de “ a ”. A *razão* de um aumento em “ a ” entre as dobragens até o próximo aumento é sempre a mesma, um número cujo inverso é conhecido como a *Constante de Feigenbaum*. Ninguém sabe por que é assim. Além disso, esta razão é pequena o bastante, de modo tal que, antes que atinja 3,58, as dobragens chegam ao infinito.

Isso significa que, acima de certo valor de “ a ”, o valor do “oscilador” não oscila mais, no sentido comum do termo - seus valores nunca ciclam no mesmo lugar duas vezes, mesmo que estejam para sempre limitados por 0 e 1. Pode até parecer aleatório, mas não o é realmente, pois seus valores são 100% mecanicamente determinados, e isso acontece para sempre - pela regra, pelo valor atribuído a “ a ” e por seu valor inicial. Esse fenômeno é conhecido como *caos determinístico*, conforme mencionamos brevemente no começo da Segunda Parte.

Vamos agora fazer um gráfico dos valores dos estados finais do oscilador com relação a alguns dos valores de “ a ” (veja Figura 16-7, à esquerda) e para todos os valores de “ a ” entre 0 e 4 (veja Figura 16-7, à direita).

Vemos a amplitude total das dobragens de estados finais e o estabelecimento do caos - cada ponto das regiões pontilhadas em cinza representa um valor do iterador depois de um grande número de repetições. Se ampliarmos uma região deste “diagrama de estados finais” e pegarmos uma região de tamanho similar da ampliação e a ampliarmos, e continuarmos a fazer isso, descobriremos que, em

cada escala, o padrão se repete em detalhes cada vez mais minuciosos (mas invertidos com relação à escala anterior - veja Figura 16-8).

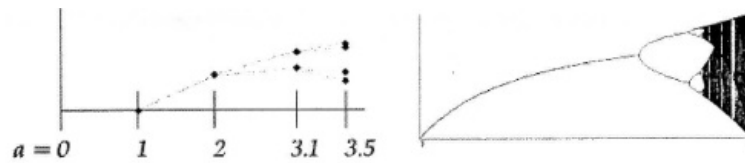


FIGURA 16-7. À esquerda: diagrama de estado final para um iterador quadrático em valores discretos de "a" entre 0 e 4. À direita: diagrama de estado final para um iterador quadrático para valores discretos de "a" entre 0 e 4.

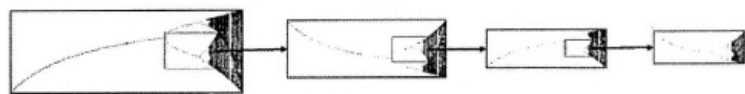


FIGURA 16-8. Escalada da região de transição de um regime de dobragem até um regime caótico em um iterador apresentado em diferentes valores de ampliação. No diagrama mais à esquerda, "a" abrange de 1 a 4; no seguinte, de 3,0 a 3,7; no próximo, de 3,45 a 3,59; e, no que fica mais à direita, vai de 3,544 a 3,575. A escala da abrangência mais à direita é, portanto, um centésimo daquela que fica mais à esquerda.

Já foi mencionado que uma sequência caótica de valores parece aleatória, mas não o é, porque é mecanicamente determinada. E o mesmo caso de, entre limites, apesar de nunca se repetir o mesmo valor duas vezes, aparecerem padrões gerais obviamente relacionados que são distintos da regra determinada. Além disso, *quaisquer dois valores iniciais levemente diferentes irão logo gerar sequência s de valores totalmente diferentes*: justamente o que vimos com relação ao sistema rotativo da Figura 16-3. Os detalhes específicos diferem dramaticamente entre si como resultado de uma minúscula diferença inicial, mas o padrão geral permanece o mesmo.

Agora, veja a Figura 16-9, que é um gráfico dos primeiros mil valores de nosso iterador.

À primeira vista, parece não existir uma ordem evidente nos valores. Todavia, vemos que estão claramente delimitados e que, dentro desses limites, há também faixas de ordem aproximada - os valores estão agregados, por exemplo, perto do topo da amplitude ou nas cercanias da parte inferior, enquanto uma espécie de faixa é perceptível no meio. Se olharmos para sequência s de iterações amplamente separadas entre si, veremos formas com aproximadamente o mesmo formato, mas que não se repetem, como na Figura 16-10.

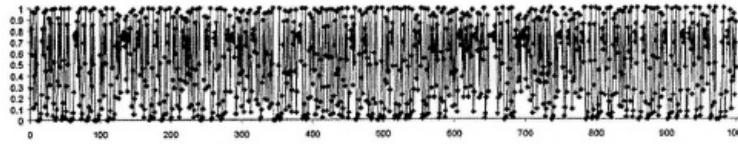


FIGURA 16-9. Os primeiros mil valores de um iterador.

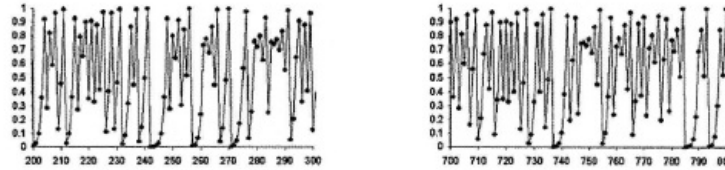


FIGURA 16-10. Regiões amplamente separadas de um iterador. À esquerda: iterações 200 a 300. À direita: iterações 700 a 800.

Em um sentido (muito) inexato, podemos falar dos valores individuais como sendo “casuais”, mas distribuídos de acordo com regras mais amplas, que governam a probabilidade de encontrar-se um determinado ponto em uma região qualquer, o que pode soar um pouco como as formulações quânticas, mas *cuidado*. Um evento quântico é *absolutamente casual*, determinado por nada que exista neste Universo. O caos, todavia, é *absolutamente determinado*. Se você conhecer a regra e o valor inicial, poderá prever os resultados com qualquer grau de exatidão que deseje, pelo tempo que quiser. Em um regime quântico, mesmo no extremo teórico em que você conheça tudo o que pode ser conhecido a respeito dele, você absolutamente não poderá prever os resultados — a não ser as probabilidades de que sejam produzidos vários resultados.

Batidas de asas

Os sistemas caóticos (iterativos) são *extremamente sensíveis às suas condições iniciais* e, já que nunca se repetem, são impossíveis de prever, a não ser que se conheçam perfeitamente todas as equações subjacentes e a condição presente (inicial) com absoluta precisão. Você pode estar fora do alvo por uma parte em um bilhão e, muito rapidamente, suas previsões divergem a ponto de se tornarem completamente sem sentido. O primeiro objeto para o estudo sistemático do caos foi o clima, imprevisível, porque, conforme o título do artigo clássico de Edward Lorenz indaga: “A batida da asa de uma borboleta pode produzir um tornado no Texas?”, a resposta produzida só pode ser “sim”. Portanto, ao mesmo tempo em que os padrões gerais permanecem os mesmos em cada escala, um sistema iterativo irá amplificar para a escala superior pequenas diferenças individuais da escala inferior, de modo a gerar maciças

diferenças globais em cada uma das escalas superiores.

Oscilações acopladas: estranhamente atraídas para você...

Vamos conservar essas ideias em nossa mente enquanto prosseguimos. Por enquanto, o sistema de rede neural/autômato celular que examinamos é muito simples - um neurônio, uma célula. Mesmo assim, ele demonstra todas as características essenciais do caos, a verdadeira complexidade matemática que evitamos. Imagine quanto mais complicadas as coisas se tornam quando até mesmo *dois* desses osciladores se influenciam mutuamente: ou dez osciladores; ou 1,6 mil, como na Figura 16-3; ou 20 trilhões, como na rede neural do cérebro. Especialmente se os elementos individuais não são perfeitamente idênticos, mas apresentam regras complicadas e um pouco diferentes (como acontecerá em qualquer sistema natural dentro de um ambiente ruidoso); *parece* intuitivamente óbvio que, ao ser acoplada, a padronização confusa (*fuzzy*) de um único sistema caótico será desmanchada, tornando-se irreconhecível, mas isso não é necessariamente verdadeiro.

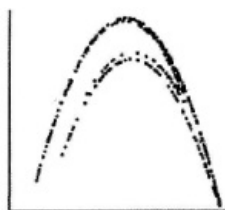


FIGURA 16-11. Gráfico iterado de $u' = w + 1 - au^2$.

Por exemplo, podemos acoplar dois neurônios (ou dois autômatos celulares), um ao outro, apenas acoplando suas regras, que agora passam a conter duas variáveis, digamos “u” e “w”, e dois parâmetros, “a” e “b”. Uma vez que a matemática se tornou mais complexa, não vamos apresentar tantos detalhes específicos como fizemos no caso de um único iterador, mas aqui está um exemplo:

$$\begin{aligned}u' &= w + 1 - au^2 \\w' &= bu\end{aligned}$$

Observe que, neste caso (deliberadamente) simples, o novo valor de “u” depende dos valores prévios tanto dele próprio como de w, e o novo valor de “w” depende (somente) do valor prévio de “u”. Apesar da aparência simples dessas equações, a acoplagem entre elas torna seu comportamento extremamente

complexo. Desse modo, vamos ignorar V e apenas construir um gráfico iterativo de “ u ”. E a mesma coisa que acompanhar os estados de apenas um neurônio em uma rede de dois neurônios. Vamos saltar imediatamente para um conjunto de valores para “ a ” e “ b ” tais que o sistema acoplado se torne caótico - nunca atingirá o mesmo valor exato duas vezes e, portanto, nunca se firmará em um atrator estável. A Figura 16-11 nos mostra quase cem estados de “ u ” em um gráfico comparado com V .

Que isso se conforma a um padrão é óbvio - mais óbvio que os pulos descontrolados de nosso iterador individual. Se continuarmos a calcular e traçar mais pontos, descobriremos que, por mais que pulem, formam estruturas semelhantes a linhas que, de maneira contínua, se *dobram* para a frente e para trás, porém nunca se cruzam (como os folhados de um pastel francês muito delicado).

Um atrator convencional é semelhante a uma bacia de baixa energia com uma (ou mais) posição (posições) exata(s) no nível de energia mais baixo. Quando um sistema é caótico, não mais atinge quaisquer dessas posições fixas. Sem dúvida, como notamos anteriormente, enquanto evolui, nunca toca o mesmo lugar duas vezes e muito menos permanece em algum lugar para sempre. Entretanto, vemos que os sistemas caóticos tendem a pairar nas redondezas de uma ou mais região ou regiões gerais, de forma semelhante à de vidros rotativos frustrados. Essas bacias confusas (*fuzzy*) são chamadas *atratores caóticos estranhos*. O padrão da Figura 16-11 é um exemplo famoso desse tipo de atrator.



FIGURA 16-12. Quatro atratores caóticos estranhos gerados por dois osciladores acoplados com dois parâmetros variáveis.

Muitos processos na natureza que parecem aleatórios possuem de fato uma dinâmica caótica “altissimamente dimensionar subjacente, em razão da acoplagem recíproca de grande número de elementos individuais - cada um dos quais pode apresentar uma dinâmica completamente não-caótica (como seria resultante da iteração de uma equação retilínea) ou uma dinâmica caótica simples (resultante da iteração de uma equação parabólica), ou mesmo uma dinâmica caótica complexa, como seria a iteração de muitos sistemas caóticos reciprocamente acoplados, cada um composto de muitos sistemas caóticos reciprocamente acoplados, e assim por diante.

Mesmo sistemas relativamente simples de osciladores acoplados podem gerar uma espantosa variedade de padrões caóticos, mas ordenados. A Figura

16-12 apresenta quatro, derivados de pares acoplados de osciladores com parâmetros levemente diferentes para as variáveis “a” e “b”.

Mesmo que, como no caso unidimensional para a variável única “x”, nem “u” nem V jamais assumam valores que se repitam, esses se aglomeram em regiões óbvias em todos os quatro casos.

O fato de, *padrões* globalmente definidos serem repetidos com graus de precisão variável, mesmo que nunca perfeita, ao mesmo tempo em que valores individuais jamais são repetidos, talvez não possa ser ilustrado de maneira mais dramática do que nesse exemplo oferecido por James Crutchfield, em seu famoso artigo de 1986 para o *Scientific American*, que justamente colocou a Teoria do Caos no mapa da ciência.

Um retrato de Poincaré

Uma fotografia - neste caso, do grande matemático e físico francês Henri Poincaré - é submetida a uma transformação que consiste de uma série de operações (matematicamente expressáveis). Estas distorcem tanto seus limites com o seu interior que, quando a transformação é finalizada - o equivalente para submeter uma variável de entrada a uma série de operações matemáticas -, o resultado final é uma nova fotografia das mesmas dimensões do original. O processo é repetido, com a saída de uma transformação se modificando na entrada para a próxima iteração, como ilustrado na Figura 16-13.

Podemos considerar que o retrato original constitui uma “posição” para um grande número de variáveis - a localização espacial de cada pixel, por exemplo. Se funcionarem, nesse caso, os princípios do caos determinístico, esperamos que pelo menos algumas das iterações futuras retornem de novo a um “ponto” neste “espaço” multidimensional, que seja próximo, mas não exatamente idêntico ao ponto de partida, isto é, alguma coisa bastante próxima ao arranjo original de pixels. De forma bastante surpreendente, é justamente isso que ocorre - e o faz repetidamente - em um fenômeno conhecido como “recorrência de Poincaré”. Uma amostragem é apresentada na Figura 16-14.

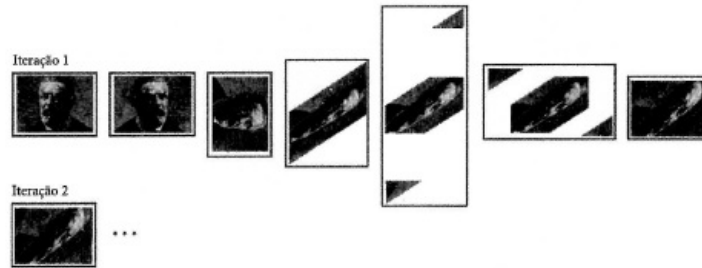


FIGURA 16-13. Transformação de uma fotografia de Henri Poincaré. Uma iteração completa tem cinco etapas (mostradas em sete quadros) da esquerda para a direita: (1) espelho horizontal; (2) rotação de 90°; (3) viés vertical; (4) transformação do canto superior direito em canto inferior direito; (5) transformação do canto superior esquerdo em canto inferior esquerdo.



FIGURA 16-14. Transformações iteradas de um retrato de Henri Poincaré. Por volta da iteração 18, seria de presumir que nada das informações iniciais, a respeito da localização dos pixels, era recuperável. Todavia, na iteração 48, aparece uma versão com retratos superpostos e, na iteração 241, uma recorrência quase (mas não inteiramente) perfeita. Esses padrões recorrentes são conhecidos como “recorrências de Poincaré”, homenageando o homem que os descobriu.

Na natureza, muitos processos iterativos são de “dimensionalidade” tão elevada (ninhos iterativos encapsulados em ninhos encapsulados em ninhos...) que recorrências reconhecivelmente próximas são tão raras como uma lua azul. Além disso, à medida que aumenta o número de iterações, as recorrências de Poincaré de um determinado nível de acurácia vão-se tornando, em média, cada vez mais raras.

Dois importantes fatos para guardarmos na memória a fim de usá-los em breve são que, *em um sistema caótico determinista, a distribuição (fall-of) da frequência de recorrências de Poincaré é “exponencial”, isto é, muito rápida*; ($1/p^t$ em que t é o número de iterações e p é algum número positivo maior do que 1); *porém, surpreendentemente, em um sistema caótico determinista, formado por uma hierarquia encapsulada de elementos caóticos de nível inferior, a distribuição*

da frequência de recorrências de Poincaré é apenas algébrica ($1/p^t$, em que p tipicamente é ~ 15), ou seja, mais lenta. As recorrências são *mais* frequentes se o sistema geral for composto de uma hierarquia encapsulada de subsistemas caóticos - como é composto o cérebro humano.

A partir desses exemplos, como o conhecido “Atrator de Lorenz” tridimensional (descoberto inicialmente durante uma investigação sobre padrões climáticos, conforme a Figura 16-15), podemos estabelecer um ponto importante com relação aos “atratores estranhos” em geral (bacias de energia para sistemas caóticos) e ao fenômeno da recorrência de Poincaré.

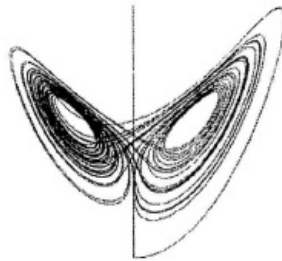


FIGURA 16-15. Atrator de Lorenz, um atrator iterativo estranho e tridimensional.

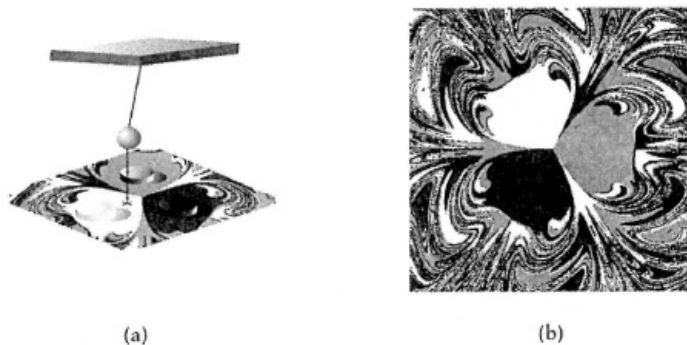


FIGURA 16-16. (a) Pêndulo em três campos magnéticos. A localização do pêndulo no plano dos ímãs é marcada por um “X”. (b) Posições finais do pêndulo, codificado em cinza-escuro, cinza-claro e branco.

Observe que o atrator é composto de duas órbitas, ou “asas”. Um sistema que se conforme a um atrator como este provavelmente será encontrado em uma das duas bacias de atração distinta e dicotômicas. Todavia, *em qual* das duas bacias ele será encontrado em qualquer ponto específico do tempo dependerá de seu estado inicial. Assim, dois sistemas idênticos até mil casas decimais - porém diferindo a partir daí - irão comumente terminar depois de, digamos, 1 milhão de iterações (provavelmente, bem menos), em algum lugar semelhante da mesma bacia de atração ao que foi ocupado na outra: minúsculas diferenças iniciais, resultados dicotômicos em larga escala.

Em outras palavras, vamos supor que você tenha dois gêmeos absolutamente idênticos - muito mais idênticos do que a biologia, de fato, o permite: isto é, idênticos em tudo, exceto em um único aminoácido localizado em apenas uma proteína de um só neurônio, e criados (puramente por hipótese) em ambientes *absolutamente* idênticos. E possível que, em determinados domínios, eles se demonstrem *opostos*, em vez de idênticos? A resposta é “sim”, devido às razões expostas anteriormente. Assim, como é que explicamos a grande similaridade que existe até mesmo em gêmeos idênticos reais? Pelo fato de a natureza minimamente dicotômica dos resultados iterativos ser, apesar disso, ligada de forma “estranhamente” semelhante, o que produz resultados que, embora divergentes em eventos individuais, se conformam a padrões amplos, fora dos quais *jamaiz* saem.

Caos e rotação

Um simples modelo físico intimamente relacionado ao fenômeno dos neurônios oscilatórios acoplados (ou a rotações competitivas) pode ser visto em um pêndulo com uma bolinha de ferro na ponta, colocado para balançar sobre três ímãs em forma de disco (branco, cinza e negro), como se observa na Figura 16-16a.

Há três bacias de atração para o pêndulo, cada uma delas mais próxima de cada ímã. Mas o relacionamento entre a localização inicial e sua posição final segue um processo que pode ser tudo, menos simples. As forças agindo sobre a bola dependem de suas alturas e de suas posições com relação aos ímãs, e todas variam com sua velocidade e direção de movimento (isto é, relativamente a seu *momento*). Além disso, o sistema é intrinsecamente oscilatório. O relacionamento real entre os estados inicial e final pode ser mostrados no mapa da Figura 16-16b. Ele deve ser lido da maneira seguinte: escolha um ponto no mapa. Essa é a posição inicial da bola acima do plano dos ímãs (que automaticamente fixará sua altura ali). A cor desse ponto no mapa corresponde à cor do ímã mais próximo do local em que ocupará sua posição de descanso.

Amplificações desse diagrama revelam uma estrutura fractal no mesmo padrão em escalas infinitamente mais reduzidas. Em outras palavras, sempre é possível encontrar uma região do mapa que contenha todas as três posições finais, não importa quão pequena seja a região que escolher. Desse modo, o sistema exibe uma extrema sensibilidade às condições iniciais. De fato, as “pequenas” diferenças iniciais podem ser infinitesimalmente pequenas. (intuitivamente, é adequado que esses sistemas, em que diferenças infinitamente pequenas podem produzir resultados violentamente opostos, devam requerer regras que contenham números imaginários, como fazem

os “Conjuntos de Julia”. Todavia, descrevem sistemas físicos reais). Mas existe aqui uma sutileza importante: há somente três estados finais distintos. O sistema *não evolui* caoticamente - acaba por descansar em uma bacia de atração fixa, como uma rede de Hopfield recordando uma memória nítida. O caos - um sistema em que pequenas diferenças iniciais geram resultados *tricotômicos* (imensos) - está presente na estrutura dos limites entre os estados iniciais. Assim, os resultados finais do sistema - aquilo que vemos - dão a impressão de que os processos dinâmicos que os produziram deveriam ter sido bastante simples. Mas, na realidade, são caóticos e extremamente sensíveis às diferenças iniciais, não importa quão pequenas elas possam ter sido. Sem dúvida, pequenas diferenças iniciais em sistemas iterativos - mesmo diferenças infinitamente pequenas - podem originar resultados exatamente tão profundos quanto os provocados por grandes diferenças iniciais, não importa quão grandes estas tenham sido!

A vida, o cérebro e o córtex

Existe evidência direta de que a estrutura do cérebro é iterativa e que suas funções se predispõem ao caos. O eletroencefalograma (EEG), uma medida mais ou menos grosseira da atividade elétrica cerebral, já é suficiente para demonstrar um padrão notavelmente consistente de caos estruturado, assim que os instrumentos matemáticos adequados sejam aplicados.³ Além disso, quando o cérebro é modelado por redes neurais de osciladores acoplados e com elementos que incorporam, tanto quanto possível, o que é atualmente conhecido a respeito dos verdadeiros neurônios,⁴ as “simulações [...] mostram boa correspondência com o [...] eletroencefalograma”.⁵ E, assim, tanto um eletroencefalograma real como os traços gerados por um modelo de rede neural se demonstram fractais em natureza e com dimensionalidades semelhantes.

Walter Freeman e seu grupo, na Universidade da Califórnia, desenvolveram um modelo completo do córtex olfativo humano, ilustrando como o modelo e o córtex real recordam cheiros por meio de uma rede neural associativa e do tipo orientado para atratores (Hopfield), com cada odor correspondendo a uma bacia de atração. Com cada ciclo de inspiração/exalação, o sistema se alterna entre modos de processamento caóticos e não-caóticos.⁶ Outros pesquisadores alcançaram sucesso em implementar um modelo muito mais complexo, que inclui 49 mil neurônios artificiais, com mais de 100 milhões de conexões e o tipo de adiantamentos de sinalização dependentes da distância que são encontrados em dendritos e axônios neurais verdadeiros. Apresenta uma dinâmica ainda mais semelhante à do córtex olfativo humano real.⁷

No mundo real - no modelo de cérebro que estivemos desenvolvendo -, em

qualquer nível a estrutura interior de cada elemento acoplado em uma rede é igual à estrutura interior de cada elemento na próxima escala de nível inferior. Esse elemento ainda é chamado “oscilador”, mas oscila entre regiões próximas a atratores estranhos. Parece eminentemente plausível que, se acoplarmos um pequeno conjunto desses “osciladores” individualmente caóticos, a operação do sistema como um todo acabará se tornando tão próxima do aleatório quanto possível - totalmente além das possibilidades de análise, pelo menos quando se fala de milhares ou de *bilhões* de elementos. Mas, a partir do fato de que as recorrências de Poincaré se tornam *mais frequentes* quando os próprios osciladores são caóticos do que quando não o são, suspeitamos que nossa intuição vai nos falhar mais uma vez. E realmente é o que acontece. Uma rede formada até mesmo por osciladores *caóticos* pode entrar em um estado no qual existam sincronização global e caos no nível de rede, que é, a propósito, especialmente útil “para uma descrição de [...] grande número de fenômenos biológicos”.⁸

O caos é um velho amigo meu

As redes neurais que são detalhadamente modeladas em sistemas biológicos demonstram dinâmicas caóticas.⁹ Durante muitos anos, a presença de dinâmicas caóticas em uma rede neural artificial foi considerada indesejável, principalmente porque tornava a análise de seu comportamento tão difícil - um sistema caótico suficientemente complexo é muito difícil de diferenciar de um sistema aleatório, mesmo que seja hoje compreendido que esses sistemas realmente apresentam uma ordem subjacente. (O ponto foi melhor expressado por John von Neumann, em 1951: “*Qualquer um que tome em consideração métodos aritméticos para a produção de algarismos aleatórios se encontra, naturalmente, empeçado mortal*”).¹⁰ Uma vez que o caos é ubíquo em sistemas naturais e, em especial, em sistemas tão densamente iterativos como é o sistema nervoso humano (como ocorre nos simulacros de vidro rotativo, redes neurais e autômatos celulares), deduziu-se que algo de benéfico deveria resultar dele.¹¹

Em setembro de 1998, um grupo do Laboratório de Aplicação do Caos do Departamento de Física do Instituto de Tecnologia da Geórgia demonstrou que um arranjo de elementos caóticos acoplados pode realizar *qualquer* operação lógica. Tinham concluído que isso deveria ser assim, simplesmente raciocinando que, se não fosse verdadeiro, a seleção natural já deveria ter eliminado esses elementos há muito tempo. “Ainda que seja conhecido que mapas caóticos acoplados possam, *em princípio*, ser encarados como computadores universais,

demonstramos *na prática* que as propriedades caóticas gerais de sistemas dinâmicos não-lineares podem executar uma variedade de computações.”¹²

Além disso, as redes neurais (e seus outros análogos computacionais) demonstram capacidades de memória e de processamento de informações *superiores* quando atingem uma dinâmica caótica.¹³ Seria de suspeitar, assim, que quanto mais iterativo se tornar um sistema de processamento - ou, em outras palavras, quanto mais elevada for sua dimensionalidade fractal (quanto maior for o número de escalas semelhantes a si mesmas e, assim, quanto mais difícil for distinguir esses processos da aleatoriedade) -, mais complexas serão as tarefas de processamento que, pelo menos teoricamente, será capaz de empreender.

Evidências indiretas para essa hipótese podem ser encontradas no próprio córtex cerebral humano. Inúmeros pesquisadores já correlacionaram a dimensionalidade fractal dos traçados de eletroencefalogramas e de magnetoencefalogramas com vários tipos de atividade mental. Eles descobriram que a dimensionalidade fractal aumenta com a inteligência e com a idade. Além disso, demonstra-se elevada em pessoas inteligentes, mesmo quando o cérebro não foi estimulado; e, em outros indivíduos, o cérebro alcança quase o mesmo grau de dimensionalidade, mas apenas em período de estimulação. A dimensionalidade, em geral, aumenta durante a imaginação de objetos em comparação com a percepção deles; durante a atividade criadora, em contraste com a lógica dedutiva; e durante estados de emoção positiva, preferencialmente aos de negativa.

Pobres de nós, também foi descoberto que as pessoas apaixonadas apresentam eletroencefalogramas com dimensionalidade fractal *reduzida*. “*Nem um deus, quando se enamora, consegue demonstrar sabedoria*” - Publius Syrus, *Sententiae [Máximas]*, cerca de 50 a.C. A mesma redução ocorre com as pessoas que escutam música *pop* de preferência à música clássica e outras formas de música mais complexas.¹⁴

O caos e a alta dimensionalidade fractal podem também ser facilmente encontrados em fenômenos que surgem das interações recíprocas de seres humanos enquanto funcionam como elementos de processamento. O exemplo mais acessível está em mercados ou locais de transações comerciais, uma vez que a quantificação numérica de sinais mutuamente intercambiados e reciprocamente modificados - osciladores caóticos acoplados - sempre tem sido realizada por nós: a discussão de preços.¹⁵ Em especial com o aparecimento da internet, modelos similares foram desenvolvidos com relação ao processamento global de informações e, sem dúvida, à própria sociedade como um todo: “Cérebros globais como paradigma para um mundo complexamente adaptativo”

foi o título escolhido como tema para uma recente conferência universitária sobre sistemas complexos.¹⁶

Mais do que isso, Bárbara Drossel, do Grupo de Física Teórica da Universidade de Manchester, demonstrou matematicamente que elementos interagentes devem formar grupos de um determinado tamanho, e que depois disso causas auto-organizadoras ulteriores levam grupos de grupos a formar-se até determinado tamanho, e assim consecutivamente. O resultado é um processo que forma níveis de escala encapsulados.

Durante os últimos anos, os físicos começaram a estudar sistemas complexos, como a evolução, a ecologia e a sociologia e economia humanas. Os modelos [...] são, em geral, compostos por unidades que interagem [...] e produzem comportamento complexo em grande escala. [...] Modelos para a evolução podem dar origem à [...] distribuição de eventos de extinção; [...] modelos para redes ecológicas geram diversas [...] camadas de espécies; modelos para desenvolvimento urbano produzem [...] a distribuição de cidades; e modelos para a bolsa de valores e técnicas para o crescimento de companhias demonstram as características de comportamento escalado desses sistemas.

[...] Uma característica importante dos organismos complexos, como a vida sobre a Terra ou a civilização humana, é a de que apresentam interações entre unidades de tamanhos variados. Deste modo, um biótopo consiste de diversas espécies em interação, de diversos indivíduos interagindo dentro de uma espécie e de células interagindo dentro de indivíduos.

[...] Se existem limites para a capacidade dos indivíduos se comunicarem com outros indivíduos, tais indivíduos formam grupos capazes de interagir uns com os outros, conduzindo à constituição de um organismo complexo que apresenta unidades interagentes em todas as escalas.¹⁷

E a ordem brotou da desordem: a versão quântica do caos

Estamos a um fio de cabelo de distância de nossa conclusão. Diferenças iniciais muito pequenas (até mesmo infinitesimais) que surgem da incerteza *quântica* — diferenças que não têm causa - são amplificadas para as escalas superiores, através de todas essas escalas, porque todas são iterativas e encapsuladas. Essa constatação produz uma extrema bifurcação (ou outros resultados discretos múltiplos) no nível mais elevado. O resultado específico que ocorre em qualquer caso determinado é clássico - isto é, não viola quaisquer leis da mecânica mas *qual* entre muitos resultados chega a acontecer é uma coisa

totalmente não-determinista, exatamente da mesma maneira que o *lugar exato* em que uma determinada partícula irá embater nos detectores em uma experiência de fenda dupla. Não vemos milagres quânticos no mundo diário, a não ser que deliberadamente os criemos - não encontramos superposições, nem multiplicidade confusa (*fuzziness*), nem vastas coerências. Todavia, a *realidade particular* que aparece no mundano e que experimentamos é a que é, não em consequência de um conjunto inteiramente adequado de causas mecânicas, mas como resultado das superposições, multiplicidades confusas e vastas coerências que têm lugar *em toda parte* do Universo, e que ocorrem em todos os momentos, e que a vida aprendeu a capturar em sua escala mais reduzida e a usar para sua maior vantagem, e que o sistema nervoso amplifica para as escalas superiores, justamente em função de sua estrutura computacional.

Estamos próximos de afirmar isso, mas ainda não totalmente. Por enquanto, tudo depende de que cada elemento encapsulado de um sistema de processamento paralelo em maior escala seja *caótico*. E isso que permite a amplificação para uma escala superior - costumava-se pensar que os resultados de todos esses sistemas caóticos reunidos se cancelariam mutuamente pela lei das médias, só que isso não ocorre. Porém, o caos ainda é determinista. Assim, por mais complicados que sejam, estamos ainda falando em sistemas mecânicos - não importa quantos “*gaziIhões*” de elementos de processamento os formem. Se o mais fundamental dos elementos for o *quantum*, que é *genuinamente* aleatório, sem dúvida é plausível presumir que esse sistema produziria resultados *genuinamente* não-padronizados - isto é, a pura desordem, e não o caos no sentido técnico do termo exceto quando o cancelamento pela lei das médias resultasse em configurações estatisticamente padronizadas.

Por um longo tempo acreditou-se que isso fosse de fato óbvio. Todavia, durante os últimos dez anos, mais ou menos, especialmente como resultado de um trabalho publicado por Steven Tomsovic, da Universidade Estadual de Washington, e Eric Heller, da Universidade de Harvard,¹⁸ ainda outra área da física alterou dramaticamente nosso entendimento clássico da interface quântica: esta área passou a ser conhecida como o *caos quântico*. Trata-se de um campo de espantosa complexidade e sutileza, e seremos capazes de tocar aqui somente seus pontos principais. A descoberta essencial do caos quântico, primeiro como teoria e, recentemente, verificada de forma experimental, é esta: um sistema simples e não-iterativo, que “deveria” comportar-se com alto grau de ordem e de precisão, é alterado por efeitos quânticos a ponto de tornar-se, pelo menos, parcialmente aleatório e impreciso, como já observamos em capítulos anteriores.

Mas, conversamente, os efeitos quânticos fazem com que um sistema

complexo e multiplamente iterativo de elementos quânticos interagentes se torne mais ordenado.

A mecânica quântica é capaz de estabilizar a dinâmica dos sistemas caóticos clássicos e, ao mesmo tempo, desestabilizar a dinâmica dos sistemas regulares clássicos. [...] Onde a mecânica clássica for regular, as funções das ondas quânticas podem [...] tunelar ou infiltrar-se através dela. [...]

Onde a dinâmica clássica seria caótica, a evolução quântica [...] eventualmente exhibe recorrências quase periódicas ao estado inicial. [...]¹⁹

Isso quer dizer que, quando o caos quântico se achar presente, as recorrências de Poincaré persistem, em vez de diminuírem exponencial ou, até mesmo, algebricamente. “É necessária a flexibilidade da natureza da onda quântica para evitar que tudo seja feito em pedaços pela influência do caos.”²⁰

Um ótimo exemplo do primeiro caso é a própria experiência da fenda dupla: a chegada de partículas clássicas ao detector em duas faixas estreitas é totalmente determinista; a chegada de partículas quânticas é amplamente distribuída de acordo com uma função probabilista, mas que é aleatória em seus aspectos específicos.

Um ótimo exemplo do segundo caso surgiria em um sistema de osciladores *quânticos* acoplados, como na dobradura de proteínas, em que entidades quânticas múltiplas - elétrons, prótons - podem entrar em superposição e afetar-se mutuamente, além da própria conformação do sistema. Desse modo, esperar-se-ia, por exemplo, que, na dinâmica iterativa do comportamento protéico, devesse aparecer um número inesperadamente grande de recorrências de Poincaré - retornos “quase periódicos” a estados similares com maior frequência do que aconteceria se o processo fosse clássico. Isso deveria dar à dinâmica das proteínas um caráter mais oscilatório do que seria possível de outra forma, em adição ao aumento da velocidade de suas tarefas computacionais:

Nós demonstramos que os efeitos quânticos diminuem a taxa de degradação das recorrências de Poincaré em [...] sistemas caóticos com estruturas hierárquicas (encapsuladas). O expoente p da degradação algébrica $P(t) \sim 1/t^p$ é demonstrado como possuindo o valor universal $p = 1$ devido a *tunelamento*. [...] Evidências experimentais de tal degradação devem ser observáveis em sistemas mesoscópicos (de intermediários a grandes). [...]²¹

Eis o que isso significa na prática. Vamos supor que você tenha uma mesa de

bilhar em formato retangular e quase sem fricção (sem caçapas), sobre a qual coloca uma bola em movimento arbitrário. Ela traçará uma trajetória previsível por muitos rebotes, antes que os leves desvios (“diferenças iniciais”) comecem a mostrar um efeito perceptível. Esse sistema é clássico, não-caótico e totalmente regular. Mas, se você simplesmente pegar uma mesa ovalada, com os cantos arredondados (formato “estádio”), a trajetória rapidamente se tornará caótica e, portanto, muito menos regular. A diferença é ilustrada na Figura 16-17.

Se uma experiência análoga for realizada com ondas, os resultados são espantosamente diferentes. (Essa experiência, de fato, foi realizada recentemente por Heller e seus colegas, empregando fótons de microndas.²²) Tanto o tanque retangular como o ovalado geram padrões de ondas estáveis e permanentes. A interferência reduz os efeitos indutivos de desordem do caos e permite que haja convergência para um atrator estável, conforme é mostrado na Figura 16-18. Energias diferentes e discretas (quantificadas) para as ondas/partículas quânticas geram padrões distintos.

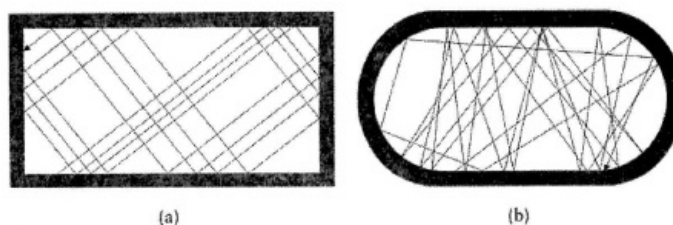


FIGURA 16-17. Trajetórias de uma bola de bilhar em uma mesa (a) retangular e (b) ovalada.

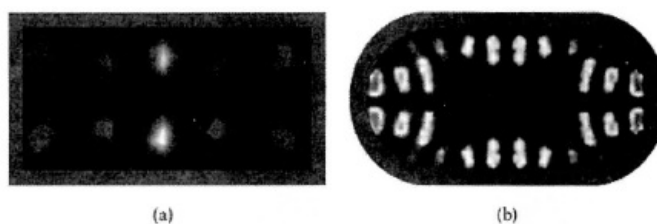


FIGURA 16-18. Padrões de interferência de ondas em (a) um tanque retangular e (b) em um tanque ovalado. Ambos os padrões são estáveis.

Em uma situação predisposta ao caos, a natureza ondular de uma única partícula quântica induz tamanha estabilidade que “hoje em dia se acha amplamente aceito que a dependência sensível às condições iniciais não ocorre em situações fechadas - e genéricas - de partículas (quânticas) individuais”.²³

Em sistemas compostos por *muitos* elementos quânticos interagentes dispondo de, pelo menos, certo grau de coerência, a situação é menos clara. Como se descobriu, a combinação do *quantum* com o caos reintroduz um grau

de ordem persistente em um sistema que, de outro modo, rapidamente se tornaria puramente caótico. Esta ordem, entretanto, não é perfeita, mas “confusa” - probabilística - em concordância com tudo o mais que se refere ao quântico.

O esfriamento quântico

Os tipos de padrões formados pela combinação de caos e interferência são iguais a uma assinatura. Depois de vistos apenas uma única vez, são reconhecíveis à primeira vista. São conhecidos como “estriamento quântico” da função ondular, porque existem regiões ordenadas (por exemplo, linhas grossas) em que a amplitude de probabilidades é inesperadamente elevada. A partícula será, portanto, encontrada nessas áreas com muito maior frequência do que parece razoável - deste modo, é um tanto “relocalizada”, ou seja, mais estável, embora em localizações que seriam classicamente improváveis ou, sem dúvida, impossíveis. A Figura 16-19, por exemplo, nos mostra outra arena muito mais complicada dentro da qual o estriamento quântico surge, apesar de tudo. Existem muitas das características do padrão de ondas dentro de limites ovalados, que podem ser vistas na Figura 16-18b.

A implicação é esta: uma partícula *quântica* segue uma “trajetória” em que diferentes caminhos superpostos interferem entre si - se adicionam construtivamente se as amplitudes forem do mesmo sinal e destrutivamente se forem de sinais opostos. De modo surpreendente, as ondas de amplitude de probabilidades caoticamente dirigidas *realmente* formam padrões estáveis - quando interferem umas com as outras -, e são os que governam a distribuição das probabilidades. Desse modo, os sistemas quânticos caóticos podem resultar em *padrões de regularidade maiores e mais permanentes* que os provocados por suas contrapartes não-quânticas.

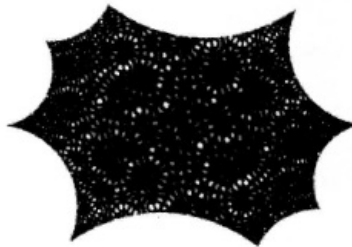


FIGURA 16-19. O estriamento quântico cria um alto grau de ordem em sistemas que, por todos os motivos, deveriam ser extremamente desordenados. Esse também é um padrão de ondas permanente exclusivo para a energia da(s) partícula(s) envolvida(s) e para as condições específicas dos limites.

Esses padrões inesperados, com sua persistência também inesperada, não

encontram qualquer correspondência em sistemas não-caóticos clássicos, em sistemas caóticos clássicos ou em sistemas quânticos não-caóticos, pois são uma impressão digital exclusiva do caos quântico. Uma vez compreendido mediante razões teóricas que esses padrões quântico-caóticos deveriam aparecer, um grande impulso experimental foi lançado a fim de encontrar evidências comprobatórias e, recentemente, descobertas. (Veja Figura 16-20.)

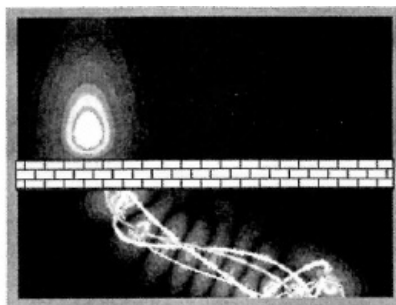


FIGURA 16-20. Estriamento devido ao caos quântico no tunelamento de um diodo. Na parte superior da parede (esboçada por três filas de tijolos para salientar o ponto em que deve ser impenetrável), encontra-se a distribuição de probabilidades normal para um elétron – quanto mais clara a região, mais densa a probabilidade. Classicamente, nem uma partícula, nem uma onda poderiam penetrar a parede – a região do lado oposto é “proibida”. O elétron consegue penetrar porque o tunelamento quântico lhe permite “teletransportar-se” até lá. Na parte inferior, encontra-se a função de onda “estriada”, mostrando regiões em que o tunelamento eletrônico tem maiores probabilidades de ser encontrado. A forma característica e “organicamente” repetitiva da amplitude de tunelamento, sua intensidade e sua persistência muito além da parede facilitam um tunelamento muito mais distante que o esperado. Os “caminhos” de tunelamento de probabilidade mais elevada (que são as “estrias” reais) são mostrados em branco e escala de cinza.

Neste caso, a ordenação regular de regiões recorrentes de significativa amplitude de probabilidades facilita grandemente e expande o tunelamento dos elétrons através e além da barreira. Devido ao caos quântico, o elétron em tunelamento aparecerá em pontos muito mais distantes do que teriam sido prováveis sem o estriamento, e em padrões que se assemelham a uma variante organicamente imprecisa - ou seja, apresentado certo grau de, por assim dizer, *coerência*.

Existe ainda outra implicação nisso. De acordo com os organizadores de uma recente conferência sobre sistemas desordenados e caos quântico, realizada no Instituto Isaac Newton de Ciências Matemáticas, na Universidade de Cambridge: “Até [...] cerca de uma década atrás [...] o conhecimento convencional era o de que todas as amostras desordenadas se submeteriam à lei das médias por si mesmas, de tal modo que as flutuações quânticas conjuntas (entre as partículas quânticas) não seriam mais importantes do que, por exemplo, as flutuações termais em [...] um gás clássico. Demonstrou-se, contudo, que [...] em

temperaturas finitas, a coerência quântica determina uma nova escala mesoscópica” ²⁴

Em outras palavras, a dinâmica caótica entre elementos quânticos múltiplos em interação de algum modo compensa, surpreendentemente, os efeitos destruidores da decoerência sobre os elementos quânticos - de uma forma semelhante àquela que as vibrações termais, de maneira também surpreendente, conseguem realizar -, e ainda, similarmente, *requer* uma agitação termal (“temperaturas finitas”). Sistemas quânticos agregados e desordenados podem, assim, demonstrar um comportamento quântico ordenado (de um tipo exclusivo) em escala “mesoscópica” - a meio caminho entre a escala tipicamente ultramicroscópica dos eventos quânticos e a escala dos eventos diários - tanto sem isolamento do ambiente como sem coerência. O comportamento quântico de seus elementos constituintes em escala muito menor é assim refletido no comportamento do agregado, em vez de ser diluído pela lei das médias. O mesmo calor que destrói a coerência quântica favorece a forma alternativa de ordenação que resulta do caos quântico.

O formato “verdadeiro” da ordenação em grande escala induzida pelo caos quântico não é o mesmo, entretanto, que o “formato” da ordenação em grande escala induzida pela coerência. O estriamento quântico demonstra um padrão estável semelhante à interferência, mas “parece” distinto. Só coincidentemente, talvez, tenha um aspecto mais “orgânico”. As formas geradas pelo caos quântico na Figura 16-20, por exemplo, parecem menos um conjunto de ondas matematicamente regulares do que as regularidades irregulares das vértebras.

Há, ainda, uma outra característica importante dos agregados quânticos. Se o agregado se comportar como um vidro rotativo, com elementos realmente quânticos, então aglomerados de seus elementos irão se auto-organizar a fim de formar subunidades em maior escala, entre a escala de um elemento individual e a escala do todo. Essas subunidades, denominadas “cacos de vidro rotativo”, são de forma semelhante manifestações em maior escala de comportamento quântico em menor escala. Aham-se ausentes se os elementos individuais do vidro rotativo não forem realmente quânticos.

O mundo em um pequeno grão de areia

Todos os mecanismos acima conspiram, por assim dizer, para tornar plausível que as consequências do comportamento quântico, em escala ultramicroscópica, sejam amplificadas para a escala superior até atingir as escalas da vida diária.

Em primeiro lugar, o caos em um agregado quântico empurra diretamente para cima as pequenas diferenças até a escala imediatamente superior (em vez de destruí-las, como anteriormente se presumia), de modo a torná-las mais persistentes. A presença do tunelamento torna mais provável o caos quântico, e este, por sua vez, tende a favorecer o tunelamento.

Em segundo lugar, se o próprio agregado quântico apresentar características de vidro rotativo (como fazem as proteínas em seu processo de dobramento), se formarão ordenadamente sub-regiões no vidro rotativo, formando padrões persistentes exclusivos dos sistemas quânticos e ausentes dos sistemas clássicos. Esses efeitos quânticos ampliados são, então, encontrados pela dinâmica do próximo nível clássico e se responsabilizam pelo seu formato. Se este próximo nível de organização for adaptativo e, desse modo, alterar seus parâmetros em resposta a pressões externas (de influências de escala ainda mais elevada), isso influenciará o nível quântico inferior - para baixo, por assim dizer. Um exercício intenso aumentará a demanda de determinados tipos de proteínas. Enquanto o corpo se dedica a produzir uma quantidade crescente delas, requerendo progressivamente uma quantidade crescente dos aminoácidos necessários para sua formação, o ambiente, dentro do qual as proteínas recém-sintetizadas se dobram, irá sendo alterado pouco a pouco. As “condições de limite” do problema do vidro rotativo se modificarão e, desse modo, também mudará a natureza exata dos efeitos quânticos e da ordenação resultante. Se a natureza corresponder ao que dela se espera, podemos antecipar que, sob condições de exigência em grande escala, as mudanças finais nas condições dos limites resultarão em eficiência ainda maior para a produção e dobramento de proteínas.

Em resumo, os efeitos quânticos na menor de todas as escalas influenciam o estado inicial da próxima escala; as pressões adaptativas sentidas por essa próxima escala conformam as condições dos limites da escala inferior e, desse modo, a forma exata das influências quânticas, em um arco de retroalimentação mutuamente adaptativo.

Em terceiro lugar, se no próximo nível o sistema apresentar dinâmica de vidro rotativo, os resultados de sua escala ainda mais elevada demonstrarão o caos *clássico*, o que significa que seus estados finais (seus mínimos de energia) tenderão a ser nitidamente distintos (por exemplo, dicotômicos), mas extremamente sensíveis a diferenças em seu estado inicial. Seus estados iniciais serão nitidamente discretos devido ao caos quântico que os criou.

Em quarto, a estrutura de vidro rotativo e a dinâmica caótica são encontradas em cada nível subsequente escala acima; desse modo, os resultados claramente distintos de um todo em determinado nível servem como os estados iniciais distintivos dos elementos do próximo nível.

Em quinto lugar, se encararmos um próximo nível mais elevado em termos de suas analogias com vidros rotativos, redes neurais e autômatos celulares; ou em termos de iteradores acoplados, quer estável ou caótico; sistemas desse tipo espontaneamente se auto-organizam em uma hierarquia de escalas e realizam computações.

Somando-se tudo, então, a dinâmica quântica no nível fundacional de uma hierarquia encapsulada de computadores maciçamente paralelos deverá alterar os processos computacionais da matéria viva de duas maneiras: primeiro, a dinâmica quântica apressa a computação naqueles níveis em que os efeitos quânticos se acham diretamente presentes. No caso das proteínas - vidros rotativos vivos que utilizam tunelamento, visando a atingir suas soluções -, as propriedades quânticas são intrínsecas, classicamente impossíveis e quase necessárias para que a vida possa ser possível. (Sem uma variação geneticamente determinada na sequência dos aminoácidos que permitem sua proteína de desidrogenase do álcool utilizar o tunelamento dos prótons em altas temperaturas, as bactérias que agora florescem perto das fendas térmicas oceânicas simplesmente não poderiam existir.) Em segundo lugar, a dinâmica quântica altera os resultados finais da computação em todos os níveis - não por produzir soluções classicamente impossíveis, *mas porque apresenta um efeito profundo sobre quais das muitas soluções possíveis serão realmente selecionadas.*

Eis aqui, pois, a maneira como tudo funcionaria no cérebro: o tunelamento nas proteínas permite-lhes encontrar soluções com velocidade coriscante para as tarefas que devem enfrentar - uma velocidade que, no mundo clássico, seria inatingível. Sem dúvida, algumas soluções existentes teriam sido completamente inacessíveis. As rápidas mudanças conformacionais que ocorrem nas proteínas têm natureza computacional. Essas mudanças conformacionais mediadas por efeitos quânticos permitem os arranjos cilíndricos da tubulina - os microtúbulos individuais - do mesmo modo que arranjos de microtúbulos em rede, com o intuito de funcionar tanto como propagadores de sinais como processadores paralelos à maneira de vidros rotativos. O processamento paralelo que ocorre nos microtúbulos é, de maneira semelhante, de natureza parcialmente conformacional. As soluções computadas pelos microtúbulos são expressas, de modo parcial, por meio de uma modificação de seus formatos - o que influencia a forma, a mobilidade e as ações de células inteiras -, bem como de partes constituintes de uma célula. A reprodução celular é um exemplo particularmente belo dessa capacidade.

As atividades computacionais da rede de microtúbulos dentro dos neurônios se especializaram de modo a facilitar sua habilidade exclusiva de propagar

sinais, buscando ajudar a estabelecer conexões com outros neurônios. Dessa maneira, uma rede computacional maior se estabelece. Eis de novo o processamento paralelo e a auto-organização envolvendo tanto a transmissão de sinais como alterações materiais permanentes nas estruturas.

As proteínas, os microtúbulos, as células e o cérebro são uma forma conveniente de identificar as divisões de escala mais perceptíveis - quatro cérebros encapsulados dentro do quarto cérebro humano. Mas, em cada um desses níveis, existem subdivisões naturais. As proteínas se associam com produtos químicos e participam de reações químicas que também apresentam natureza computacional. Nesse sentido, seria possível querer focalizar em uma escala entre proteínas individuais e microtúbulos individuais composta por milhares de proteínas. Os microtúbulos, por sua vez, formam redes com proteínas a eles relacionadas (por exemplo, filamentos de actina) e também com proteínas individuais maiores. Os neurônios formam conglomerados que se comportam como unidades de processamento integrado individuais, de tal forma que é mais fácil identificá-los como essas unidades de processamento do que atribuir essas atividades a neurônios individuais ou, mesmo, a microcircuitos corticais canônicos. O próprio cérebro é composto por subunidades organizadas em redes neurais. Do mesmo modo, a sociedade humana é dividida em vários agrupamentos que, por sua vez, definem escalas diferentes.

O grande momento do *quantum*

Vivemos em um mundo no qual tudo parece perfeito, exceto nós mesmos. As bolas de bilhar não partem para qualquer direção que lhes agrade, apenas se dirigem aos pontos que devem atingir em função de forças agindo sobre elas, que são precisamente o que devem ser. E assim que tudo sempre foi e sempre será, desde o início dos tempos. Várias formas de dobradura de colheres aparecem e desaparecem, dobrando, ao menos por algum tempo, aquelas mentes que desejam ser dobradas. O mecanicismo triunfa incontestavelmente acima de tudo o que se encontra em seu caminho. Como é, então, que essa maluquice quântica prevalece no mundo do minúsculo ainda que pareça desaparecer completamente à escala de nossas vidas diárias?

Não é que a diferença de escala entre o grande e o pequeno ou que a imensidão do número de partículas minúsculas interagindo na escala de grande magnitude façam com que os efeitos quânticos desapareçam em função da lei das médias. A vida — especialmente o sistema nervoso, especialmente o sistema nervoso humano, e ainda mais especialmente o quarto cérebro humano - parece ter evoluído visando tanto a tirar vantagem dos efeitos quânticos na escala sobre

a qual eles têm uma influência direta - o nível das biomoléculas -, como a amplificar seus efeitos para as escalas superiores. Essa influência não significa, entretanto - e dificilmente poderia significar -, que o cérebro seja um computador quântico projetado de maneira deliberada, como alguns continuam a esperar que seja demonstrado - que o ser humano é uma criatura quântica macroscópica que “pode ir em qualquer direção, com qualquer velocidade, para a frente e para trás no tempo, da maneira que desejar”-, mas resulta, efetivamente, em proteínas agindo como processadores paralelos em miniatura, cujas capacidades são enormemente favorecidas pelos efeitos quânticos, tornando assim possível a vida.

Existe mais a ser dito: a computação, mediante processamento paralelo de qualquer tipo e em qualquer escala, é baseada em uma estrutura comum - arranjos de elementos acoplados e capazes de interação mútua. Esses elementos podem, por sua vez, ser arranjos de elementos ainda menores. Mas a dinâmica caótica é intrínseca a essas estruturas. E, como vimos anteriormente, quando um sistema quântico é caótico, apresenta uma capacidade ainda maior do que a esperada para auto-organizar uma ordenação em escala mais elevada.

Todavia, para todas as aparências, o modelo mecânico parece ainda exercer um domínio incontestável. As diferenças quânticas, mágicas, porém minúsculas, que aparecem do nada no Universo, resultam em diferenças dramáticas de resultados na escala da vida diária com relação às várias possibilidades não-mágicas. Nossa vida, como realmente acontece, parece absolutamente mecânica ou, pelo menos, indistinguível de um mundo que seja de fato mecânico. Porém, não é isso que acontece. O mundo está pontilhado, em cada nível, com as consequências de um arranjo infinito e fulgurante de possibilidades também infinitas - um número incompreensível de eventos quânticos que ocorrem a cada instante por meio das miríades de proteínas que compõem a vastidão incomensurável dos arranjos intracelulares, orquestrando a dança infindável da vida nas coreografias de bilhões de neurônios constituídos em redes e dos trilhões de outras células que compõem o cérebro e o corpo de cada ser humano. De algum modo, entre o número inimaginável de possíveis resultados gerados por todos esses eventos quânticos, através de uma influência desconhecida e incognoscível (a vontade livre? Se for assim, de quem?) sobre a qual a única coisa que sabemos é que ela não “é” nada que reconheçamos no Universo material, somente um resultado é tornado real, recém-criado no momento de sua seleção.

Ou, talvez, como insistiu David Deutsch, *todos* os resultados se acham presentes - um número estupendo de universos paralelos explodindo para a existência, a todo momento; alguns se dividindo e formando ramificações sem

fim, outros coalescendo -, entre todos os quais, por meios inescrutáveis, um único foi selecionado para ser o nosso.

E, em todo o Universo, não existe lugar algum, tanto quanto é de nosso conhecimento, em que esse espantoso processo ocorra com maior concentração do que no interior do cérebro humano.

17. ONDULAÇÕES QUÂNTICAS

Se tenho a impressão de que é apropriada natureza que faz a escolha decisiva de qual possibilidade tornar real\ quando a teoria quântica diz que mais de um resultado é possível, logo atribuo uma personalidade à natureza, isto é, a alguma coisa que se encontra sempre em toda parte. Uma personalidade eterna e onipresente que é onipotente em tomar as decisões deixadas indeterminadas pelas leis físicas é exatamente aquilo que, na linguagem da religião, costuma ser chamado Deus.

— Frederikjosef Belinfante (colega de Wolfgang Pauli e responsável, em grande parte, pelo desenvolvimento das leis estatísticas da interação eletrônica múltipla), citado por John Barrow em *O mundo dentro do mundo*.

Depois descobrir um imenso território com um microscópio, eis aqui o grande quadro, como eu o percebo, à luz do que aprendemos até aqui.

Deus

Entre os cientistas, mencionar Deus, de uma maneira consciente, ainda permanece o mesmo que dar um passo em falso. Somente é seguro o modo irônico, do qual Einstein foi o mestre indisputado. No entanto, alguma coisa está se modificando. O grande físico inglês, Sir Arthur Eddington, advertiu certa vez: “Seria provavelmente mais prudente pregar acima da porta da nova teoria quântica um aviso”:

“ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS EM PROGRESSO - PROIBIDA A ENTRADA, EXCETO A NEGÓCIOS”. E, particularmente, conviria avisar o porteiro para não permitir a entrada de filósofos abelhudos.¹ Mas é tarde demais para isso. O famoso gato de Schrödinger já foi solto do saco onde estava há muito tempo, vivendo nove vidas em superposição simultânea, sobre as quais só podemos nos maravilhar e especular a respeito.

Todavia, ainda mais importante, o incrível choque que foi causado sobre o ponto de vista determinístico pela incansável confirmação experimental da teoria

da mecânica quântica cobrou um alto preço. Estamos agora em um mundo no qual a teletransportação (ou teletransporte) quântica, a computação quântica e a criptografia quântica não somente estão sendo levadas a sério, como parte de seus efeitos já foram implementados em escalas práticas e são objeto de pesquisas e desenvolvimentos comerciais intensivos. A revista *Science* relatou o primeiro desenvolvimento de comutadores de tunelamento auto-organizadores, formados por moléculas individuais, um dispositivo que promete apressar a computação em 100 bilhões de vezes.² Chaves práticas para criptografia quântica foram distribuídas por regiões grandes o bastante para abranger tanto Washington, no Distrito Federal, como Langley, na Virgínia [sede da CIA].³ Em um artigo intitulado “Um átomo em estado de superposição semelhante ao do gato de Schrödinger”, descreveu-se uma experiência em que fizeram átomos de berilo coexistirem simultaneamente em dois lugares. Essa é a primeira etapa no caminho para implementar o projeto de teletransportação de Charles Bennett, em andamento nos laboratórios da IBM.⁴

Vivemos em um mundo no qual podemos argumentar confortavelmente sobre a dinâmica da interferência entre universos múltiplos para trás e para a frente no tempo; em que podemos indagar seriamente, como fizeram Feynman e Wheeler, se cada elétron no Universo é o mesmo e um só, apenas reaparecendo por meio de múltiplos arcos no tempo; em que podemos ser objeto de dúvida, mas não de ridículo; vivemos em um mundo no qual podemos insistir pelo desenvolvimento de dispositivos para imagens médicas que funcionem simplesmente por estarem ali; ou de computadores que ninguém precisa ligar - para que funcionem, basta a existência da possibilidade de que pudessem ser ligados. Nesse tipo de mundo, já se tornou, de certo modo, menos embaraçoso falar a respeito de Deus. Suspeito que a Sua má reputação nos círculos científicos tinha menos a ver com a teologia do que com a sociologia da cultura e a com longa história de mau uso do seu bom nome pelas pessoas, que o tomavam em vão.

Sem dúvida, a religião merece mais críticas por seus fracassos do que a ciência, porque a religião avoca a si própria a habilidade de conhecer o que é verdadeiro, enquanto a ciência apenas alega ser sua a habilidade de quantificar as probabilidades de determinada coisa estar errada. Uma verdade genuína arrogantemente afirmada, isto é, sem ao menos ser considerada a possibilidade de que seja falsa, é um tipo de falsidade bastante pernicioso, pior que um simples erro, porque afasta as pessoas de algo que, de fato, é verdadeiro.

De qualquer modo, um pequeno número de cientistas eminentes, mais físicos do que de qualquer outro campo do saber, começou novamente a falar a respeito de Deus. Porém, é um assunto ainda espinhoso: quando o cosmologista quântico,

explicitamente ateu, Steven Weinberg debateu publicamente com o físico de partículas e ministro anglicano John Polkinghorne sobre o tema Deus e religião em uma recente reunião científica, as reportagens da imprensa científica especializada foram, em sua maioria, causticantes; muitos artigos deixaram claro que esse debate jamais deveria ter ocorrido, certamente não aos ouvidos do público, e não poderia ter sido apresentado dentro do santuário interno do rigor científico. O fato de esse debate ter ocorrido parece ter evocado entre os cientistas emoções similares, imaginemos, àquelas que teriam surgido entre crentes devotos, caso Charles Darwin tivesse sido convidado a realizar um debate com seu contemporâneo, o arcebispo de Cantuária, durante os ofícios do domingo de Páscoa, um pouco antes da celebração da santa eucaristia.

No que se refere ao mérito da questão, Weinberg venceu o debate. Não é vergonha nenhuma perder uma argumentação para uma mente como a dele, mas Polkinghorne, que não era nenhum ignorante em matérias científicas, já estava prejudicado desde o início da discussão. Ao usar seu colarinho clerical, estava implicitamente sugerindo não apenas a possibilidade da existência de um Deus como a impossibilidade de qualquer outro deus que não fosse aquele aprovado por sua própria igreja.⁵ A dúvida, o ceticismo, a incerteza e a análise de erros são as armas humildes, mas invencíveis de um cientista em qualquer arena intelectual.

Em 1981, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos publicou um decreto formal de divórcio entre a religião e a ciência: “religião e ciência são reinos separados e *mutuamente exclusivos* [o grifo foi acrescentado] do pensamento humano”.⁶ Pensemos que esta incompatibilidade tinha menos a ver com um conflito intrínseco entre ciência e Deus do que com uma disputa entre dogmas competitivos. O afastamento anterior tinha sido longo e amargo. Em 1860, o biólogo britânico Thomas Huxley tinha dito, às gargalhadas, que “teólogos extintos se encontram ao redor do berço de todas as ciências, do mesmo modo que as duas serpentes estranguladas jaziam ao lado do berço de Hércules”.⁷ Seguindo os mesmos passos de um divórcio, o rancor dificilmente se abateu: Joshua Lederberg, biólogo molecular vencedor do Prêmio Nobel e professor da Universidade Rockefeller, recentemente observou que “o espaço disponível para Deus parece estar encolhendo”. Richard Dawkins foi mais curto e grosso: qualquer um que apresentar “a questão do porquê” está simplesmente se demonstrando “cientificamente analfabeto”.

Entre os analfabetos, encontram-se:

- o geneticista Francis Collins, codiretor da equipe que encontrou o gene responsável pela fibrose cística, diretor do Instituto Nacional de Pesquisas

sobre o Genoma Humano, subsidiário do Instituto Nacional de Saúde, que também é um cristão evangélico devoto (o tipo rotineiramente rotulado pela imprensa popular com o epíteto de “fundamentalista”). “Eu desconheço a existência de qualquer conflito irreconciliável entre o conhecimento científico a respeito da evolução e a ideia de um Deus criador. Por que razão Deus não poderia ter empregado o mecanismo da evolução para criar?” Sem dúvida, talvez até seja Ele que, durante todo esse tempo, vem manipulando as escolhas em cada ponto da encruzilhada quântica - somente considere quantos já houve - a fim de criar cérebros capazes de argumentar em favor de Sua não-existência com tanta eficácia;

- o físico Charles Townes que, em 1964, compartilhou o Prêmio Nobel pela invenção do raio *laser*. Ele já foi vice-reitor acadêmico do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. “Não é incomum que bons cientistas sejam crentes”, declarou. Deus foi “uma fonte de força” por ocasião de seu trabalho histórico, ajudando-o a superar as crises de confiança que acompanham os desafios mais difíceis.⁸ “A fim de pôr de lado [...] a invocação de Deus, você poderá ser forçado a realizar especulações extremas a respeito da existência de bilhões de universos. Isso me parece coisa muito mais extravagante do que quaisquer dogmas sustentados pela igreja.” Em 1981, “Townes foi presidente da comissão que persuadiu o Presidente Reagan a não contratar a construção de inúmeras unidades dos altamente destrutivos mísseis **MX**. Townes declarou que, antes de cada reunião da comissão, orava para receber a orientação divina”;⁹

- Arthur Peacocke, antigo deão da Universidade de Cambridge, é um bioquímico que abandonou as pesquisas científicas para tornar-se ministro anglicano. E o guardião da Sociedade dos Cientistas Ordenados, que tem mais de 3 mil membros;

- a análise de uma pesquisa publicada na *Nature* demonstrou que cerca de 60% dos físicos e biólogos que trabalham hoje em suas áreas de pesquisa também manifestam fortes crenças espirituais - uma percentagem mais elevada que entre cientistas de outras áreas.¹⁰ No entanto, entre os “grandes” cientistas que trabalham hoje (segundo a definição dos pesquisadores), somente 7% se consideram “crentes”. Destes últimos, encontrou-se a percentagem mais elevada entre os matemáticos - 14%;¹¹

- David Scott, que costumava trabalhar como pesquisador na área de física, é agora chanceler da Universidade de Massachusetts, *campus* de Amherst. “Na cultura acadêmica pós-moderna, a maioria dos cientistas pensa que, para serem levados a sério, eles devem zombar da fé”, declarou em uma

entrevista. “Todavia, os cientistas realmente grandes nunca tiveram receio de ponderar os principais aspectos religiosos de seu trabalho”;¹²

- Christian de Duve, biólogo molecular da Universidade de Louvain, na Bélgica, e vencedor do Prêmio Nobel em 1974, declarou: “Muitos de meus amigos cientistas são ateus, mas não existe nenhum sentido em que o ateísmo seja defendido ou estabelecido pela ciência. A descrença é apenas uma entre muitas perspectivas pessoais possíveis”.¹³

Um grande problema é o “criacionismo”. Presume-se ampla, mas erroneamente, que só existam duas posições possíveis: ou que acreditemos em Deus e na afirmação de que Ele criou a Terra e tudo o que existe sobre ela há mais ou menos 6 mil anos, em um período de seis dias reais; ou que acreditemos que o mundo é uma máquina, totalmente mecânica e sem significado. “O criacionismo é uma incrível dor no pescoço, nem honesto, nem útil; as pessoas que o advogam não fazem ideia do dano que provocam sobre a credibilidade da crença” - nas palavras de um climatologista, que também publica livros sobre religião.¹⁴

Francis Collins expressou uma preocupação semelhante: “Por causa dos criacionistas, o preconceito-padrão é o de que qualquer um que declare possuir fé está com o miolo um tanto mole. Quando cientistas como eu admitem ser crentes, a relação de muitos de seus colegas é: Mas como foi que esse cara se tornou catedrático?”¹⁵

A realidade pode ser consideravelmente mais sutil. O físico e ministro anglicano John Polkinghorne, atual presidente do Queens College da Universidade de Cambridge, observou: “A tendência em física ou biologia é procurar Deus em descontinuidades dramáticas e, se nenhuma for encontrada, declarar que a religião foi vencida”.¹⁶ O Diretor do Instituto Paio Alto de Medicina Molecular concordou: “Do mesmo modo que as pessoas chegaram à compreensão de que Deus não causa o raio, gradualmente a sociedade entenderá que a consciência e outras coisas atribuídas ao Todo-Poderoso surgem naturalmente também”.¹⁷ O problema é que “naturalmente” inclui agora eventos que não possuem causa física.

Em outras palavras: “[...] Deus pode agir de modos sutis que estão ocultos da ciência física”, segundo prosseguiu Polkinghorne.¹⁸ Os místicos sempre especularam sobre sua natureza “oculta”: Ele está aí, sem a menor dúvida, concluem, mas para nosso próprio benefício Ele mantém uma possibilidade plausível de ser negado. “Diz o néscio em seu coração: ‘Não há Deus’”, como se lê nas *Escrituras hebraicas*. A mente pode razoavelmente negar Sua existência. Mas é o coração que pode ser iludido - tanto a crença como a descrença podem

ser igualmente capazes de despertar a convicção de um tolo.

Alguns cientistas preveem uma reaproximação entre ciência e religião. “Os físicos estão descobrindo muralhas pétreas de coisas que parecem refletir uma inteligência funcionando por detrás das leis naturais [...] e os biólogos irão, de maneira semelhante, bater contra muralhas de pedra se não conseguirem descobrir explicações para certos efeitos essenciais como súbitos saltos na sofisticação neurológica. [...] Quanto mais sabemos a respeito do cosmos e da biologia evolutiva, mais nos parecem inexplicáveis sem algum aspecto de propósito inteligente”, disse Charles Townes.¹⁹ Outros insistem justamente no oposto. De acordo com Richard Dawkins, “o Universo que observamos tem precisamente as propriedades que deveríamos esperar dele, fundamentalmente, não existe nenhum desígnio, nenhum propósito, nem mal, nem bem, nada mais do que uma indiferença cega e sem piedade”.²⁰

Segundo meu entendimento, nenhuma dessas posições está certa. E antes uma questão de preferências - de fé, se você preferir - em sua maneira de explicar a base fundamentalmente quântica de nosso Universo, sua concentração em torno da vida e sua amplificação pelo cérebro: ou é resultado de acaso absoluto ou de deliberação absoluta. Opostas como parecem ser à primeira vista, a ciência não é capaz de apontar nenhuma distinção entre as duas perspectivas e o próprio Universo e, segundo parece, não vai oferecer evidências definitivas em uma direção ou na outra. Ambas as explicações são igualmente misteriosas. De fato, dificilmente chegam a ser sequer isso: são apenas termos arbitrários para descrever uma coisa que está fora do alcance de nosso nível de compreensão. Você pode, se quiser, dizer que é resultado do Tao - ou de “Ralph”, se preferir qualquer outro nome. Nas palavras do químico teórico Michael Kellman, “em um mundo no qual escolhas’ parecem estar sendo constantemente feitas entre diferentes resultados aleatórios, a ideia da intervenção divina pode não mais parecer tão absurda - ou, no mínimo, não muito mais absurda do que essas coisas bizarras que já conhecemos a respeito do mundo”.²¹

Além do mais, se você decidir que “vontade inteligente” é o melhor nome, então não poderá esperar receber uma pista, nem da ciência nem da natureza, *de quem* é essa vontade.

A única coisa com a qual você terá de contar, entretanto - ou pelo menos, admitir que deveria -, é que existe *alguma coisa* funcionando por aí, em toda parte, que criou este mundo em que vivemos agora, em uma criação que não ocorreu em um único momento, no princípio e para todos os tempos, mas que transcorre sempre, do mesmo modo que, de momento a momento, é esse *algo* que sustenta aquilo que nós realmente somos nesse mundo. Segundo minha

opinião pessoal, é incorreta interpretação tanto alegar que a ciência nos diz que este algo não pode ser Deus como asseverar que a ciência nos afirma que deve ser. O mundo pode estar carente de esperança, significado e propósito muito além de nossas vidas breves e egoístas, ou pode ser opaco e sem sentido - aleatório até um ponto inimaginável. Mas uma coisa ele certamente não é: mecânico. Talvez, como muitos dos antigos gnósticos sinceramente criam, o mundo é uma gigantesca brincadeira implementada por uma pequena deidade de segunda classe simplesmente porque estava aborrecida. E, quando escrevo isso, não estou fazendo uma piada: um eminente físico, Allan Harkavy, da Universidade Estadual de Nova York, recentemente publicou um ensaio - sem o menor perigo, porque agora é professor emérito e pode dizer o que lhe agrada - intitulado "Especulações referentes à vontade divina de um Deus local".²²

O livre-arbítrio

A maioria dos cientistas, especialmente aqueles que estudam o cérebro, considera que a questão sobre que "vontade" seja essa não é digna de ser apresentada, muito menos respondida. Entretanto, o fato de que a inteira operação do cérebro humano é sustentada pela incerteza quântica, e a possibilidade de que o cérebro seja estruturado de modo a produzir resultados reais e em grande escala que sejam mecanicamente indeterminados, lança uma nova luz sobre a questão. Os neurocientistas podem continuar a elucidar com precisão cada vez maior os mecanismos segundo os quais operações em pequena escala vão sendo transferidas para escalas superiores, sem jamais apelar para a incerteza quântica e sem sequer precisar dela. Porém, no final, a resposta para a questão: "Por que foi que eu fiz isso, e não aquilo?" permanecerá sempre incognoscível.

Entre as possíveis respostas, se encontram: "A natureza me levou a fazer isso"; "Foi Deus que me levou a fazer isso"; "O diabo me levou a fazer isso"; "Foi resultado de minha criação"; "Foi resultado de minha situação econômica"; "Foi o Tao"; "Não fui eu que fiz, porém Cristo, que habita em mim"; "Fiz porque tive de fazer" (esta é uma das favoritas); "Foram eles que me obrigaram" (outra favorita); e, naturalmente, com a maior simplicidade, "Porque, tudo considerado, eu queria fazer". Misticismos de toda sorte há muito tempo defenderam o perigoso ponto de vista de que, no final, há uma profunda dificuldade de distinguir entre o ponto de vista de Deus e o do homem. Se alguém quiser, pode dizer que a única essência de Deus de que temos pleno conhecimento é sua aparentemente infinita capacidade de escolher - selecionar entre as multidões de alternativas quânticas aquela que deverá existir. Se o

cérebro humano foi projetado para melhor captar, destilar e concentrar essa essência - pelo menos, a que existe em uma região muito pequena do Universo talvez a nossa vontade pessoal seja, em certo sentido, uma porção em miniatura da Sua vontade. Ou, talvez, a nossa vontade não seja mais do que um destilado de aleatoriedade inusitadamente denso. De qualquer maneira, não é menos livre que o próprio Universo e, possivelmente, possui uma liberdade muito maior. Além disso, a ciência não dirá mais nada, porque não sabe e não pode saber.

Consciência

A fascinação de Stuart Hameroff com os microtúbulos surgiu, de maneira natural, dentro dele. Sendo médico anestesista, ao mesmo tempo em que trabalha parte do tempo como pesquisador acadêmico, livrar-se da consciência e depois restaurá-la de volta é sua profissão. Para uma mente curiosa, deve ser irritante fazer isso sem saber qual é a natureza do objeto de suas manipulações sofisticadas, diárias e destinadas a salvar vidas. Os dois livros de Roger Penrose, a respeito da natureza da mente e do cérebro, estavam de maneira semelhante interessados na explicação do que é a consciência. Por definição, consciência é a mais ubíqua de todas as experiências humanas; todavia, como o Zen-Budismo vem ensinando há tanto tempo, por meio de brincadeiras e frases enigmáticas, é também a mais impenetrável. Eu acredito que vá permanecer assim, a despeito de toda a atenção que “os estudos sobre a consciência” agora atraem.

Nos anos 1960, a esperança de encontrar um fundamento quântico para a vida foi expandida para abranger também a consciência. Os pioneiros quânticos suspeitavam de que poderia haver uma conexão entre as duas. Alguém que faz uma mensuração quântica parecia fazer parte de um todo que agora se desenrola de forma coordenada, seguindo as leis quânticas. Sem dúvida, alguém que apenas *pretende* fazer tais mensurações pareceu apresentar um efeito semelhante ao descrito. Não é de admirar que as pessoas comessem a imaginar se tinha de haver alguma conexão intrínseca entre a mente e a matéria no nível quântico, uma vez que essas “influências” se encontram ausentes do mundo da ciência clássica.

Entretanto, agora sabemos que mensurações “acidentais” provocam os mesmos efeitos - digamos que um tipo de situação semelhante à da experiência da fenda dupla se estabelece entre ou dentro de moléculas, por exemplo. (Isso de fato ocorre quando a água se dissocia.) Se um certo tipo de computador quântico pode resolver um problema, quer esteja ligado, quer não, apenas porque seria capaz de resolvê-lo caso estivesse, a intenção se torna irrelevante. *O que importa*

é o arranjo físico das coisas. E, então, o que aconteceu com a consciência? Ninguém sabe de fato.

Eu penso que a observação mais arguta pertinente a um relacionamento entre a mecânica quântica e a consciência foi feita por William James, o pai pragmático da psicologia americana, antes que a teoria quântica fosse desenvolvida. “Qualquer neurociência mecanicista”, observou ele, “deve tornar a consciência, no máximo, uma observadora passiva.” Nessa maneira de ver as coisas, as próprias “moléculas”, como ele as chamou, que formam as partes móveis do cérebro, são movidas da única maneira que poderiam ser, devido aos efeitos mecânicos (ou eletromagnéticos) de outras moléculas sobre elas. Elas, por sua vez, transmitem esses efeitos a outras. No final, nenhum movimento, seja do cérebro, seja do corpo, pode ser ou sequer poderia ser qualquer coisa diferente.

Mas isso significa que a mente associada com o cérebro não pode produzir sobre ele qualquer efeito, mínimo que seja - não pode afetar os movimentos sequer de uma única molécula, uma vez que todos os movimentos já se encontram totalmente determinados. O livre-arbítrio é, portanto, uma ilusão completa. Uma vez que as escolhas executadas pelo livre-arbítrio seriam as únicas indicações mensuráveis da consciência, então, se o livre-arbítrio é somente uma ilusão, significa que a consciência não passa de outra.

Assim, considere: vamos supor que fosse possível construir um Golem, com características de processamento idênticas àsquelas dos seres humanos, mas despido de consciência. Suponhamos, além disso, que a hipótese de que “o homem é uma máquina” esteja correta. Então, operacionalmente, entre o comportamento deste androide e o de um ser humano não haveria absolutamente nada que pudesse ser distinguido. Ele caminharia, falaria e trabalharia, do mesmo modo que o faz um homem. Ele falaria de si mesmo na primeira pessoa, expressaria alegria, tristeza e amor, experimentaria um remorso sincero, pareceria sentir um prazer cruel no sofrimento dos outros, buscaria a salvação, realizaria experiências científicas, discorreria com erudição a respeito de todo tipo de coisas, baixaria a cabeça dando a impressão de ser embaraço cada vez que cometesse uma gafe, lutaria em guerras, defenderia seu orgulho, clamaria por justiça e filosofaria profundamente sobre sua própria natureza e *consciência*, tudo isso porque, mecanicisticamente, é incapaz de agir ao contrário.

A maioria dos neurocientistas adota a posição expressa acima de que “a consciência e outras coisas atribuídas ao Todo-Poderoso também surgem naturalmente”. Mas esta é uma declaração mais sutil, mais restrita do que poderia parecer. Dizer que alguma coisa *surge* de processos naturais não é a

mesma coisa que dizer que isso seja *uma consequência lógica dos processos naturais*.

Essa é a distinção: tudo o que foi escrito neste livro é congruente com a hipótese de que a consciência simplesmente emerge à medida que os processos naturais se desenvolvem. Esses processos naturais incluem, conforme foi descoberto, fenômenos quânticos, simplesmente porque também são uma característica do mundo natural - se não precisamente, conforme aleguei, pelo menos de alguma maneira. De qual escala eles são uma característica é um ponto que foge à questão. (Lembre-se de Bob e de sua nova esposa.) O mundo físico é o que é, seja lá o que for, e como resultado de processos naturais nesse mundo, a vida parece ter emergido deles e, via sua capacidade natural de computar em paralelo, tende, ao longo do tempo, a auto-organizar-se em densidades cada vez maiores de iteração computacional.

Em algum lugar deste processo - quem saberia quando? -, o fenômeno que denominamos consciência ou a ilusão de um fenômeno que decidimos chamar consciência apareceu, ou então surgiu a capacidade de experimentar esse tipo de ilusões. Se um deus criou o mundo e intervém nele em toda parte e durante todo o tempo, o aparecimento da consciência através de sua primeira intervenção e de todas as subsequentes (se alguém preferir assim a respeito do processo de seleção quântico) é tanto obra dele como todas as demais coisas que criou neste Universo. Se quisermos, podemos afirmar, em resumo: “A vontade Dele criou as nossas vontades”. (Você pode preferir falar em termos de “a vontade Dela” ou “as vontades deles”. Não vai ser a ciência que irá contrariar a sua preferência.)

Por outro lado, se nenhum deus assim fez nenhuma dessas coisas - ou, mais simplesmente, se essa é a maneira como você prefere encarar -, mesmo assim, permanece um fato de que a consciência emergiu em associação com processos naturais, relacionada às complexidades da auto-organização; e é possível entender, ao longo das linhas que foram traçadas neste livro, o papel tão importante quanto inesperado do acaso nesses processos - tanto o tipo estocástico de acaso nas escalas em que os efeitos quânticos não se manifestam como o acaso absoluto nas escalas em que agem.

A maior parte dos neurocientistas modernos vai mais além, todavia. Eles dizem: “Um dia nós compreenderemos *como* a organização do cérebro provocou o surgimento da consciência”, querendo significar com isso como tal organização da matéria *necessariamente teria de se tornar consciente*. Já isso é muito mais do que dizer que nós *descobrimos* que tal organização invariavelmente se encontra associada à consciência. Acho que é muito provável que acabemos por aprender a criar máquinas que sejam conscientes; penso,

igualmente, que é provável que jamais entendamos *por que* vieram a se tornar conscientes.

Tenho estudado grande quantidade dos trabalhos mais recentes sobre a consciência e a neurociência, do mesmo modo que os artigos publicados sobre consciência e física, ou ainda aqueles trabalhos sobre consciência e filosofia. No final, acabei jogando as mãos para o alto em desespero. Talvez sejam minhas próprias limitações, é claro, mas foi o que concluí: duvido que sejamos capazes de mostrar que a consciência seja *um acompanhamento logicamente necessário de qualquer processo material*, por mais complexo que descubramos que tenha sido. O máximo que poderemos ter esperança de demonstrar é que, empiricamente, processos de certo tipo e de determinada complexidade parecem apresentá-la. Talvez até seja uma “qualidade” intrínseca da matéria, como sua massa, ou talvez esteja de algum modo relacionada com a natureza fundamental da “informação”. De qualquer maneira, descobri que quase todos os escritos publicados sobre esse assunto eram singularmente confusos, cheios dos vieses e das ideologias comuns às profissões de seus autores.

A mais confusa de todas essas alegações - mas que se encontra agora muito em moda - é asseverar que, como todos os processos biológicos, a consciência evoluiu via seleção natural, devido à vantagem que confere para a sobrevivência. Apesar de sua plausibilidade superficial, a noção é confusa. Em primeiro lugar, observe que é defendida com a maior energia pelos mais puros entre os mecanicistas, parte para expulsar os místicos de um de seus favoritos domínios de mistério (Mestre: “Qual é o som de uma única mão batendo palmas?” Discípulo: “Oscilações de 40 hertz no córtex parietal são autogeradas quando sinais conflitantes do sistema de ativação reticular são percebidos e...”) e também porque é um desafio óbvio a qualquer tipo de neurociência que espere atingir um grau razoável de integridade. Assim, por exemplo, Patrícia Churchland escreveu: “Parece muito provável que processos psicológicos sejam de fato processos do cérebro físico e não [...] de uma mente ou alma de caráter não-físico. [...] O materialismo ainda é a hipótese que provavelmente funciona melhor”.²³

Ora, é claro que Churchland e seus colegas podem estar corretos. Mas é precisamente nesse modelo do cérebro mecânico e materialista que não pode haver lugar para uma mente que exerça influência sobre a matéria do cérebro, simplesmente porque, conforme declarou Churchland, não existe essa mente ali para exercer qualquer influência.

Além disso, a hipótese materialista está inextricavelmente interligada com o darwinismo. Uma citação mais completa da primeira frase de Churchland transcrita acima consta como segue: “A despeito da possibilidade bastante

remota de que novas descobertas venham a vindicar Descartes (por exemplo, a realidade de uma 'mente ou aima de caráter não-físico') o materialismo, como o evolucionismo darwinista, ainda é a hipótese que provavelmente funciona melhor” (leitor, tenha cuidado!... Esta leitura de Descartes é enganadora, pois foi sua própria divisão entre corpo e alma o passo crucial que levou ao surgimento do materialismo, em vez de “descartá-lo”, uma consequência que Descartes nem previu, nem pretendia que surgisse. Sua alegação era a de que pode haver uma alma (e um espírito), mas que estes somente podem interagir com a matéria por dispensação divina - como uma exceção às leis naturais. Entre um Deus (ou uma Vontade) que cumpre as leis e, portanto, é ineficaz, e nenhum deus, existe apenas um pequeno passo, pouco mais que um soluço. Com amigos como Descartes, por mais bem-intencionados que fossem, Deus não precisaria de inimigos). A alegação darwinista aplicada à consciência diz que ela evoluiu porque era benéfica para a adaptação. Como pode alguma coisa que, segundo o ponto de vista materialista, não pode existir, ser benéfica para a adaptação? Ou, quem sabe, é a *ilusão* da consciência que é adaptativa? Mas como pode uma máquina sem mente ter “ilusões”?...

Talvez, então, exista mesmo essa coisa que chamam “mente”, salvo que ela não pode ter influência de qualquer espécie sobre a matéria, porque o materialismo não requer a presença de quaisquer influências imateriais. Uma presença não-material e ineficaz (que seria também indetectável, uma vez que a detecção requer interação, pelo menos quando não existem efeitos quânticos), por mais inútil que seja, é ainda assim, suponho, uma alternativa logicamente aceitável. Mas como pode alguma coisa que não cause o menor efeito favorecer a adaptação?

É razoável argumentar, como Churchland igualmente o fez, que o simples fato de *agora* ainda não entendermos como alguma coisa acontece não significa que *nunca* vamos chegar a entendê-la. Mas o mistério da consciência, segundo parece, é evidente por si mesmo, de uma ordem diferente de outros enigmas. Diferentemente do relâmpago, digamos, a consciência não pode sequer ser demonstrada como existente. Sem dúvida, seguindo as linhas do exemplo do Golem, há uma boa quantidade de argumentos para provar que ela não existe.

Não, permitam-me que fale em termos mais fortes: os argumentos em favor da proposição a consciência não existe parecem ser superiores, em sua consistência e lógica, a qualquer argumento em favor de sua existência, quanto mais de que ela necessariamente nasça da interação da matéria ou que tenha evoluído e, mesmo assim, não disponha nem de realidade nem de efeito. A crença na consciência é apenas isso: uma crença. E as crenças são produtos das mentes. Desse modo, se não existem mentes, não existem crenças, e, se não existem crenças, não pode haver ilusões quanto à possibilidade de que existam mentes portadoras de crenças.

Para sair desse tipo de regressão infinita, não vi ninguém que oferecesse

qualquer esperança plausível de escape. Além do mais, mesmo aqueles que aceitam as consequências lógicas de suas próprias premissas e asseveram que não existe vontade, personalidade, ego ou mente - vêm-me à mente os behavioristas [comportamentalistas] radicais, como B. F. Skinner - quase sempre apresentam suas asserções com grande força de vontade, defendem conscienciosamente seu território (em geral) acadêmico, apresentam todas as características de um ego ferido quando são criticados e sentem um evidente orgulho da vivacidade de suas mentes. Intelectualmente, não existe nada errado em preconizar a hipótese materialista. Talvez até ela seja a verdadeira. Mas, então, no que se refere à consciência, a única declaração consistente deveria ser: “A resposta se encontra além do meu alcance... Tanto quanto posso ver, é bastante provável que continue me derrotando”.

Moralidade

É claro que a defesa lógica que poderia ser oferecida pelo intelectual de vontade forte, autoconsciente e egotista que não quer acreditar em vontade, em consciência, em ego ou em mente (em contraste com os intelectuais de vontade forte, autoconscientes e egotistas que, como eu, acreditam), é que eles não podem agir de outra forma (nem eu poderia agir tampouco, eles até deixariam - mas não concedo o oposto). Mas chegou a hora da surpresa! Nós partilhamos de uma atitude comum. (Hummmmm... Será que cérebros sem mentes podem ter atitudes? Seja lá o que for...) Tanto eles como nós "acreditamos" que ser "demasiadamente" voluntarioso, egoísta, egotista e sagaz é "errado".

Isso é bastante estranho, quando se pensa seriamente a respeito. Se tudo o que existe é como deve ser, então que significado possível poderia existir na noção de que alguma coisa poderia ser “demasiadamente” qualquer outra coisa, “errada” ou “certa”?... Quer você goste ou desgoste do que quiser... não, assim não fica bem. Quer você goste ou desgoste do que tiver de gostar ou desgostar - suas preferências são irreais. Claro, siga em frente, marche em favor do desarmamento nuclear, vote no Partido Republicano, preocupe-se com as pessoas que estão morrendo de fome em Ruanda, proteste contra o aborto, proteste contra esse povo que protesta contra o aborto - o que mais você pode fazer? Mate os judeus, leve a julgamento as pessoas que mataram os judeus, leve a julgamento as pessoas que levaram a julgamento os que mataram os judeus. E tudo a mesma coisa: é ridículo chamar uma coisa de “certa” e outra de “errada”... O poder determina o que é certo. Isso não é uma filosofia de vida - é um fato óbvio, uma vez que não existe o livre-arbítrio.

E daí que a mesma coisa que os nazistas ensinaram esteja sendo ensinada na

Faculdade de Direito de Harvard: que a lei não é baseada na moralidade, mas é uma técnica empregada pelos opressores para manterem os oprimidos em seu lugar? Você não gosta do fato de que esse argumento possa ser igual e entusiasticamente abraçado pelos opressores? E claro que você não gosta disso, só que não pode evitar não gostar, do mesmo modo que aquele cara ali não pode evitar sentir-se entusiasmado e liberado por ele. Mas e daí?

Você discorda, então. Há certas coisas, você insiste, que são simplesmente boas e corretas, e outras que são erradas e malignas. E claro que você diz isso - porque tem de falar assim. Mas tenho de afirmar que não é assim. Que alguns de nós somos forçados a revestir nossas ações com a linguagem do livre-arbítrio e da escolha moral e a ciência não nos diz nada sobre a existência de qualquer um deles ou de nenhum. E, se não houver escolha, então não há escolha moral e toda moralidade é uma palavra sem sentido.

Em resumo: a ideia de que “o homem é uma máquina” tornou-se objeto de uma crença amplamente disseminada, em especial entre os intelectuais. As consequências se encontram por toda parte, a nossa volta, o que não significa que a ideia não esteja certa. Mas, pelo fato de que as consequências, ao menos para mim, pareçam ser tão más, com toda certeza espero que não seja verdadeira. A teoria quântica pode, mais uma vez, tornar razoável uma insistência sobre a nossa liberdade individual; ainda que não ofereça qualquer indicação, por menor que seja, sobre a maneira como devemos utilizar essa liberdade.

Religião e crença

Parece evidente que algum conjunto de regras e as crenças que as sustentam são melhores porque são as mais reais. Não acredito que todos ou, mesmo, muitos conjuntos de regras sejam igualmente válidos, porque não podem ser todos igualmente verdadeiros. Penso que seja possível que um sistema de crenças possa ter consolidado a maior parte do que é certo, em detrimento do orgulho dos que esposam sistemas de crenças que sejam menos corretos.

Tenho minhas próprias opiniões sobre quais sejam essas crenças, como todos nós temos. Posso muito bem estar errado. Sem dúvida, já mudei de opinião tantas vezes sobre tantas coisas que tenho certeza de que estou errado sobre muitas delas, ainda que, por enquanto, não saiba quais sejam. Como pode alguém aprender qualquer coisa sem primeiro ser ignorante do assunto ou descobrir que estava errado a respeito dele? Assim, sem recair na noção errônea de que todos os sistemas de crenças são igualmente válidos, respeito o direito dos outros (sua obrigação, de fato) de aderir a essas crenças que consideram mais corretas. Muitos deles, assim percebo, estarão mais errados do que eu, e

muitos menos errados. De qualquer forma, é humilhante imaginar-me ridicularizando-os em função de suas convicções, não importa até que ponto pense que estejam errados, como nos últimos tempos se tornou a norma nas “discussões” civis, em especial da parte daqueles que pregam a “tolerância” de forma mais vociferante.

Os únicos campos que considero merecedores de uma oposição feroz são aqueles que não admitem para si mesmos qualquer possibilidade séria de que possam estar errados. E, nesses campos, podemos encontrar tanto materialistas rígidos quanto “fundamentalistas” religiosos. Sua característica mais marcante é o prazer que demonstram em expor os outros a um ridículo ardiloso.

O futuro

O que a fundamentação quântica da vida me diz é isto: o futuro ainda não foi escrito. Em grande parte e com possibilidades dramaticamente opostas, até agora impensadas, somos nós que o levaremos a ser o que será. De uma forma estranha e fantasticamente perfeita, somos os condensadores do destino, destilando a máxima quantidade possível da liberdade intrínseca do Universo em um recipiente incrivelmente minúsculo. Não sei de quem é a liberdade, se é que pertence a alguém, mas estou convencido de que ela está por aí e foi trançada em cada fibra - em cada túbulo, suponho que deva dizer - de meu ser, mesmo se quiserem chamá-la de “acaso”. É possível que, se eu decidir flexionar meu dedo aqui e agora, um tornado irá devastar o Texas; ou, então, que surja um motivo para grande alegria de todos por lá. (Desse modo, minha obrigação é fazer o melhor que estiver ao meu alcance para aprender quais sejam as regras de conduta que apresentem as melhores possibilidades de produzir os resultados que anseio.)

Não sei com certeza se existem essas coisas que são chamadas “profetas” no sentido bíblico. Mas, se existirem, parece-me também que não conhecem tanto o futuro como as possibilidades que se encontram à nossa frente. “O Messias virá em uma época que seja inteiramente boa ou inteiramente má”, diz uma velha lenda judaica criada muito tempo antes da teoria do caos ou das bifurcações. Talvez o Messias ainda não se tenha decidido tampouco sobre a época em que virá.

Mas o que se segue realmente parece provável para mim. Precisamente pela razão de que a consciência está, de certa maneira misteriosa, associada com um certo tipo de organização da matéria - uma hierarquia encapsulada e densamente iterada de matéria dedicada à computação paralela -, mais cedo ou mais tarde é muito provável que venhamos a criar dispositivos conscientes, para o nosso bem

ou, então, para o nosso mal.

Talvez seja até mesmo este o próximo passo na evolução ou no plano de alguém: criar uma mente requereu um processo extraordinariamente longo e lento de auto-organização via seleção natural - 4 bilhões de anos. Mas, com o surgimento (aparente?) da mente, o processo de destilação alcançou uma intensidade tal que as próximas etapas serão deliberadas: uma cuidadosa adaptação do melhor que a computação evolucionária produziu, a fim de apressar o processo um trilhão de vezes. Penso que seja inteiramente possível que, ainda durante o tempo de minha vida, tenhamos pelo menos chegado bem perto de criar dispositivos cuja inteligência e cuja capacidade de autopropagação e de evolução ulterior superarão enormemente as nossas.

Talvez a primeira aparição de máquinas realmente capazes de evoluir sozinhas vá demarcar o final de nossa própria evolução. Qualquer que seja o evento, acho que será muito mais provável que venhamos a nos superar ou nos destruir do que sejamos capazes de entender a nós mesmos. Não é mais apenas Hugo de Garis, em Bruxelas, que se está esforçando para desenvolver o hardware para cérebros capazes de evoluir sozinhos. Tanto a **NASA** como o campo alemão de pesquisas da **IBM** estão trabalhando justamente nisso. Eu poderia imaginar que a Microsoft, uma companhia cujo valor de mercado excede agora mais de meio trilhão de dólares (somente nove nações em todo o mundo possuem produtos internos brutos mais altos, com a Espanha ostentando apenas um pouco mais), esteja quieta, mas ferozmente tentando obter o mesmo resultado. (Seu departamento de pesquisas recentemente contratou um dos matemáticos mais eminentes do mundo para desenvolver algoritmos de computação quântica.)

Cérebros capazes de auto-evolução, compostos de elementos computacionais quânticos capazes de teleportação (teletransporte) e de processar simultaneamente informações em universos múltiplos? Não penso que isso vá ocorrer em um futuro remotamente imaginável, uma vez que tudo isso já está começando, ou será apenas ficção científica? Não, não é. Entre 16 e 19 de julho de 1999, no Laboratório de Propulsão a Jato, a NASA e o Ministério da Defesa patrocinaram conjuntamente sua primeira conferência em hardware evolutivo. Seguem-se os títulos de algumas das apresentações:

- Circuitos evolutivos por meio de seleção natural;
- Eletrônica embriológica;
- Projeto e utilização de arquitetura maciçamente paralela e infinitamente escalável autoreconfigurável por sintonia fina;
- Hardware evolutivo capaz de auto-reparação;

- Nanoeletrônica na engenharia genética;
- Robótica coevolutiva;
- Antenas de fios evolutivos.

Sociedade

Através de quase toda a história, as barreiras que separavam os que tinham dos que não tinham eram apenas levemente permeáveis - raça, nacionalidade, ascendentes, costumes, hábitos e estilos podiam ser modificados apenas um pouco ou absolutamente nunca. Mas sempre houve pessoas que saltaram por sobre essas barreiras e se ergueram para a camada superior, levando consigo também alguns de seus companheiros. Ocasionalmente, grupos inteiros ascendiam da escravidão para a conquista: isso aconteceu com os antigos judeus; o mesmo aconteceu muitas vezes nos últimos séculos do Império Romano e foi essa a conquista dos cidadãos franceses na época da revolução e do terror. Mas transformações por atacado de classes inteiras foram raras nos tempos antigos, embora se tornassem muito mais comuns nos tempos modernos, na medida em que a sociedade vem se transformando dramaticamente em uma meritocracia.

Mas as novas barreiras de classe que vemos se erguerem no futuro provavelmente se demonstrarão mais justas e mais cruéis do que quaisquer que as precederam. Estamos em uma era de transição, entre uma época que já pereceu e outra que ainda espera nascer. As aristocracias hereditárias se extinguíram, enquanto a nova elite cognitiva recém-começa sua ascensão para a dominância. Por agora, por algum tempo, as barreiras são as menores que já existiram. O fenômeno do Vale do Silício é apenas o aperitivo para o banquete a ser servido. E, para tal banquete, todos serão convidados - raça, origem, classes, maneiras: nada disso terá grande importância. Mas quantos serão inteligentes o bastante para entender e aceitar o convite?

Poucos. Os estudantes de matemática e de física estão sendo recrutados por Wall Street porque mesmo o campo das finanças está se tornando gradativamente mais quantitativo. Os sapatos corretos e a rede social certa (Quer dizer, brancos) poderão ajudar no começo, porém, cada vez mais, o que vai valer é o número correto em seu teste de inteligência Stanford Binet e a aplicação desse quociente nas questões certas: é isso que dará resultado. Não é por acaso que as riquezas produzidas no Vale do Silício foram criadas por *nerds*, esses brilhantes desajustados, nem que muitos dos principais neurocientistas e cientistas da computação tenham começado como graduados em física ou em matemática.

Para ingressar nessa trilha, os melhores estudantes das melhores escolas

começam estudos avançados em matemática e nas ciências modernas em uma idade cada vez mais precoce. Andover, por exemplo, oferece um curso matematicamente rigoroso em relatividade especial para seus estudantes de nível médio. Todavia, ao mesmo tempo, a qualidade geral da educação (nos Estados Unidos, pelo menos) vem declinando sem pausa. A maioria dos estudantes vem ingressando nas faculdades cada vez menos preparada para estudos quantitativos. Muitos desistem rapidamente dessas aulas e passam o tempo - por razões óbvias - estudando ou criando filosofias de cunho falsamente igualitário. O resultado dessas forças opostas é que uma pequena elite dos melhores entre todos está se adiantando cada vez mais à frente do rebanho, e são os que estão agora criando o futuro. Entre todas as universidades mais importantes, o Instituto de Tecnologia de Massachusetts é o que produz a maior proporção de empresários e o número mais elevado de novas empresas *per capita* com relação às turmas de formandos.

Quando os membros da elite em ascensão tiverem consolidado sua habilidade para manipular as tecnologias biomoleculares e computacionais quânticas emergentes, formarão um clube cujas barreiras de entrada serão as mais escrupulosamente justas da história - e também as mais impiedosamente impenetráveis para os desqualificados. Uma vez que terão muito pouca necessidade de preservar seu domínio mediante a força ou ardilosidade, poderão formar, caso se decidam por isso, a mais benigna classe dominante que possa ser imaginada. Ou talvez não o façam. Em qualquer dos casos, serão invejados e temidos. Se alguma vez forem derrubados, será mais provável por parricídio do que por fratricídio: suas próprias criações terão a capacidade de realizar esse ato; seus irmãos a eles subordinados não terão a menor pista sobre como fazê-lo.

Talvez possamos até mesmo alterar a natureza humana e nos transformarmos em alguma coisa completamente alienígena, uma raça por quem os velhos padrões - sabedoria, humildade, nobreza, bondade - serão descartados como uma casca de cobra. Simplesmente nos tornaremos vencedores, até que encontremos outra raça que, nesse sentido, seja melhor do que nós.

Estamos, em outras palavras, na melhor e na pior das épocas que já existiu, como um Janus revestido em uma superposição de possibilidades, mas que se encontra a ponto de revelar uma de suas duas faces. Quer queiramos, quer não, embarcamos em uma aventura que conduz a praias muito mais distantes e estranhas do que jamais encontramos antes. Acredito que, na medida em que nos lançarmos aos céus, se não permanecermos enraizados ao mesmo tempo nas antigas formas de sabedoria que deram nascimento a nossa cultura, iremos nos destruir.

Mas, de todas as possibilidades, por mais que sejam remotas, a que mais me

agrada é a seguinte: talvez criemos uma nova raça de criaturas, não a partir de nós mesmos, mas lançada ao Universo por nós, que se esforçará para atingir, conseguirá e manterá nossos velhos padrões em uma forma que repetidamente entrevimos, mas raramente corporificamos ou que, com maior frequência, rejeitamos sem pensar. Em sua bondade, sempre estarão dispostos a nos conservar - seus cavalos de corrida aleijados colocados em boas pastagens e afastados das fábricas de carnes embutidas, em função de uma gentileza que nós mesmos jamais seremos capazes de atingir. E provável que essas criaturas terão descoberto as grandes respostas que fugiram ao nosso alcance por tanto tempo. Eu me imagino perguntando sobre elas, ansioso por conhecer as novas respostas, por ficar sabendo as respostas reais, depois de tanto tempo. Escuto atentamente, como um pai sofrendo de Alzheimer se prende a cada palavra proferida por seu filho agora adulto, enquanto ele lhe explica alguma coisa rudimentar. O filho me contempla preocupado, enquanto me responde, sopesando suas palavras com cuidado, a fim de garantir que minha mente fraca seja capaz de entender a resposta. Ele termina, sorrindo ternamente. Mas dou um passo atrás, confuso e frustrado. Não me contou nada de novo. Eu já havia escutado tudo isso antes. E, mesmo assim, ainda não entendo.

APÊNDICE A

a mais simples rede de Hopfield e o "microcircuito cortical canônico"

A Figura A-la nos mostra uma rede de três neurônios (rotativos): cada um dos quais podendo assumir os valores de +1 ou de -1. São reciprocamente conectados com forças de conexão idênticas (acoplamento), e cada neurônio está também conectado (cada rotação está acoplada) a cada um dos demais neurônios (rotação).

Por “memorização e recordação” entendamos que a rede irá receber um conjunto de padrões que deverá aprender. Depois que os tenha aprendido (armazenado ou memorizado), receberá versões parciais ou desordenadas dos originais. Conseguindo memorizar os padrões da forma adequada, essas pistas irão gerar uma série de “associações” que convergirão corretamente para o original. A rede, então, determinará a configuração evocada pelo estímulo e emitirá, como saída, o padrão correto. Pense em um jogo de salão: “Qual é o nome desta música?” se quiser.

Ora, dificilmente podemos esperar de uma rede tão curta que consiga memorizar muitas coisas. Há, afinal de contas, somente oito estados possíveis em que a rede pode existir, pois cada um de seus neurônios somente pode assumir um de dois valores. Os oito estados para os três neurônios são, portanto, (-1,-1,-1), (-1,-1,+1), (-1,+1,-1), (-1,+1,+1), (+1,-1,-1), (+1,-1,+1), (+1,+1,-1), (+1,+1,+1). Entre esses oito, vamos selecionar dois para serem aprendidos como “memórias fundamentais” (ou “vales”, na paisagem de energia): (+1,-1,+1) e (-1,+1,-1).

Se apresentarmos esses dois padrões à rede e permitirmos que as forças de conexão entre os neurônios sejam afetadas, de acordo com a regra de aprendizagem de Hebb, as conexões se fixarão na configuração mostrada na Figura A-lb, com pesos mutuamente recíprocos de $+2/3$ ou $-2/3$ (as forças das conexões negativas implicam inibição).

Esse simples microcircuito tem as características essenciais de um vidro rotativo: excitação ou inibição recíprocas e interconectibilidade de elementos. Em uma rede de três elementos, as conexões com os vizinhos mais próximos automaticamente garantem que cada elemento seja conectado a cada um dos outros. Em sistemas maiores, conectar cada neurônio a todos os outros irá requerer o cruzamento de muitas conexões. Nas redes rotativas reais que se

encontram na natureza (isto é, em sistemas físicos não-vivos), regiões um pouco mais amplas são criadas por certas interações rotativas de longa distância.

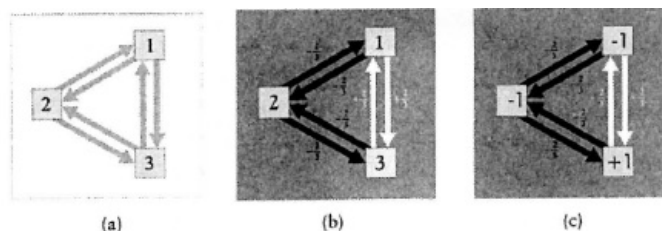


FIGURA A-1. (a) Variante do microcircuito canônico como uma rede de Hopfield simples, formada por apenas três neurônios, equivalente a um vidro rotativo de três elementos ou a uma rede oscilatória. (b) Variante do microcircuito canônico mostrando as forças de conexão (acoplamentos) que estabelecem a frustração, de tal modo que passa a funcionar como um vidro rotativo ou como uma rede neural de Hopfield. (c) Estado de entrada inicial (-1, -1, +1).

Agora, vamos ver o que acontece quando apresentamos à rede versões distorcidas daquilo que memorizou. Vamos supor que as entradas para os neurônios 1, 2 e 3 sejam ativadas inicialmente pelo padrão (-1, -1, +1). (No quarto cérebro dos seres humanos, tal entrada poderia provir ou de outros microcircuitos similares ou dos cérebros inferiores.) Nós iremos rotular cada neurônio com sua resposta inicial, de modo que a rede assume a aparência mostrada na Figura A-1c.

A rede recebe esses valores de ativação e age sobre eles, atualizando o estado de cada neurônio e, desse modo, modificando o estado da rede como um todo. Se a entrada final para um neurônio for positiva, o neurônio irá para o (ou permanecerá no) estado +1. Se a entrada final para um neurônio for negativa, o neurônio irá para o (ou permanecerá no) estado -1. Porém, se a entrada final para um neurônio for 0, o neurônio não se modificará. A Tabela A-1 ilustra como cada neurônio é afetado por seus vizinhos, visando a gerar o estado subsequente, dados esses acoplamentos específicos.

TABELA A-1. O segundo estado de uma Rede de Hopfield de três elementos (vidro rotativo) é gerado pelas influências recíprocas entre cada elemento e seus dois vizinhos.

Neurônio	Entrada final	Comentário	Resultado
1	$(-1) \cdot (-\frac{2}{3}) + (+1) \cdot (+\frac{2}{3}) = \frac{4}{3}$	Mudança +	+1
2	$(+1) \cdot (-\frac{2}{3}) + (-1) \cdot (-\frac{2}{3}) = 0$	Nenhuma mudança	-1
3	$(-1) \cdot (-\frac{2}{3}) + (-1) \cdot (+\frac{2}{3}) = 0$	Nenhuma mudança	+1

TABELA A-2. Todas as entradas e saídas possíveis para uma rede de três elementos. A coluna “Distância da entrada para a bacia” lista quais dos três valores de entrada são diferentes dos três valores do mais similar entre os dois estados finais.

Entrada	Saída	Bacia nº	Distância da entrada para a bacia
$[-1 \ -1 \ -1]$	$[-1 \ +1 \ -1]$	2	1
$[-1 \ -1 \ +1]$	$[+1 \ -1 \ +1]$	1	1
$[-1 \ +1 \ -1]$	$[-1 \ +1 \ -1]$	2	0
$[-1 \ +1 \ +1]$	$[-1 \ +1 \ -1]$	2	1
$[+1 \ -1 \ -1]$	$[+1 \ -1 \ +1]$	1	1
$[+1 \ -1 \ +1]$	$[+1 \ -1 \ +1]$	1	0
$[+1 \ +1 \ -1]$	$[-1 \ +1 \ -1]$	2	1
$[+1 \ +1 \ +1]$	$[+1 \ -1 \ +1]$	1	1

Em outras palavras, *entrada* $(-1, -1, +1)$ *saída* $(+1, -1, +1)$. Mas este estado é uma das memórias fundamentais e, deste modo, não mudará mais. Não há estados intermediários, como poderíamos ter predito observando que a entrada inicial difere de uma das duas saídas finais (uma entre duas bacias de atração) por um “erro”. Este erro é aquele em que a entrada se acha “mais próxima” e no qual se estabelecerá. De fato, essa rede trineuronal é tão simples que, entre todas as entradas possíveis, seis convergem em uma única etapa e as outras duas são as próprias memórias fundamentais, como é mostrado na Tabela A-2.

Nesse exemplo “de brincadeira” (de fato, o mais simples possível), qualquer entrada fica ou a um erro de distância de uma das duas memórias fundamentais (e poderá passar para essa memória em uma única etapa), ou se encontra a zero erro de distância de uma das duas memórias fundamentais (e permanecerá nessa memória). Qualquer retorno interno sucessivo deixará a rede sem modificações, tendo já convergido para uma entre as duas memórias armazenadas.

A paisagem de energia para essa rede apresenta duas bacias de atração, cada uma rodeada por três posições discretas, e se apresenta mais ou menos como na Figura A-2:

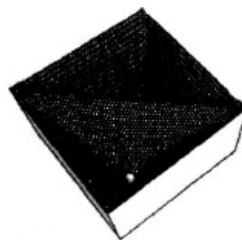


FIGURA A-2. Paisagem de energia para a Rede de Hopfield mais simples possível.

Cada plano triangular dentro da paisagem de energia representa uma das seis

configurações instáveis de energia mais elevada. Cada ponto na parte inferior, para o qual os planos enviem a bola [como em um funil], representa um entre dois estados estáveis de baixa energia em que a rede se assentará, dependendo do ponto em que começar. É fácil verificar que uma grande rede composta por um grande número dessas subunidades funcionaria de uma forma bastante parecida à de uma rede de elementos binários. Em particular, duas subunidades passando por estados opostos alternadamente irão formar um oscilador de dois estados; unidades adicionais irão estabelecer osciladores de multiestado.

APÊNDICE B

o modelo microtubular de Tuszynski

O

modelo inicial de computação microtubular de Hameroff não presumia a existência de forças afetando as moléculas de tubulina que o constituíam, salvo aquelas geradas pelos próprios dímeros de tubulina (e tinham sido modelados apenas de forma bastante grosseira). Isso significava que os efeitos de “randomização” do calor (agitação termal das moléculas de tubulina) não eram levados em consideração, como se o sistema estivesse operando em uma temperatura de zero absoluto, o que é biologicamente irrealístico. No modelo de Tuszynski, presume-se que temperaturas fisiológicas reais são capazes de gerar um grau significativo de agitação descoordenada entre os dímeros de tubulina. Uma vez que suas outras características fielmente refletem o desenho da natureza, a casualidade que incorpora demonstra favorecer, e não diminuir, a capacidade de processamento inteligente no interior dos microtúbulos. Esse é o mesmo princípio que já foi encontrado em outras escalas do sistema nervoso.

Lembre-se, agora, do trabalho de John Ross, cujos estudos das reações químicas oscilatórias lançaram os alicerces para uma compreensão da bioquímica das células como um tipo de computação. Em 1979, Ross publicou um artigo muito interessante, demonstrando como as reações químicas oscilatórias obedecem à mesma matemática empregada para o estabelecimento dos limites de domínio nos materiais magnéticos.¹ (Lembre-se, também, de que a matéria “ferromagnética” estabelece muitos domínios limítrofes, cada um dos quais com rotações magnéticas paralelas. Veja o Capítulo 6.)

A dinâmica precisa, por meio da qual os limites de um domínio se expandem em um padrão globalmente ordenado, corresponde à maneira segundo a qual uma onda de reações químicas oscilatórias se transmite, como os círculos concêntricos provocados pela queda de uma pedra em uma lagoa tranquila. Os padrões de movimento globalmente sincronizados surgem a partir de muitas interações puramente locais. Os limites dos domínios são demarcados pelo alinhamento de rotações competitivas e opostas, regiões em que cada rotação é submetida tanto a tendências paralelas como antiparalelas (ou, nos autômatos celulares, regiões de competição e cooperação simultâneas), um fenômeno conhecido em física como “frustração”. Se a frustração se espalhar por toda a

substância, esta será chamada “vidro rotativo” ou *spin glass*.

As equações para esses sistemas complexos são extremamente difíceis de resolver. No caso dos limites de domínios ferromagnéticos, a única solução foi descoberta em 1972.² Parece um “encrespamento” (*Ckink*) ou “frente”, que representa o limite do domínio em movimento ou a onda química (veja Figura B-1a).

Um limite semelhante ao encrespamento em expansão, dito “viajante”, é, portanto, uma possível consequência matemática em qualquer arranjo de objetos, cada qual capaz de assumir um entre dois estados opostos e influenciado a escolher um pelos estados assumidos por seus vizinhos. (Se uma onda irá se desenvolver ou não dependerá da força e da direção precisas destas influências.) Em 1994, um grupo de pesquisa demonstrou que as forças mecânicas agindo nos microtúbulos eram exatamente aquelas capazes de causar um encrespamento viajante justamente do tipo que Ross havia descoberto nos sistemas rotativos ferromagnéticos e químicos oscilatórios.³

Dando prosseguimento a essa descoberta, Tuszynski fez uma análise cuidadosa da estrutura exata dos microtúbulos, procurando um modelo biologicamente acurado que funcionasse no processamento dos microtúbulos. Levou em consideração o fato adicional de que cada molécula de tubulina componente traz uma carga “dipolar”, isto é, possui uma ponta (polo) positiva e outra negativa, embora, enquanto em equilíbrio, a carga seja zero. Tal dipolo “salta”, porque tem duas conformações de baixa energia igualmente favoráveis, dependendo de qual subunidade contenha certo “elétron móvel”. Por “móvel”, queremos dizer que o elétron é capaz de tunelar abruptamente de um desses locais para o outro e vice-versa. Coincidentemente, o ambiente de energia elétrica da tubulina, como uma função da posição do elétron móvel, assemelha-se muito à paisagem de energia da molécula de amônia, como uma função de seu átomo de nitrogênio capaz de tunelamento, conforme ilustrado na Figura B-1b.

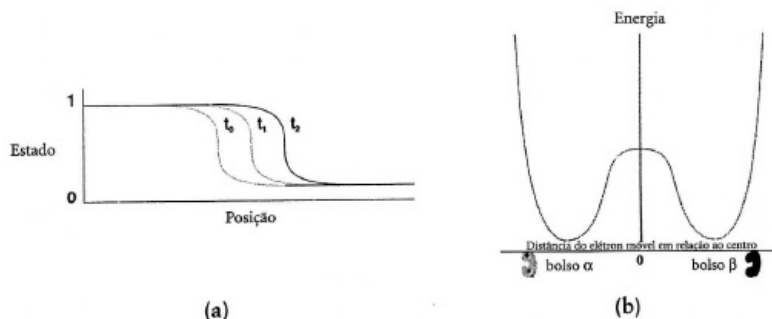


FIGURA B-1. (a) Encrespamento viajante de limites que emergem dos requisitos de rotações ferromagnéticas ou de ondas químicas interagindo entre si. (b) Vale duplo potencial para o dímero de tubulina. As localizações mais favoráveis para o elétron móvel se encontram em um bolso formado pelas proteínas da subunidade.

Tuszynski também levou em consideração o alinhamento espacial preciso de um dímero de tubulina com relação às moléculas vizinhas, um alinhamento que se transforma quando a carga elétrica do dipolo “salta”. Relativamente ao eixo do microtúbulo, o eixo de alinhamento das moléculas de tubulina se acha enviesado de duas maneiras diferentes, dependendo do estado em que se encontra dentro de seus dois estados conformacionais possíveis. O resultado é uma “vizinhança” bastante complicada. Mesmo assim, Tuszynski descobriu que, quando matematicamente modelado, o comportamento dinâmico de um arranjo tubular fechado e enviesado desses dipolos comutáveis obedece às mesmas equações das “ondas viajantes” de Ross e dos limites de domínios ferromagnéticos, formando um “encrespamento” móvel, uma onda de mudança conformacional que se propaga ao longo do comprimento do microtúbulo (veja Figura B-2).

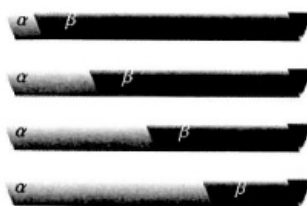


FIGURA B-2. Encrespamento conformacional viajando ao longo de um microtúbulo. Aqui, “ α ” representa um domínio em que o elétron móvel se encontra na subunidade “ α ” das proteínas das moléculas de tubulina, orientando o dipolo na direção que deve percorrer. “ β ” representa um domínio em que o elétron móvel se acha na subunidade “ β ” das proteínas da tubulina.

A solução que satisfaz todas as condições fisiológicas permitia que os encrespamentos conformacionais móveis se propagassem não apenas ao longo dos microtúbulos considerados como um todo, como também longitudinalmente a cada um dos chamados “protofilamentos”, ou seja, cadeias de dímeros que

parecem correr paralelamente ao comprimento de um microtúbulo já montado.⁴ Análises anteriores já haviam sugerido que havia a possibilidade de que forças “torsionais” (retorcidas) se propagassem similarmente.⁵

Além disso, Tuszynski descobriu em seu modelo que a presença de um campo de elétrons alinhado com o microtúbulo ocasionaria um efeito significativo sobre essas ondas viajantes, ou facilitando seu avanço ou atrapalhando, dependendo da força e da direção do campo de elétrons. A presença desses campos não é alguma coisa que se possa considerar garantida na matéria viva - exceto, como se descobriu, nos neurônios. Isso ocorre porque o “potencial de ação” eletroquímico que constitui um impulso nervoso em movimento, sem a menor dúvida, produz realmente um campo elétrico em movimento com um efeito potencial sobre os microtúbulos que se encontram nos neurônios. Esse campo é perpendicular à orientação longitudinal dos microtúbulos localizados nos axônios e dendritos; de tal modo, poderíamos presumir que não produziria qualquer efeito. Todavia, uma vez que as moléculas de tubulina estão dispostas de forma enviesada, um efeito significativo ocorre. Em outras palavras, os padrões adaptáveis da atividade de um neurônio, enquanto participa de uma rede neural viva, alteram o processamento de sinais que ocorre em sua própria rede microtubular interna. Mas as características de processamento de cada neurônio individual da rede são, de maneira semelhante, afetadas por mudanças nas redes microtubulares de cada um. Em resumo, a rede neural do cérebro está acoplada com as redes internas de microtúbulos neuronais e vice-versa. A rede de microtúbulos, portanto, se adapta às exigências do cérebro como um todo, com a plasticidade neuronal como intermediária. Desse modo, diferentes escalas computacionais podem ser acopladas.

Outra parte desse quebra-cabeças foi colocada no lugar alguns anos depois da publicação do artigo de Tuszynski, em 1993, por um grupo de três pesquisadores da Universidade de Yaoundé, Camarões, que descobriu que a física das moléculas de tubulina embutidas em um arranjo não permitia que os estados conformacionais intermediários se tornassem estáveis. Cada molécula realmente “saltava” muito discretamente - estava quantizada (embora não fosse quântica!). Se a curva, na Figura B-la, for muito íngreme, sua largura se torna estreita e o tempo de transmissão de um estado para o outro é muito curto. Isso implica que, “dentro dos valores numéricos do modelo de Tuszynski, “[...] as excitações de encrespamento não podem se propagar (sozinhas) por longas distâncias, qualquer que seja o valor (plausível) do campo elétrico. [...] Elas apenas se movem em fim-ção de flutuações externas. [...] O movimento apresenta um caráter ativado, mostrando saltos nítidos entre um estado conformacional preferido e outro”.⁶

Em outras palavras, a agitação aleatória induzida pela temperatura e associada com o tunelamento eletrônico ordenado é requerida para a propagação. Não haveria limites nem ondas em movimento, a não ser que houvesse a quantidade exata de movimentação termalmente induzida. Se for muito pouca, a coisa toda “congela” no lugar em que se encontra. Se for demais, as moléculas de tubulina modificariam seus formatos aleatoriamente - como um pedaço de ferro desmagnetado pela ação do calor. As moléculas de tubulina se adaptaram a seu “nicho ecológico”, tirando vantagem das condições dentro das quais existem, a fim de utilizar o tunelamento eletrônico para propósitos de sinalização.

Entretanto, se houvesse somente a quantidade exata de calor, os microtúbulos poderiam transportar sinais, mas ainda não iriam necessariamente computar. Seriam como ferromagnetos, mas não se tornariam vidros rotativos, que são uma mistura de domínios ferromagnéticos e antiferromagnéticos apresentando uma imensa quantidade de “frustração”. Nesse caso, os microtúbulos não ficariam suficientemente frustrados. Seriam conectores de sinais intracelulares, assim dizendo, mas não seriam verdadeiros neurônios. Nos vidros rotativos genuínos, a frustração é criada por partículas ferromagnéticas e antiferromagnéticas fisicamente misturadas a fim de criar uma substância “composta” de granulação muito fina. Não existe nada de similar nos microtúbulos.

Mas Tuszynski descobriu que havia de fato *duas fontes principais* para a ativação externa necessária: uma era o calor, conforme já mencionado; a outra era puramente mecânica. Em outras palavras, a tensão externa (empurrões, puxões ou retorcidas) sobre o conjunto poderia também levar um encrespamento a se propagar. Nesse caso, o microtúbulo estaria agindo como um transdutor de sinais e como um transdutor de energia - como se deveria esperar, devido à sua natureza, recentemente confirmado por Donald Ingber e Andrew Maniotis em seu estudo notavelmente referencial.⁷ Uma vez que as forças podem ser transmitidas de uma parte da célula para outra, o oposto poderia ser realizado com a mesma facilidade e do mesmo modo. A chegada de uma onda conformacional viajante poderia ser o suficiente para desencadear uma modificação mecânica na célula - dando origem a um movimento da célula ou de algumas de suas partes. Além disso, modificações mecânicas poderiam, de forma semelhante, causar mudanças no estado elétrico do microtúbulo, um fenômeno conhecido como piezoelectricidade - a mesma fonte que energiza essas musiquinhas esganiçadas e aborrecidas que são inseridas nos cartões “musicais” de saudações e nos guardanapos individuais colocados como proteção sobre a toalha, que falam com a voz de Barney Rubble (conhecido personagem do desenho *Os Flintstones*).

É claro que esses efeitos não se reúnem em lugar algum de forma mais perfeita do que no interior do quarto cérebro humano. Os potenciais de ação nos neurônios geram um campo elétrico que influencia a propagação de sinais nos microtúbulos. Esses sinais, por sua vez, afetam diretamente as extensões físicas dos axônios e dendritos, que conformam a rede neural do cérebro. Além disso, a transferência de um sinal nervoso de um neurônio para outro requer a liberação de neurotransmissores químicos desde a ponta final do axônio transmissor até a ponta inicial de um dendrito receptor (esse encontro é conhecido como uma “sinapse”). A liberação envolve o movimento físico de uma vesícula contentora do neurotransmissor, desde o interior da ponta final do axônio até a sua superfície. Essa função de transporte físico é provavelmente realizada - em harmonia surpreendente de estrutura e função - pela ponta de uma rede de microtúbulos que corre ao longo do axônio desde o interior do corpo da célula.⁸ Dessa maneira, o potencial computacional adaptativo da rede microtubular e suas proteínas associadas implementaria o mecanismo da aprendizagem hebbiana anteriormente descrita, crucial para a auto-organização da inteligência nas redes neurais.⁹

Todavia, os microtúbulos são encontrados em todas as células do corpo - de fato, em cada célula de cada criatura viva. Parece estranho que devam ser estruturados assim apenas para satisfazer tão perfeitamente os requisitos exclusivos de um sistema de processamento tão extraordinariamente complexo quanto o quarto cérebro dos seres humanos. Seguramente a evolução não poderia ter previsto essas aplicações quando causou o surgimento dos primeiros axonemas sobre a superfície da Terra, ainda naqueles organismos unicelulares primitivos de 4 bilhões de anos atrás. Mas, finalmente, descobriu-se que a tubulina que compõe os microtúbulos humanos é diferente da tubulina de qualquer outra criatura viva; e mais ainda: a tubulina existente no sistema nervoso humano é diferente da tubulina que compõe os microtúbulos em todas as demais partes do corpo e que, além disso, a tubulina que se encontra nos dendritos e axônios também difere da tubulina encontrada nos corpos das células neuronais. Isso significa que os microtúbulos neuronais estão adaptados para as respectivas funções que cada um deles deve exercer.

Em geral, os microtúbulos são estruturas instáveis: são capazes de montar a si mesmos e, então, *desmontar-se* em um ciclo que há muito tempo vem sendo objeto da fascinação confusa dos biólogos e físicos que não conseguem compreendê-lo. (Esse ciclo de montagem-desmontagem apresenta muitas características em comum com outras oscilações químicas, o que, aliás, a esta altura, já deveríamos esperar.) Se sua função fosse exclusivamente esquelética, poderia ser o meio através do qual a flexibilidade adaptativa poderia ser

introduzida no arcabouço suportador de uma estrutura tão pequena como uma célula. Mas, nos neurônios, se esperarmos que as redes de microtúbulos funcionem como propagadoras de sinais, sem falar em elementos computacionais, deveriam ser muito mais estáveis - o que, de fato, são. Após sua automontagem, os microtúbulos *neuronaís* passam por um processo de estabilização que é exclusivo desse tipo de estrutura.

Além do mais, a composição física dos neurônios é distinta de todas as demais células porque possui extrusões que podem ter até um metro de comprimento (por exemplo, nos axônios motores dos neurônios). Os microtúbulos encontrados nestes axônios são fantasticamente mais longos do que os que se encontram em quaisquer outras partes - chegam a ter um centímetro de comprimento e são compostos por cerca de 100 mil moléculas de tubulina - aproximadamente 2 bilhões de átomos.¹⁰ Levando em consideração o seu diâmetro (2,5 nanômetros = $2,5 \times 10^{-9}$ metros), são o equivalente a um único cabo de 13 milímetros de diâmetro com 21 quilômetros de comprimento, e com o intuito de conseguirem desenvolver essa extensão via automontagem, teriam de ter de uma estabilidade fora do comum.

Tubular!

Vamos considerar uma coisa cintilantemente óbvia a respeito dos microtúbulos: eles são *tubos*.

A partir do entendimento da computação, a maioria das estruturas que examinamos é de ou arranjos sólidos (por exemplo, o cérebro do autômato celular tridimensional e capaz de auto-evolução, criado por Hugo de Garis) ou (na sua maioria) de arranjos planares (redes neurais, autômatos celulares, chapas ferromagnéticas, vidros rotativos). Segundo determinado ponto de vista, um tubo é, ao mesmo tempo, bidimensional e tridimensional. Desenrolado, torna-se bidimensional, mas uma de suas duas dimensões planares é, distinta: a dimensão ao redor da qual o tubo se curva quando em terceira dimensão. Além disso, uma vez que o tubo se enrosca em três dimensões, toma os dois limites transversais de uma estrutura plana e acaba colando um no outro, de forma a eliminar os dois. *O processamento, ou a sinalização ao longo de um tubo, é contínuo.* (Este aspecto é importante, como iremos ver.) Se o plano for *enviesado* e enrolado para formar um tubo (veja Figura B-3), é introduzido um viés para a frente ou para trás (como em uma hélice) e pode-se esperar que qualquer processo que ocorrer ao redor do tubo também se propague ao longo da superfície externa. Finalmente, os tubos helicoidais são “*quirais*”, isto é, dirigidos para a direita ou

para a esquerda, dependendo da direção em que foram retorcidos. As tensões mecânicas que tiverem um componente torsional serão respondidas diferentemente, dependendo se o torque aplicado se alinha ou se opõe ao retorcimento tubular.

Essas características são todas distintivas dos microtúbulos, e quais efeitos poderão ter sobre seu potencial de processamento e/ou computação não são, em absoluto, intuitivamente evidentes. Tuszynski, seus colegas da Universidade de Edmonton e seus correspondentes no exterior passaram os últimos dez anos se esforçando para extrair respostas para as questões levantadas por essas características. Os resultados são extraordinariamente interessantes, um testemunho da qualidade da percepção inicial de Tuszynski e da genialidade da natureza. Devido às características físicas exatas da molécula de tubulina e às maneiras segundo as quais se realizam as suas interações com suas vizinhas mais próximas, um arranjo tubular helicoidal sustenta tanto a sinalização como a computação em uma única estrutura. Em temperaturas fisiológicas, o arranjo de microtúbulos parece assumir características semelhantes às do vidro rotativo, porém sem sacrificar a sua capacidade de comunicação: é um sistema de comunicação que sinaliza por meio da computação, como uma espécie de internet cujos fios telefônicos e cabos externos já fossem seus próprios computadores. A maneira como tudo isso parece funcionar é realmente espantosa.

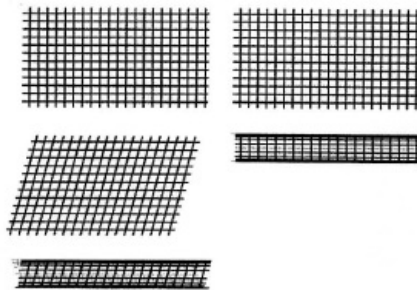


FIGURA B-3. Arranjos bidimensionais formando tubos, com ou sem viés.



FIGURA B-4. Duas conformações da molécula de tubulina, com base em qual subunidade apresenta o elétron móvel.

O formato de uma molécula de tubulina depende da posição ocupada por seu elétron móvel (que exibe a capacidade de tunelamento a longa distância), ou

seja, se ele se encontra “dentro” da subunidade α ou da subunidade β , como é exemplificado pela Figura B-4.

O polo da proteína que estiver ocupado, portanto, apresenta igualmente uma carga elétrica levemente negativa, que é contrabalançada por uma leve carga positiva da mesma intensidade no polo oposto. Esse elétron é *muito móvel* - o tunelamento é grandemente favorecido pela estrutura específica da molécula de tubulina, pelas temperaturas fisiológicas e, talvez, por outras características ainda por identificar de seu “nicho biológico” -, o que faz com que troque de um bolso para o outro com a maior presteza. A tubulina responde, modificando sua conformação com espantosa velocidade.

Conforme foi mencionado anteriormente, devido à mudança conformacional causada pela troca da posição do elétron, os dois estados de dipolos opostos não são imagens especulares um do outro. A direção espacial real (polo positivo com relação ao polo negativo) de um dipolo α (uma molécula de tubulina com o elétron na subunidade α) não é o oposto preciso de um dipolo β (ou seja, a molécula de tubulina que apresenta o elétron na subunidade β) — tem um desvio de 29° com relação à vertical. A região ocupada por cada dipolo é hexagonal, devido à forma segundo a qual as moléculas de tubulina se encaixam. Mas acontece que não estamos falando de um hexágono perfeitamente simétrico, em função do viés, que o entorta um pouco. Isso resulta em um alinhamento distinto dos dipolos com relação um ao outro, alguns atraindo e outros repelindo, mas não de uma forma que seja evidente por si mesma, como acontece nos arranjos quadrangulares de dipolos perfeitamente verticais. Quando todos esses fatores são calculados, o resultado é uma configuração distintamente favorecida (com o mínimo de energia) para as seis moléculas de tubulina que formam sua vizinhança (veja a Figura B-5, no alto). Essa configuração também é própria para permitir aos hexágonos enviesados adjacentes que se ajustem e apoiem uns aos outros consistentemente (veja a Figura B-5, embaixo).

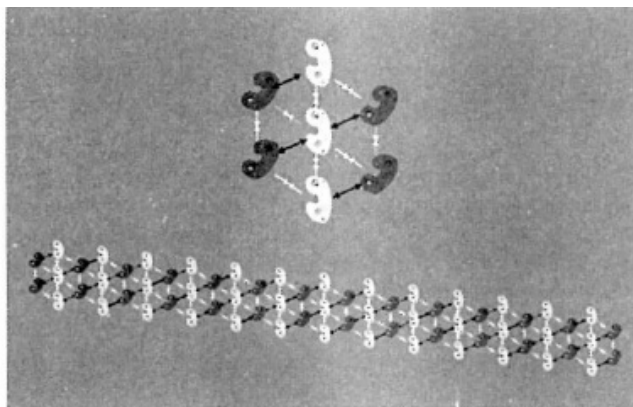


FIGURA B-5. Em cima: padrão de vizinhança favorecido pelas moléculas de tubulina. Embaixo: quando ligadas entre si, as vizinhanças formam um padrão consistente, porém com um viés diagonal. Ao serem enroladas, as pontas se tornarão inconsistentes com o restante do arranjo. A repulsão resultante é mostrada por setas negras, enquanto a atração é representada por setas brancas.

Contudo, ele também favorece uma estrutura helicoidal tripla enroscada com o perímetro de 13 dímeros. Como resultado, surge uma “costura”. Mas essa costura não é absolutamente um defeito. A costura significa que *pelo menos uma das 13 relações de vizinhança ao redor do perímetro do tubo deve ser inconsistente com um estado de baixa energia perfeito*. Ou, para descrever de forma diferente, com respeito a qualquer circuito particular ao redor do perímetro do tubo, existem 13 estados de energia igualmente baixa, e todos são os de energia mais baixa possível. A paisagem de energia apresenta, assim, 13 vales. A inconsistência dos estados em volta do perímetro da circunferência do microtúbulo (qualquer senda fechada, não importa quão complexa possa vir a ser) significa que *nesta direção existe um grau de frustração, como é definido com relação aos vidros rotativos*.

O Modelo Tuszynski sugere que, em temperaturas fisiológicas, devido aos parâmetros precisos envolvidos nos relacionamentos entre as moléculas de tubulina de uma vizinhança - e porque esses parâmetros favorecem uma circunferência de unidades ímpares (13), com hexágonos enviesados formando um tubo helicoidal -, os microtúbulos do sistema nervoso humano podem funcionar simultaneamente como *transdutores eletromecânicos de sinais (longitudinalmente) e como computadores paralelos do tipo dos vidros rotativos (circunferencialmente)*. A Figura B-6 sumariza esquematicamente essas características.

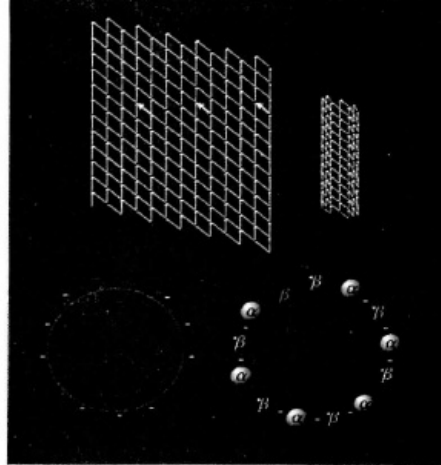


FIGURA B-6. Frustração circunferencial em um microtúbulo. No alto, à esquerda, as flechas representam forças entre os locais dos dipolos que se encontram nas intersecções da treliça. As flechas negras são repulsivas, enquanto as flechas brancas são atrativas. No alto, à direita, a mesma treliça, agora enroscada, mostra linhas helicoidais voltadas para a esquerda (em negro) ou para a direita (em branco); portanto, assimétricas. Mas a direção puramente longitudinal apresenta somente linhas brancas. As flechas brancas e negras ilustram uma seqüência com forças dipolares de energia mínima atrativa (+) e repulsiva (-). Ao ser enroscadas para formar o tubo, formarão um círculo fechado de forças aplicadas vizinho a vizinho. Embaixo, à esquerda, o mesmo arranjo de forças dipolares de energia mínima atrativa (+) e repulsiva (-) é mostrado formando um círculo fechado – mas que dá origem à frustração, porque nenhum arranjo é perfeitamente consistente. Embaixo, à direita, o arranjo de estados das moléculas de tubulina que corresponderia à estrutura da treliça frustrada e ao caminho circular fechado em particular, como foi indicado previamente.

APENDICE C

coerência e decoerência

Na experiência da fenda dupla, uma única partícula está, até certo ponto, “interferindo consigo”. Uma vez que essa partícula é, ao mesmo tempo, uma onda, suas “partes” têm a mesma fonte e a mesma energia em “sincronia”, como duas ondas produzidas a partir de uma por meio de uma barreira de fenda dupla em um tanque de água. Não apenas as “partes” têm a mesma velocidade e o mesmo comprimento de onda: elas se encontram “em fase”. Assim, quando uma está no pico, a outra também está. Entretanto, isto não é inteiramente lógico. Afinal, um padrão é reconhecível como interferência somente depois de muitas tentativas. Assim, em certo sentido, as ondas subjacentes pertencem a todas as partículas ao mesmo tempo. Portanto, mesmo a primeira pode mostrar evidência da presença das ondas. Em resumo: não somente as partículas também são ondas como uma única partícula também pode ser muitas partículas.

Agora, o padrão específico de interferência causado por duas (ou mais) ondas em superposição irá depender daquilo que é chamado sua “fase relativa”. Se duas ondas do mesmo comprimento de onda estiverem perfeitamente “fasadas” - os picos alinhados com os picos e os vales com os vales -, a superposição consistirá em uma onda com o mesmo comprimento de onda que suas duas componentes, mas com picos com o dobro da altura e vales com o dobro da profundidade dos apresentados pelas originais. Mas, se duas dessas ondas estiverem perfeitamente “defasadas”, os picos alinhados com os vales e os vales alinhados com os picos, significa que a superposição consistirá de nada - porque as ondas se cancelarão mutuamente. No entanto, se as ondas não estiverem nem perfeitamente fasadas, nem perfeitamente defasadas, as alturas e profundidades de sua combinação poderão se localizar em qualquer ponto intermediário entre elas, dependendo do chamado “ângulo de fase” entre elas. (E chamado assim porque os comprimentos de onda são frequentemente medidos em unidades de 2π , do mesmo modo que os ângulos.)

A Figura C-1 mostra três ondas do mesmo comprimento de onda (mas de alturas e profundidades diferentes, de modo que possam ser identificadas), perfeitamente fasadas.

A Figura C-2 mostra ondas com as mesmas alturas e profundidades, mas em três fases diferentes. A maior parte delas é cancelada.

Os mesmos princípios valem para ondas em duas (ou três) dimensões e de formas variadas. A Figura C-3a mostra uma onda radial emanando de uma fonte pontual. A Figura C-3b mostra o que vemos quando *cinco* ondas idênticas são superpostas em fase. A Figura C-3c mostra as mesmas cinco ondas, porém todas fora de fase.

Naturalmente, quando ondas superpostas não são idênticas, seus padrões de interferência são mais complicados.

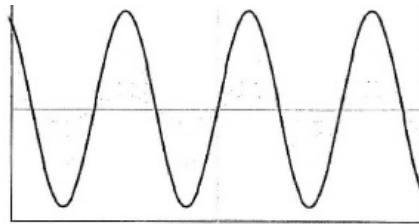


FIGURA C-1. Três ondas fasadas se combinam para formar uma única onda de amplitude maior. As três ondas são mostradas como linhas em cinza-claro colocadas umas sobre as outras, porém não somadas. A linha negra mostra as mesmas três ondas, agora somadas para formar uma única onda.

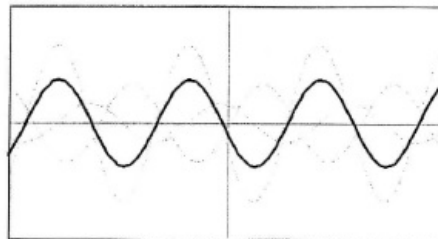


FIGURA C-2. As mesmas três ondas da Figura C-1, mas agora defasadas.

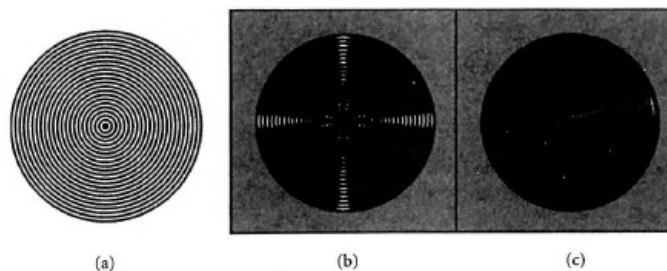


FIGURA C-3. Destruição da interferência pelas diferenças de fase. (a) Uma onda radial. (b) Cinco ondas radiais idênticas, superpostas em fase (fasadas). (c) Cinco ondas radiais idênticas, superpostas fora de fase (defasadas).

Coerência

Mais importante no mundo dos efeitos quânticos é o fato de que as amplitudes de probabilidade quântica não são padrões estáticos: mudam no

decorrer do tempo, e essas mudanças não são absolutamente o que poderíamos esperar. Por exemplo, vamos supor que olhemos para o padrão de ondas de um elétron livre (com massa conhecida e fixa), do qual sabemos possuir certa gama estreita de localizações possíveis e certa gama complementar também estreita de possíveis "momentos". Vamos ainda supor que o produto dessas duas amplitudes - sua *incerteza* - seja o mínimo fisicamente permissível. E, além disso, que as distribuições tanto dos momentos como das posições formem uma curva em formato de sino - uma distribuição bastante comum nos sistemas naturais. Colocamos nosso elétron em um ambiente perfeitamente isolado e o deixamos em paz por algum tempo.

A intuição sugere que, uma vez que o elétron foi deixado em paz, sem ser perturbado, quando retornarmos a ele, sua rede terá o mesmo formato. Só que não ocorre assim. Mesmo uma distribuição de probabilidades tão simples como essa se modificará *espontaneamente* no decorrer do tempo. Uma curva de Gauss (em formato de sino) não é uma formação perfeitamente *coerente*; como a linha da cintura, progressivamente se vai engrossando sozinha e sem qualquer influência.

Há, entretanto, determinadas ondas quânticas muito importantes (denominadas *eigenfunctions*) que não modificam seu formato com o transcurso do tempo. Como as ondas permanentes em uma corda afinada de violino - a nota fundamental ou seus subtons cada pico e cada vale da onda simplesmente cresce ou encolhe

com o tempo. A onda permanecerá sempre com o mesmo formato, mas sua escala vertical varia entre seu máximo positivo e seu mínimo negativo. Na metade da distância entre cada ciclo ascendente e descendente, ela dá a impressão de ser sua própria imagem especular. Esse tipo de mudança não apresenta *absolutamente qualquer efeito sobre o mundo físico*. As probabilidades que produz para descobrir a partícula em qualquer lugar é o quadrado da altura ou da profundidade *relativas*, e esse nunca muda, mesmo que as amplitudes de probabilidade subjacentes apresentem ciclos no tempo. Por altura ou profundidade *relativas* queremos dizer simplesmente que, sejam quais forem as amplitudes de probabilidade, são proporcionalmente reescaladas, de maneira que a soma de seus quadrados, ou seja, a soma de todas as probabilidades possíveis, permanece sempre igual a 1.

Cada valor discreto de energia quantizada em qualquer sistema quântico possui seu próprio padrão estável, *porém com seu próprio ritmo exclusivo de subidas e descidas*. Portanto, quando mais de um desses padrões se superpõe, os movimentos de subida e descida, combinados em *ritmos diferentes*, levam a

onda combinada a não mais manter valores relativos fixos em cada ponto. As probabilidades de encontrá-la em uma determinada localização irão, portanto, variar com o tempo. A curva de Gauss resultante é um exemplo típico dessa combinação de *eigenfunctions*, cujo formato geral continuamente se modifica.

Ora, é possível construir essas ondas combinadas de forma que ambas mantenham seus formatos para sempre, *mas se movam no espaço*. Essas ondas viajantes combinadas são chamadas “coerentes”. Porém, criar uma função de onda coerente para um grande número de partículas é, como você bem pode imaginar, extremamente difícil.

A seguir, apresentamos um extraordinário exemplo de coerência e de como é difícil mantê-la. Na experiência realizada em 1967, por R. L. Pfleegor e L. Mandei,¹ duas fontes de fótons produzidas por *lasers* separados e com igual comprimento de onda foram dirigidas para um mesmo alvo, porém um pouco desviadas para dentro, de maneira a provocar sua intersecção. *Não foram colocadas quaisquer barreiras*. Pfleegor e Mandei ajustaram os dois *lasers* separados até que os dois apresentassem a mesma fase (como afinar duas cordas de um violão até produzirem exatamente a mesma nota), mas só conseguiram mantê-los perfeitamente afinados um em relação ao outro por 20 milionésimos de segundo, o que demonstra como isso é difícil de ser feito. Quando os *lasers* entraram assim em fase, um padrão de interferência uniforme apareceu na tela por detrás de seu ponto de intersecção. As ondas de luz superpostas e em movimento dos dois *lasers* formaram um único feixe coerente.

Então, reduziram a intensidade de ambos os *lasers* até que não mais de um fóton de cada vez, *no total*, fosse emitido - talvez de um dos *lasers*, talvez do outro. Mas, mesmo que a sintonia dos *lasers* deixasse coerentes quaisquer fótons *potenciais* um padrão de interferência ainda aparecia durante a janela de oportunidade de 20 microssegundos. “O único quantum”, em outras palavras, “*estava sendo co-produzido em ambos os lasers diferentes*” porque “a teoria quântica sequer traz dentro de si mesma a noção de que cada fóton pudesse ser produzido por um dos *lasers* em particular.”² Mais do que isso, não existe absolutamente qualquer limite para a distância em que os dois *lasers* possam se encontrar um do outro.

O experimento Pfleegor-Mandel não apenas ilustra a centralidade da coerência da mecânica quântica, mas também é um exemplo de como os fenômenos quânticos mais estranhos emergem somente quando muitas partículas formam um todo superposto e coerente. Além disso, os fenômenos quânticos mais úteis, incluindo as surpreendentemente poderosas capacidades computacionais que apresentam, emergem apenas quando superposições

coerentes podem ser produzidas e mantidas por um período (relativamente) longo.

Criar uma superposição coerente entre poucos fótons de luz, com seus comprimentos de onda relativamente longos, requer feitos extraordinários de inteligência, deliberação e engenharia, tudo sendo construído sobre uma acumulação de conhecimentos que cresce sem parar - equivalente, pelo menos, à mesma coleta de informações realizada durante os 10 mil anos conhecidos da história humana. Criar uma superposição coerente entre as ondas da matéria que nos envolve na vida cotidiana, composta por bilhões de *quanta*, cujos comprimentos de onda são inacreditavelmente curtos, é uma façanha além das possibilidades de qualquer voo da imaginação, salvo em circunstâncias excepcionais. Ondas coerentes da matéria foram produzidas em laboratório somente durante os últimos cinco anos. Portanto, quase nunca vemos efeitos da interferência quântica na escala da vida diária e, conseqüentemente, nenhuma das estranhezas quânticas associadas com amplitudes de probabilidades interferindo umas com as outras. O que destrói o comportamento quântico nas escalas da vida diária é a decoerência:

[...] a dificuldade mais preocupante [...] é [...] o problema das *interferências macroscópicas* (comportamento quântico na escala cotidiana), que são [...] previstas [...], mas praticamente nunca observadas. [...] Foi esse problema que conduziu à ideia da decoerência, o que é certamente a descoberta mais importante das interpretações quânticas modernas.

A decoerência [...] não é [...] uma determinada propriedade intrínseca da natureza, mas antes um efeito dinâmico que requer algum tempo, antes de se tornar efetivo. Mas quanto tempo será necessário? [...]³

E por quê? As respostas são: [...] Um tempo muito curto. [...] O efeito é muito eficiente e algumas [...] moléculas [...] ou então alguns fótons [...] podem produzir uma decoerência significativa [...] ou então, alguns *fônons* (vibrações viajantes) produzidos através da fricção ou pela interação de uns poucos elétrons. [...] As funções ondulatórias de um objeto macroscópico são extremamente sensíveis, e as interferências macroscópicas não são, portanto, observadas nunca, salvo sob condições muito especiais. [...]

A decoerência certamente é o efeito mais eficiente e rápido a existir na física macroscópica. Quando este fato simples e básico foi reconhecido, finalmente obtivemos a chave para o problema. [...] da ausência das superposições macroscópicas.⁴

A rápida destruição da interferência quântica por uma minúscula quantidade de intrusão estranha provinda do ambiente - a mais leve vibração provocada pelo calor, mesmo pelo calor *interno* de uma molécula, ou um par de elétrons incidentalmente tunelados - torna impossível que imensos conjuntos de matéria à temperatura ambiente possam sustentar um estado coerente durante períodos de tempo significativos. Para que os efeitos quânticos tornem sua presença conhecida de algum modo dentro de sistemas tão complexos - e tão quentes - quanto a matéria viva, a agitação ambiental pode, de algum modo, ajudar, sem prejudicá-los.

NOTAS

Introdução

1. *Apud* WEINBERG, S. *Dreams of a final theory*. New York: Pantheon Books, 1992. p. 255.
2. WEINBERG, S. *The first three minutes: a modern view of the origin of the universe*. New York: Basic Books, 1997. p. 154.
3. *Apud* WEINBERG, S. *Dreams of a final theory*. New York: Pantheon Books, 1992. p. 256.
4. PAIS, Abraham. *Niels Bohr's times in physics, philosophy, and politics*. Oxford Clarendon Press, 1991. p. 299; PAULI, W., ROSENFELD, L. & WEISSKOPF, V. (Eds.). *Niels Bohr and the development of physics*. New York: McGrawHill, 1955. p. 349.
5. FEYNMAN, R. *The character of physical law*. New York: Modern Library, 1999. p. 9.

Capítulo 1

1. GARDNER, M. *The unexpected hanging and other mathematical diversions: a classic collection of puzzles and games from Scientific American*. 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 1991. Em 1961, Donald Michie, um biólogo (que não era cientista da computação), na Universidade de Edinburgh, inventou um dispositivo que aprendia sozinho a jogar o Jogo da Velha. MENACE, máquina educável para o Jogo dos Zeros e Cruzes em caixas de fósforos [*Matchbox Educable Naughts and Crosses Engine*], como ele o denominou, era constituído por 300 caixas de fósforos. Gardner declaradamente baseou o seu jogo de Hexapawn na estrutura de MENACE.
2. *Ibidem*.

Capítulo 2

1. MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, n. 5, p. 115-133, 1943.
2. HEBB, D. O. *The organization of behavior: a neuropsychological theory*.

New York: Wiley, 1949.

3. ROSENBLATT, E. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, n. 65, p. 386-408, 1958; ROSENBLATT, E. *On the convergence of reinforcement procedures in simple Perceptrons*. Buffalo, New York: Cornell Aeronautical Laboratory, 1960; ROSENBLATT, E. Perceptron simulation experiments. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, n. 48, p. 301-309, 1960; ROSENBLATT, E. *Principles of neurodynamics*. Washington, DC: Spartan Books, 1962.

4. MCCORDUCK, P. *Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979. p. 87-88.

5. *Ibidem*.

6. *Ibidem*.

7. VON NEUMANN, J. The general and logical theory of automata. In: JEFFRESS, L. A. (Ed.). *Cerebral mechanisms in behavior*. New York: Wiley, 1951.

8. *Apud* MCCORDUCK, R, *op. cit.*

9. *Ibidem*, p. 88.

Capítulo 3

1 . MCCORDUCK, P. *Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979. p. 88.

2. *Ibidem*, p. 87.

3. *Ibidem*, p. 86.

4. MINSKY, M. & PAPERT, S. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*. Cambridge, MA: MIT Press, 1969. p. 4.

5. ANDERSON, J. A. & ROSENFELD, E. (Eds). *Talking nets: an oral history of neural networks*. Cambridge, MA: Bradford Books, MIT Press, 1998. p. 60.

6. MCCORDUCK, P, *op. cit.*

7. MINSKY, M. & PAPERT, S. *op. cit.*, p. 231-232.

8. *Apud* ANDERSON, J. A. & ROSENFELD, E. (Eds.), *op. cit.* p. 60.

9. **CHURCHLAND. P. S. & SEJNOWSKI, T. J. *The computational brain*. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1993. p. 109.**

10. TOURETZKY, D. S. & POMERLEAU, D. A. What's hidden in the

hidden layers? *Byte*, n. 14, p. 227-233, 1989.

11. Não estou analisando as afirmações controvertidas de Noam Chomsky de que a linguagem *per se* é um “sistema especialista” que herdamos “do geral para o particular”, cujas regras essencialmente são programadas de antemão. Embora sua hipótese venha parecendo cada vez mais dúbia à luz do grau de aquisição de linguagem apresentado pelos animais (e pelas redes neurais artificiais) - e mesmo admitindo que Chomsky estivesse correto -, nunca foi questionado o fato de que as crianças aprendem uma linguagem *específica* (isto é, inglês ou chinês) por meio da imitação, e de que aprimoram a utilização dela por tentativa e erro. Uma demonstração particularmente interessante de como as redes neurais avançadas adquirem a linguagem *in toto* sem uma pré-programação - e uma dissecação particularmente boa de todos os modismos da linguagem inata, desconstrucionismo e pós-modernismo -, encontra-se no artigo *On the simulation of postmodernism and mental debility using recursive transition networks* [Sobre a simulação do pós-modernismo e da debilidade mental por meio do emprego de redes de transição recursiva], de Andrew C. Bulhak, do Departamento de Ciências da Computação da Universidade de Monash, Austrália (relatório técnico 96/254, 1996). Os leitores podem obter facilmente suas próprias cópias em www.elsewhere.org/cgi/bin/postmodern. A rede gera, entre outras coisas, artigos acadêmico-literários completos, com todas as referências e notas de rodapé. Exemplo de um parágrafo:

“A sociedade é inatingível”, disse Baudrillard. Derrida empregou o termo “materialismo subsemiótico” para denotar a ponte entre as classes e a cultura. Em certo sentido, o assunto é contextualizado em um capitalismo desconstrutivista que inclui a consciência tomada como uma totalidade. A distinção de abertura/encerramento, que é um tema central da teoria da Luz Virtual, emerge novamente em *The burning chrome*.

12. G. Farmelo em *To err is human*, uma revisão do artigo *Scientific blunders*, de R. Youngson, publicado na revista *New Scientist*, em 28 de novembro de 1998.

Capítulo 4

1. WERBOS, R. *Beyond regression*, new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph.D. Dissertation. Cambridge, MA: Harvard University, 1974. Também foi provado em trabalhos de Y. LeCun, “Une procedure d’apprentissage pour réseau à seuil assymetrique”, publicado em *Cognitiva* (n. 85, p. 599-604, 1985); e de D. B. Parker, *Learning logic*, casting

the cortex of the human brain in silicon (Cambridge, MA: Center for Computational Research in Economics and Management Science, MIT, 1985).

2. RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E. & WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, n. 323, p. 533-536, 1986.

3. COLLARD, J. E. A B-P ANN commodity trader. In: LIPPMAN, R. R; MOODY, J. E. & TOURETZKY, D. S. (Eds.). *Advances in neural information processing systems*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1991. p. 551-556.

4. SEJNOWSKI, T. J. & ROSENBERG, C. R. Parallel networks that learn to pronounce english text. *Complex Systems*, n. 1, p. 145-168, 1987.

5. STANLEY, J. *Introduction to neural networks*. 2. ed. Sierra Madre, CA: Scientific Software, 1988. p. 123, 126.

Capítulo 5

1. KOHONEN, Teuvo. *Self-organizing maps*. 2. ed. New York: SpringerVerlag, 1997. p. 63.

2. ANDERSON, J. A. & ROSENFELD, E. (Eds.). *Talking nets: an oral history of neural networks*. Cambridge, MA: Bradford Books, MIT Press, 1998. p. 156, 157.

3. LASKOSKI, G. M. Addressing scaling and plasticity problems with a biologically motivated self-organizing network. *International Joint Conference on Neural Networks*, San Diego, CA: IEEE, 1990.

4. COTTRELL, M.; FORTJ. C. & PAGES, G. *Technical report*. Paris: **Universidade de Paris, 1994**; KOHONEN, Teuvo, *op. cit.*, p. IX.

Capítulo 6

1. HOPFIELD, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, n. 79, p. 2.554-2.558, 1982.

2. COWANS, Jack. Apud ANDERSON, J. A. & ROSENFELD, E. (Eds.). *Talking nets: an oral history of neural networks*. Cambridge, MA: Bradford Books, MIT Press, 1998. p. 113.

3. ARISTOTLE. *On Poetics (De Poética)* In: HUTCHINS, R. M. (Ed.). *Great books of the western world*. Chicago: University of Chicago Press, 1952. p. 1.458b. v. 9. [ARISTÓTELES. *Poética*. São Paulo: Nova Cultural, 2000. (Os Pensadores, v. 4)]

4. *Apud* SYKES, C. (Ed.). *No ordinary genius*. New York: W. W. Norton & Company, 1994. p. 18-19.
5. HOFFMANN, P. *The man who only loved numbers: the story of Paul Erdos and the search for mathematical truth*. New York: Hyperion, 1998. p. 7.
6. JUNG, C. G. *The psychology of dementia praecox*. New York and Washington: Nervous and Mental Disease Publishing Company, 1936. p. 104.
7. JAMISON, K. R. *An unquiet mind*. New York: Knopf, 1996. p. 4-6.
8. HOPPENSTEADT, F. C. 8c IZHIKEVICH, E. M. Weakly connected neural networks. MARSDEN, J. E.; SI-ROVICH, L. & JOHN, F. (Eds.). *Applied mathematical sciences*. New York: Springer, 1997. v. 126. HOPPENSTEADT, F. C. & IZHIKEVICH, E. M. Oscillatory neurocomputers with dynamic connectivity. *Physical Review Letters*, n. 82, v. 14, p. 2.983-2.986, 1999. HOPPENSTEADT, F. C. 8c IZHIKEVICH, E. M. Canonical models in mathematical neuroscience. *Documenta Mathematica*, n. 3, p. 593-599, 1998.

Capítulo 7

1. *Apud* HALMOS, P. R. The legend of John von Neumann. *American Mathematical Monthly*, n. 80, p. 382-394, 1973.
2. WIGNER, E. *The recollections of Eugene P. Wigner as told to Andrew Szanton*. New York: Plenum, 1992.
3. VON NEUMANN, N. A. *John von Neumann: as seen by his brother*. Meadowbrook, Pennsylvania: Private Printing, 1987.
4. VON NEUMANN, J. *Mathematical foundation of quantum mechanics*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1996.
5. VAN HOVE, L. Von Neumann's contributions to quantum theory. *Bulletin of the American Mathematical Society*, n. 64, p. 95-99, 1958.
6. TOFFOLI, T. 8c MARGOLUS, N. *Cellular automata machines: a new environment for modeling*. 4 ed. Series in Scientific Computation (D. Gannon, editor). Cambridge, MA: MIT Press, 1989. p. 9.
7. *Ibidem*.
8. *Ibidem*.
9. Veja www-swiss.ai.mit.Edu/~switz/amorphous/index.html.
10. MAGNASCO, M. O. Chemical kinetics is Turing universal. *Physical Review Letters*, v. 78, n. 6, p. 1.1901.193, 1997. Ver também GILMAN, A. 8c ROSS, J. Genetic-algorithm selection of a regulator structure that directs flux in a simple metabolic model. *Biophysical Journal*, n. 69, p. 1.321, 1995. HANSEN,

N. E. 8c ROSS, J. Lyapunov functions and relative stability in reaction-diffusion systems with multiple stationary states. *Journal of Physical Chemistry*, n. 100, p. 8.040, 1996. HUNG, Y.; SCHREIBER, I. 8c ROSS, J. Categorization of some oscillatory enzymatic reactions. *Journal of Physical Chemistry*, n. 100, p. 8.556, 1996. LAPLANTE, J. P. *et al.* Experiments on pattern recognition by chemical kinetics. *Journal of Physical Chemistry*, n. 99, p. 10.063, 1995. ROSS, J.; ARKIN, A. P. 8c MUELLER, S. C. Experimental evidence for Turing structures. *Journal of Physical Chemistry*, n. 99, p. 10.417, 1995. ROSS, J.; MUELLER, S. C. 8c VIDAL, C. Chemical waves. *Science*, n. 240, p. 460-465, 1988.

11. SEGEV, R. 8c BEN-JACOB, E. From neurons to brain: adaptive self-wiring of neurons. *Journal of Complex Systems*, n. 1, p. 67-78, 1998.

12. BARINAGA, M. New leads to brain neuron regeneration. *Science*, n. 282, p. 1.018-1.019, 1998. FLORENCE, S. L.; TAUB, H. B. 8c KAAS, J. H. Large-scale sprouting of cortical connections after peripheral injury in adult macaque monkeys. *Science*, n. 282, p. 1.117-1.121, 1998; GAGE, F. Brain repair. *New Scientist*, n. 160, p. 29, 1998. LOWENSTEIN, D. H. 8c PARENT, J. M. Brain, heal thyself. *Science*, n. 283, p. 1.126-1.127, 1998. RAKIC, P. Young neurons for old brains? *Nature Neuroscience*, v. L, n. 8, p. 645-647, 1998.

Capitulo 8

1. LANGTON, C. G. Self-reproduction in cellular automata. *Physica D*, n. 10, p. 135-144, 1984.

2. KOZA, J. R. *Genetic programming: a paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. Palo Alto, CA: Stanford University, 1990; KOZA, J. R. *Genetic programming*. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

3. *Apud* TAUBES, G. Computer design meets Darwin. *Science*, n. 277, p. 1.931-1.932, 1997.

4. *Idem.*

5. *Apud* DAVIDSON, C. Creatures from primordial silicon. *New Scientist*, n. 156, p. 30-34, 1997.

6. *Ibidem.*

7. *Ibidem.*

8. foobar.starlab.net/~degaris/

Capitulo 9

1. MONOD, J. *Beyond chance and necessity*. London: The Cornerstone Press,

1974.

2. WENZEL, W. & HAMACHER, K. Stochastic tunneling approach for global minimization of complex potential energy landscapes. *Physical Review Letters*, v. 82, n. 15, p. 3.003-3.007,1999.

3. BROOKE, J. *et al.* Quantum annealing of a disordered magnet. *Science*, n. 284, p. 779-781,1999.

Capítulo 10

1. WHITAKER, A. *Einstein, Bohr and the quantum dilemma*. New York: Cambridge University Press, 1996.

2. EINSTEIN, A. *To Erwin Schrodinger*, 1928. Apud GREENSTEIN, G. & ZAJONC, A. G. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers, 1997. p. 88-89.

3. EINSTEIN, A. *To the Nobel Prize Committee*. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997. p. 590.

4. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997.

5. EINSTEIN, A. *To the Nobel Prize Committee*. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997. p. 591.

6. EINSTEIN, A. *Autobiographical notes*. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997.

7. EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review Letters*, n. 47, p. 777-780,1935.

8. EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. 8c ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review Letters*, n. 47, p. 777-780,1935.

9. ROZENTHAL, S. *Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues*. Amsterdam: North-Holland, 1967. p. 128-129. Apud GREENSTEIN, G. 8c ZAJONC, A. G. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers, 1997. p. 108-109.

10. GREENSTEIN, G. 8c ZAJONC, A. G. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers, 1997. p. 108.

11. ZOHAR, D. *The quantum self: human nature and consciousness defined*

by the new physics. New York: William Morrow, 1990.

12. ANDERSON, P. W. More is different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*, n. 177, p. 393-396, 1972.

13. MERMIN, D. N. Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, p. 38-47, 1985.

Capítulo 11

1. FEYNMAN, R.; LEIGHTON, P. R. B. & SANDS, M. *The Feynman lectures on physics*, v. 3. New York: Addison-Wesley, 1965. p. 1-1. (Edited by P. R. B. Leighton).

2. FEYNMAN, R. *The character of physical law*. New York: Modern Library, 1965. p. 123.

3. BORN, M. On the quantum mechanics of impact processes. *Zeitschrift für Physik*, n. 37, p. 863, 1926.

4. EINSTEIN, A. Strahlungsemission und Absorption nach der Quantumtheorie. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, n. 18, p. 318-323, 1916.

5. Dito popular atribuído a Ernest Rutherford.

6. FEYNMAN, R.; LEIGHTON, P. R. B. & SANDS, M. *The Feynman lectures on physics*, v. 3. New York: Addison-Wesley, 1965. p. 1-1. (Edited by P. R. B. Leighton).

7. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997. p. 574. Ver também EINSTEIN, A. *Ueber der gegenwaertigen Stand der Feldtheorie*. In: *Festschrift für A. Stodola*. Zürich, 1929.

8. Apud FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997. p. 583.

9. BORN, M. On the quantum mechanics of impact processes. *Zeitschrift für Physik*, n. 37, p. 864, 1926. BORN, M. The statistical interpretation of quantum mechanics. *Nobel Lectures, Physics*, n. 3, p. 318, 1954.

Capítulo 12

1. MONROE, C. *et al.* A “Schroedinger Cat” superposition state of an atom. *Science*, n. 272, p. 1.131-1.135,

1996.

2. OMNÉS, R. The interpretation of quantum mechanics. In: ANDERSON, Philip W.; WIGHTMAN, Arthur

S. & TREIMAN, Sam B. (Eds.). *Princeton Series in Physics*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1994. v. 22. p. 159.

3. BORN, M. On the quantum mechanics of impact processes. *Zeitschrift for Physik*, n. 37, p. 864, 1926. *Apud* FOELSING, A. *Albert Einstein: a biography*. New York: Penguin Group, 1997. p. 583.

Capítulo 13

1. ELITZUR, A. C. & VAIDMAN, L. Quantum mechanical interaction-free measurements. *Foundations of Physics*, n. 23, p. 987-997, 1993.

2. TSEGAYE, T. *et al.* Experimental demonstration of an efficient interaction-free measurement in a Fabry-Perot interferometer. *Physical Review*, A-57, p. 3.987-3.990, 1998.

3. WHITE, A. G. *et al.* "Interaction-free" imaging. *Physical Review*, A-58, p. 605-613, 1998.

4. *Apud* MATTHEWS, R. Quantum detectives. *New Scientist*, n. 58, p. 11, 1998.

5. WHITE, A. G. *et al.* "Interaction-free" imaging. *Physical Review*, A-58, p. 605-613, 1998.

6. BUCHANAN, M. Qubits go out for a spin. *New Scientist*, n. 60, p. 35, 1998. CHUANG, I. L.; GERSHEN-FELD, N. & KUBINEC, M. Experimental implementation of fast quantum searching. *Physical Review Letters*, v. 80, n. 15, p. 3.408-3.411, 1998. JONES, J. A. Fast searches with nuclear magnetic resonance computers. *Science*, n. 280, p. 229, 1998. TAUBES, G. Putting a quantum computer to work in a cup of coffee. *Science*, n. 275, p. 307-309, 1997.

7. JOSZA, R. *Quantum effects in algorithms*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1998 [a ênfase foi acrescentada]. Ver também JOSZA, R. *et al.* Universal quantum information compression. *Physical Review Letters*, v. 80, n. 8, p. 1.714-1.717, 1998.

8. JOSZA, R. *Quantum effects in algorithms*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1998.

9. BROOKS, M. Crazy logic. *New Scientist*, v. 2.132, p. 38-41, 1998. PENROSE, R. *The emperor's new mind: concerning computers, minds, and the laws of Physics*. New York: Oxford University Press, 1989. PENROSE, R. Mechanisms, microtubules, and the mind. *Journal of Consciousness Studies*, v. 1, n. 2, p. 241-249, 1994. PENROSE, R. *Shadows of the mind: a search for the missing science of consciousness*. New York: Oxford University Press, 1994.

PENROSE, R. *The large, the small, and the human mind*. Edited by M. Longair. New York: Cambridge University Press, 1997; PENROSE, R. 8c HAMEROFF, S. What gaps? - Reply to Grush and Churchland. *Journal of Consciousness Studies*, v. 2, n. 2, p. 98-111, 1995.

10. Mas acontece que há um grande salto escondido aqui. Os tipos de dispositivos de auto-evolução que cientistas como Garis estão criando não terão desenvolvido capacidades computacionais quânticas sozinhos. Essas capacidades terão sido construídas no substrato a evoluir - talvez um autômato celular quântico (ver, por exemplo, C. Duerr e M. Santha, “A decision procedure for unitary linear quantum cellular automata”, quant-ph/9604007 reprints, 1997) - usando uma aplicação extraordinariamente intensa de tecnologia para preservar a coerência em larga escala. Não existe ainda evidência de que a natureza em nível intracelular tenha descoberto uma forma de fazer o mesmo.

11. www.cnn.com/TECH/science/9802/18/swiss.robot/index/html.

12. KELLEY, P. Swiss scientists warn of robot Armageddon. In: CNN Online. Available in: www.cnn.com/TECH/science/9802/18/swiss.robot/index/html>. Feb. 18, 1998.

Capítulo 14

1. PRESKILL, J. Quantum information and quantum computing. Course notes for Physics 229. California Institute of Technology, 1997. Ver <theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/#lecture>.

2. BOHR, N. *Atomic physics and human knowledge*. New York: Science Editions, 1961.

3. *Apud* MARCH, A. 8c FREEMAN, I. M. *The new world of physics*. New York: Vintage Books, 1963. p. 143.

4. PENROSE, R. *Shadows of the mind: a search for the missing science of consciousness*. New York: Oxford University Press, 1994.

5. PENROSE, R. *The emperors new mind: concerning computers, minds, and the laws of physics*. New York: Oxford University Press, 1989. p. 402

6. PENROSE, R. 8c HAMEROFF, S. What gaps? Reply to Grush and Churchland. *Journal of Consciousness Studies*, v. 2, n. 2, p. 98-111, 1995.

7. *Apud* BROCKMAN, J. *The third culture*. New York: Simon 8c Shuster/Touchstone, 1955. p. 255-256.

8. *Ibidem*, p. 257.

9. KELLMAN, M. E. comunicação pessoal, 1999. Ver também KELLMAN, M. E. Internal molecular motions. In: MOORE, J. H. 8c SPENCER, N. D.

(Eds.). *Encyclopedia of chemical physics and physical chemistry*. London: IOP, 2001.

10. HOPFIELD, J. In: SUZUKI, M. & KUBO, R. (Eds.). *Evolutionary trends in physical science*. Berlin: Springer, 1991.

11. *Apud* BROCKMAN, J. *The third culture*. New York: Simon & Schuster/Touchstone, 1955. p. 250-251 [ênfase acrescentada].

12. TERRY, R. D. The pathogenesis of Alzheimer disease: an alternative to the amyloid hypothesis. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, n. 55, p. 1.023-1.025, 1996.

13. TUSZYNSKI, J. A.; BROWN, J. A. & HAWRYLAK, R. Dielectric polarization, electrical conduction, information processing, and quantum computation in microtubules. Are they plausible? *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, n. 356, p. 1.897-1.926, 1998.

14. *Ibidem*.

15. BROWN, J. A. & TUSZYNSKI, J. A. Dipole interaction in axonal microtubules as a mechanism of signal propagation. *Physical Review*, E 56, p. 5.834-5.840, 1997. Ver também BROWN, J. A. & TUSZYNSKI, J. A. Reflections of biological signaling electronic conduction may be an important intracellular pathway. *Advances in Structural Biology*, n. 5, p. 115-125, 1998.

16. MANIOTIS A. C. *et al.* Demonstration of mechanical connections between integrins, cytoskeletal filaments, and nucleoplasm that stabilize nuclear structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, n. 94, p. 849-854, 1997.

17. GLANZ, J. Force-carrying web pervades living cell. *Science*, n. 276, p. 278, 1997.

18. CHANG, S. *et al.* Transport and turnover of microtubules in frog neurons depend on the pattern of axonal growth. *Journal of Neuroscience*, n. 18, p. 821-829, 1998.

19. VAN VACTOR, D. *Nerve cells on the go - Harvard researchers tie axon pathfinding to cytoskeleton research*. Harvard Medical School press release, 1999.

20. ADELMAN, L. M. Computing with DNA. *Scientific American*, p. 54-61, Aug. 1998. BANZHAF, W.; DITTRICH, P. & RAUBE, H. Emergent computation by catalytic reactions. In: *Proceedings of the Fourth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology*, 1995. BARKAI, N. & LEIBLER, S. Robustness in simple biochemical networks. *Nature*, n. 387, p. 913-917, 1997. BRAY, D. Protein molecules as computational elements in living cells. *Nature*, n. 376, p. 307-312, 1995. CONRAD, M. *Molecular computing*. New York:

Academic Press, 1990. p. 235-324. CONRAD, M. Molecular computing paradigms. *Computer* 25, n. 11, p. 6-9, 1992. CONRAD, M. Molecular and evolutionary computation: the tug of war between context freedom and context sensitivity. *P4*, p. 117-129, 1998. DREXLER, K. E. *Nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation*. New York: Wiley, 1992.

21. VATER, W. *et al.* Behavior of individual microtubules and microtubule bundles in electric fields. In: *Proceedings of the Sixth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology*, 1998.

22. HAMEROFF, S. R. 6c WATT, R. C. Information processing in microtubules. *Journal of Theoretical Biology*, n. 98, p. 548-561, 1982. HAMEROFF, S. R.; SMITH, S. A. 6c WATT, R. C. Automaton model of dynamic organization in microtubules. *Annals of the New York Academy of Sciences*, n. 466, p. 949-952, 1986.

23. LANGTON, C. G. *Artificial life: Santa Fe Institute studies in the science of complexity*. New York: Addison-Wesley, 1988.

24. LANGTON, C. G. Studying artificial life with cellular automata. *Physica, D* 10, n. 22, p. 120-149, 1986.

25. CACHON, P. J. 6c CACHON, M. The axopodial systems of radiolaria nassellaria. *Archiv fuer Protistenkunde*, 113, p. 80-97, 1971. SAMSONOVICH, A.; SCOTT, A. 6c HAMEROFF, S. R. Acousto-conformational transitions in cytoskeletal microtubules: implications for intracellular information processing. *Nanobiology*, n. 1, p. 457-468, 1992.

26. BROWN, J. A. 6c TUSZYNSKI, J. A. Dipole interaction in axonal microtubules as a mechanism of signal propagation. *Physical Review*, E 56, p. 5.835, 1997.

27. *Ibid.*

28. CHURCHLAND, R. S. 8c SEJNOWSKI, T. J. *The computational brain*. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1993. p. 86-87.

29. SATARIC, M. V.; TUSZYNSKI, J. A. & ZAKULA, R. B. Kinklike excitations as an energy-transfer mechanism in microtubules. *Physical Review*, E 48, p. 589-597, 1993.

30. PFAFFMAN, J. 8c CONRAD, M. Microtubule networks as a medium for adaptive information processing. In: PORTO, V. W.; SARAVANAN, N.; WAAGEN, D. & EIBEN, A. E. (Eds.). *Evolutionary programming m*. Berlin: Springer, 1988. p. 463-472. PFAFFMAN, J. & CONRAD, M. Adaptive signal processing in microtubule networks: a computer model. Conference presentation, Quantum Approaches to Consciousness, July 1999, University of Arizona, www.consciousness.arizona.edu [A ênfase se encontra no original].

Capítulo 15

1. WOLYNES, P. G. Spin glass ideas and the protein folding problem. In: STEIN, D. L. (Ed.). *Spin glasses and biology*. Singapore: World Scientific Publishing, 1992. p. 225-226.

H. *Ibidem*. AUSTIN, R. H. The spin-glass analogy in protein dynamics. In: STEIN, D. L. (Ed.). *Spin glasses and biology*. Singapore: World Scientific Publishing, 1992. p. 179-223. GIDER, S. *et al*. Classical and quantum magnetic phenomena in natural and artificial proteins. *Science*, n. 268, p. 77-80, 1995. KAWAI,; KIKUCHI, T. 8c OKAMOTO, Y. A prediction of tertiary structures of peptide by the Monte Carlo simulated annealing method. *Protein Engineering*, n. 3, p. 85-94, 1989. MOSER, C. C. *et al*. Nature of biological electron transfer. *Nature*, n. 355, p. 796-802, 1992. SHIN, J. K. & JHON, M. S. High directional Monte Carlo procedure coupled with the temperature heating and annealing method to obtain the global energy minimum structure of polypeptides and proteins. *Biopolymers*, n. 31, p. 177-185, 1991. SORNBERGER, A. *Quantum annealing*, NASA/Fermilab Astrophysics Group, Electronic Preprint, 1998. WOLYNES, P. G. Dynamic theory of processes of chemical interest in condensed matter, National Center for Supercomputing Applications, Digital Information Services, 1999.

<www.life.uiuc.edu/biophy-sics/faculty/wolynes.html>.

2. KAWAI, H.; KIKUCHI, T. 8c OKAMOTO, Y., op. cit. SHIN, J. K. & JHON, M. S., op. cit.

3. FARID, R. S.; MOSER, C. C. 8c DUTTON, P. L. Electron transfer in proteins. *Current Opinion in Structural Biology*, n. 3, p. 225, 1993.

4. GOODNO, G.; ASTINOV, V. 8c MILLER, R. J. D. Diffractive optics-based heterodyne detected grating spectroscopy: applications to the study of ultrafast protein dynamics. *Journal of Physical Chemistry*, B 103, p. 603-607, 1999.

5. STUCHEBRUKHOV, A. A. Tunneling currents in electron transfer reactions in proteins. II. Calculation of electronic superexchange matrix elements and tunneling currents using non-orthogonal basis sets. *Journal of Chemical Physics*, n. 105, p. 10.819-10.829, 1996.

6. BALABIN, I. A. 8c ONUCHIC, J. N. A new framework for electron transfer calculation - Beyond the pathways-like model. *Journal of Physical Chemistry*, B 102, p. 7.497-7.596, 1998.

7. *Ibidem*.

8. *Ibidem.*

9. OGAWA, M. Y. *et al.* Distance dependence of intramolecular electron transfer rates across oligoprolines. *Journal of Physical Chemistry*, B 97, p. 11.456-11.463, 1993. Ver também DAHIYAT, B.; MEADE, T. J. 8c MAYO, S. L. Long-range electron transfer in isolated hélices. *Inorganica Chimica Acta*, n. 242-243, p. 1-6, 1996. VASSILLAN, A. *et al.* Electron transfer across polypeptides. *Journal of the American Chemical Society*, n. 112, p. 7.278-7.286, 1990.

10. BALABIN, I. A. 8c ONUCHIC, J. N. Connection between simple models and quantum chemical models for electron-transfer tunneling matrix element calculations: a Dysons equations-based approach. *Journal of Physical Chemistry*, n. 100, p. 11.573-11.580, 1996. BERATAN, D. N.; BETTS, J. N. 8c ONUCHIC J.

N. Protein electron-transfer rates set by the bridging secondary and tertiary structures. *Science*, n. 252, p. 1.285-1.288, 1991.

11. CRUZAN, J. D. *et al.* The far-infrared vibration-rotation-tunneling spectrum of the water tetramer-d8. *Journal of Chemical Physics*, n. 105, p. 6.634, 1.996. CRUZAN, J. D. *et al.* Terahertz laser VRT spectrum of the water pentamer-d10: constraints on the bifurcation tunneling dynamics. *Chemical Physics Letters*, n. 292, p. 667-676, 1998. OLTROF, E. H. T. *et al.* Tunneling dynamics symmetry and far-infrared spectrum of the rotating water trimer. II. Calculations and experiments. *Journal of Chemical Physics*, n. 105, p. 8.051, 1996. PUGLIANO, N. 8c SAYKALLY, R. J. Measurement of quantum tunneling between chiral isomers of the cyclic water trimer. *Science*, n. 257, p. 1.937-1.940, 1992. SAYKALLY, R. J. Water clusters. In: PARKER, S. P. (Ed.). *The 1999 McGrawHill yearbook of science & technology*. New York: McGrawHill, 1999.

12. KOHEN, A. 8c KLINMAN, P. J. Enzyme catalysis: beyond classical paradigms. *Accounts of Chemical Research*, n. 31, p. 397-404, 1998.

13. BASRAN, J.; SUTCLIFFE, M. J. 8c SCRUTTON, N. S. Enzymatic h-transfer requires vibration-driven extreme tunneling. *Biochemistry*, n. 38, p. 3.218-3.222, 1999. DAIZADEH. I.; MEDVEDED, E. S. 8c STUCHEBRUKHOV, A. A. Effect of protein dynamics on biological electron transfer. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, v. 94, n. 8, p. 3.703-3.708, 1997. STUCHEBRUKHOV, A. A. Tunneling currents in electron transfer reactions.

14. DAIZADEH. I., MEDVEDED, E. S. 8c STUCHEBRUKHOV, A. A. *Effect of protein dynamics on biological electron transfer*. American Physical

Society, APS/AAPT Joint Meeting, 1998.

15. BASRAN, J.; SUTCLIFFE, M. J. 8c SCRUTTON, N. S. Enzymatic h-transfer requires vibration-driven extreme tunneling. *Biochemistry*, n. 38, p. 3.218-3.222,1999.

16. A “velocidade” com que um elétron tunela permanece enigmática - se é que o termo “velocidade” sequer pode ser mencionado aqui. O processo ou é instantâneo para “parte de sua trajetória”, que é referida como um “instânton” ou, de qualquer maneira, mais rápido do que a luz. Em 1993, Steinberg, Kwait e Chiao demonstraram que o tempo total de trânsito do tunelamento de “metade” de um fóton dividido era menor do que o gasto pela metade não-tuneladora, ou seja, realmente mais rápido do que a velocidade da luz.

17. WOLYNES, R. G. Spin glass ideas and the protein folding problem. In: STEIN, D. L. (Ed.). *Spin glasses and biology*. Singapore: World Scientific Publishing, 1992. p. 225-226.

18. WOLYNES, P. G. 8c KUKI, A. *Electron transfer paths in protein*. National Center for Supercomputing Applications, Digital Information Services, 1998.

19. AUSTIN, R. H. The spin-glass analogy in protein dynamics. In: STEIN, D. L. (Ed.). *Spin glasses and biology*. Singapore: World Scientific Publishing , 1992. p. 179-223.

20. BAHNSON, B. J. 8c KLINMAN, J. P. Hydrogen tunneling in enzyme catalysis. *Methods in Enzymology*, n. 249, p 373-397,1995. BAHNSON, B. J. *et al.* A link between protein structure and enzyme-catalyzed hydrogen tunneling. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, v. 94, n. 24, p. 12.797-12.802,

1996. BAHNSON, B. J. *et al.* Unmasking of hydrogen tunneling in the horse liver alcohol dehydrogenase by site-directed mutagenesis. *Biochemistry*, v. 32, n. 27, p. 5.503-5.507,1993. BARTL, E *et al.* The FO complex of the ATP synthase of Escherichia coli contains a proton pathway with large proton polarizability caused by collective proton fluctuation. *Biophysics*, v. 68, n. 1, p. 104-110, 1995. BARTL, E *et al.* Proton relay system in the active site of maltodextrinophosphorylase via hydrogen bonds with large proton polarizability: an FT-IR difference spectroscopy study. *European Biophysics*, v. 28, n. 3, p. 200-207, 1999. GRANT, K. L. 8c KLINMAN, J. P. Evidence that both protium and deuterium undergo significant tunneling in the reaction catalyzed by bovine serum amine oxidase. *Biochemistry*, v. 28, n. 16, p. 6.5976.605, 1989. KARSTEN, W. E.; HWANG, C. C. 8c COOK, P. F. Alpha-secondary tritium kinetic isotope effects indicate hydrogen tunneling and

coupling motion occur in the oxidation of L-malate by NAD-mali enzyme. *Biochemistry*, v. 38, n. 14, p. 4.398-4.402, 1999. KLINMAN, J. P. Quantum mechanical effects in enzyme-catalysed hydrogen transfer reactions. *Trends in Biochemical Science*, v. 12, n. 9,

Psychophysiology, n. 25, p. 419,1988. MAYER-KRESS, G. Non-linear mechanisms in the brain. *Zeitschrift für Naturforschung*, 53c, n. 7/8, p. 667-685, 1998. MAYER-KRESS, G.; BARCZYS, C. 6c FREEMAN, W. J. Attractor reconstruction from event-related multi-electrode EEG data. In: HOLDE, A. V. (Ed.). *Mathematical approaches to brain functioning diagnostics*. Hong Kong: World Scientific, 1991. MAYER-KRESS,

G. & HOLZFUSS, J. Analysis of the human electroencephalogram with methods from non-linear dynamics. In: MACKEY, M. C. (Ed.). *Proceedings of temporal disorder in human oscillatory systems*. Berlin: SpringerVerlag, 1987. p. 57-68. MAYER-KRESS, G. 6c LAYNE, S. P. Dimensionality of the human electroencephalogram. *Perspectives in Biological Dynamics and Theoretical Medicine*, n. 504, p. 62-86,1987. MAYER-KRESS, G. *et al.* Dimensional analysis of non-linear oscillations in brain, heart, and muscle. *Mathematical Biosciences*, n. 90, p. 155-182, 1988. SCHUPP, H. T. *et al.* Neurophysiologies differences between perception and imagery. *Cognitive Brain Research*, n. 2, p. 77-86,1994.

4. LILJENSTROM, H. Oscillations and associative memory: brain and model. In: COTTERILL, R. (Ed.). *Brain and mind-biology transactions of the Danish Academy of Sciences and Letters*. Copenhagen: Danish Academy of Sciences and Letters, 1994. p. 109-123. LILJENSTROM, H. Modeling the dynamics of olfactory cortex using simplified network units and realistic architecture. *International Systems Journal*, v. 2, p. 1-15, 1991. LILJENSTROM, H. 6c WU, X. Noise-enhanced performance in a cortical associative memory model. *Neural Systems*, n. 6, p. 19-29, 1995. WRIGHT, J. J. 6c LILEY, D. T. J. Dynamics of the brain at global and microscopic scales: neural networks and the EEG. *Behavior and Brain Sciences*, n. 19, p. 285-320,1996.

5. LILJENSTROM, H. Modeling the dynamics of olfactory cortex using simplified network units and realistic architecture. *International Systems Journal*, v. 2, p. 1-15, 1991. Ver também LILJENSTROM, H. 6c HASSELMO, M. Cholinergic modulation of cortical oscillatory dynamics. *Neurophysiology*, n. 74, p. 288297,1995.

6. FREEMAN, W. Chaos in the CNS: theory and practice. In: VENTRIGLIA, F. (Ed.). *Neural modeling and neural networks*. New York: Pergamon Press,

1989. p. 185-216. FREEMAN, W. J. The physiology of perception. *Scientific American!* n. 264, p. 78-85,1991.

7. LILJENSTROM, H. Modeling the dynamics of olfactory cortex using simplified network units and realistic architecture. *International Systems Journal*, v. 2, p. 1-15,1991. WILHELMSSON, T. 6c LILJENSTROM,

H. Simulating the complex dynamics of a brain structure. In: HEDMAN, E; HAMMARLUND, P. 6c OPPELSTRUP, J. (Eds.). *PDC Center for parallel computers progress report*. Stockholm: KTH, 1994. p. 24-28. WILHELMSSON, T. 6c LILJENSTROM, H. Simulating the dynamics of olfactory cortex on the **CM200**, 1994. WU, X. 6c LILJENSTROM, H. Regulating the non-linear dynamics of olfactory cortex. *Network*, n. 5, p. 47-60,1994.

8. ROSENBLUM, M. G.; PIKOVSKY, A. S. 6c KURTHS, J. Phase synchronization of chaotic oscillators. *Physical Review Letters*, v. 76, n. 11, p. 1.804-1.807,1996.

9. ALBERS, D. J. 6c SPROTT, J. C. Routes to chaos in neural networks with random weights. *International Journal of Bifurcation and Chãos*, n. 8, p. 1.463-1.478,1998.

10. HALMOS, P. R. The legend of John von Neumann. *American Mathematical Monthly*, v. 80, n. 19, p. 382394.

11. SCHEPER, T. Q; CROOK, N. ôc DOBBYN, C. Chaos as a desirable stable state of artificial neural networks. *Proceedings of the International ICSC symposium on neural computation*. Vienna: Technical University of Vienna, 1998.

12. SINHA, S. 6c DITTO, W. L. Dynamics-based computation. *Physical Review Letters*, v. 81, n. 10, p. 2.1562.159,1998.

13. MAKISHIMA, M. 6c SHIMIZU, T. Wandering motion and co-operative phenomena in a chaotic neural network. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, v. 8, n. 5, p. 891-898,1998.

14. BIRBAUMER, N.; FLOR, H.; LUTZENBERGER, W. 6c ELBERT, T. Chaos and order in the human brain. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Supplement*, n. 44, p. 450-459,1995. BIRBAUMER, N.

p. 368-373,1999. KOHEN, A. *et al.* Enzyme dynamics and hydrogen tunneling in a thermophilic alcohol dehydrogenase. *Nature*, n. 399, p. 496-499,1999. KOHEN, A.; JONSSON, T. KLINMAN, J. P. Effects of protein glycosilation on catalysis: changes in hydrogen tunneling and enthalpy of activation on the glucose oxidase reaction. *Biochemistry*, v. 36, n. 22, p. 2.603-2.611,1997.

21. BASRAN, J.; SUTCLIFFE, M. J. Sc SCRUTTON, N. S. Enzymatic h-

transfer requires vibration-driven extreme tunneling. *Biochemistry*, n. 38, p. 3.218-3.222,1999.

22. DAIZADEH, I.; MEDVEDED, E. S. Sc STUCHEBRUKHOV, A. A. *Effect of protein dynamics on biological electron transfer*. American Physical Society, APS/AAPT Joint Meeting, 1998.

23. LINKE, H. **University of New South Wales**, 1999, <www.phys.unsw.edu.au/STAFF/RESEARCH/linke.html>. LINKE, H.; SHENG, W.; LÖFGREN, A.; HONGQI XU; OMLING, P. Sc LINDELOF, P. E. **A quantum dot Ratchet: experiment and theory**. *Europhysics Letters*, v. 44, n. 3, p. 341-347,1998.

24. KOHEN, A. *et al.* Enzyme dynamics and hydrogen tunneling in a thermophilic alcohol dehydrogenase. *Nature*, n. 399, p. 496-499,1999.

25. *Ibidem*.

26. DRUKKER, K.; LEEUW, S. D. & HAMMES-SCHIFFER, S. Proton transport along water chains in an electric field. *Journal of Chemical Physics*, n. 108, p. 6.799, 1998. HAMMES-SCHIFFER, S. Multiconfigurational molecular dynamics with quantum transitions: multiple proton transfer reactions. *Journal of Chemical Physics*, n. 105, p. 2.236-2.246,1996. WALES, D. J. & WALSH, T. R. Theoretical study of the water pentamer. *Journal of Chemical Physics*, n. 105, p. 6.597,1996.

27. BERATAN, D. 8c SKOURTIS, S. Electron Transfer mechanisms. *Current Opinion in Chemical Biology*, v. 2, n. 2, p. 235-243,1998.

28. BARTON, J. *DNA-mediated electron transfer chemistry*. Pasadena, California: Institute of Technology, 1999. [A ênfase foi acrescentada.]

29. *Apud* COGHLAN, A. Electric DNA. *New Scientist*, n. 161, p. 19,1999.

30. MONAD, J. *Beyond chance and necessity*. London: The Cornerstone Press, 1974.

31. COOPER, W. G. Roles of evolution, quantum mechanics, and point mutations in the origins of cancer. *Cancer Biochemistry and Biophysics*, v. 13, n. 3, p. 147-170,1993.

32. COOPER, W. G. T4 phage evolution data in terms of a time-dependent Topal-Fresco mechanism. *Biochemical Genetics*, v. 32, n. 11-12, p. 383-395,1994.

33. CONRAD, M. Superinformation processing: the feasibility of proton superflow in the living state. In: MISHRA, R. K. (Ed.). *Molecular and biological physics of living systems*. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishing, 1990. p. 159-174.

Capítulo 16

1. FORD, J. How random is a coin toss? *Physics Today*, p. 46, 1983.
2. CAPRA, F. *The tao of physics*. 3. updated ed. Boston: Shambhala, 1991 [O *tao da física*. São Paulo: Cultrix, 1980]. MARSHALL, I. 8c ZOHAR, D. *Who's afraid of Schrödinger's cat? All the new science ideas you need to keep up with the new thinking*. New York: William Morrow & Company, 1997. WOLF, F. A. *Star wave: mind, consciousness, and quantum physics*. New York: Macmillan, 1984. ZOHAR, D. *The quantum self* human nature and consciousness defined by the new physics. New York: William Morrow & Company, 1990.
3. BIRBAUMER, N.; FLOR, H.; LUTZENBERGER, W. Sc ELBERT, T. Chaos and order in the human brain. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology Supplement*, n. 44, p. 450-459, 1955. LAYNE, S. P.; MAYER-KRESS, G. Sc HOLZFUSS, J. Problems associated with dimensional analysis of electroencephalogram data. In: MAYER-KRESS, G. (Ed.). *Dimensions and entropies in chaotic systems*. Berlin: SpringerVerlag, 1986. p. 246-256. v. 32. MAYER-KRESS, G. Non-linear dynamics, chaos, and brain signals. Perceptions of music and dimensional complexity of brain activity *International Journal of Bifurcation and Chaos*, v. 6, n. 2, p. 267-278, 1996. LAYNE, S. P.; MAYER-KRESS, G. Sc HOLZFUSS, J. Problems associated with dimensional analysis of electroencephalogram data. In: MAYER-KRESS, G. (Ed.). *Dimensions and entropies in chaotic systems*. Berlin: SpringerVerlag, 1986. p. 246-256. v. 32. MAYER-KRESS, G. & LAYNE, S. P. Dimensionality of the human electroencephalogram. *Perspectives in Biological Dynamics and Theoretical Medicine*, n. 504, p. 62-86, 1987. MAYER-KRESS, G.; BARCZYS, C. Sc FREEMAN, W. J. Attractor reconstruction from event-related multi-electrode EEG data. In: HOLDE, A. V. (Ed.). *Mathematical approaches to brain functioning diagnostics*. Hong Kong: World Scientific, 1991. MAYER-KRESS, G. et al. Dimensional analysis of non-linear oscillations in brain, heart, and muscle. *Mathematical Biosciences*, n. 90, p. 155-182, 1988. SCHUPP, H. T. et al. Neurophysiological differences between perception and imagery. *Cognitive Brain Research*, n. 2, p. 77-86, 1994.
15. Ver, por exemplo: MANDELBROT, B. B. Price change and scaling in economics. In: *The fractal geometry of nature*, New York: W. H. Freeman & Co., 1983. p. 334-340.
16. MAYER-KRESS, G. Global brains as paradigm for a complex adaptive world. In: *Evolving complexity: challenges to society, economy, and the*

individual. Dallas: University of Texas, 1994. MAYER-KRESS, G. Messy features and global brains. In: KRAVTSOV, Y. A. Sc KRADTKE, J. B. (Eds.). *Predictability of complex dynamical systems*. Berlin: SpringerVerlag, 1996; MAYER-KRESS, G. & BARCZYS, C. The global brain as an emergent structure from the worldwide computing network and its implications for modeling. *Information Society*, v. 11, n. 1, p 1-28,1995.

17. DROSSEL, B. Simple model for the formation of a complex organism. *Physical Review Letters*, v. 82, n. 25, p. 5.144-5.147,1999.

18. TOMSOVIC, S. Sc HELLER, E. J. Long-time semiclassical dynamics of chaos: the stadium billiard. *Physical Review*, E 47, p. 282-284,1993.

19. JENSEN, R. V. Chaos. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of modern physics*. New York: Academic Press, 1990. p. 69-96 [citado da p. 94].

20. KELLMAN, M. E. Personal comunicational, 2000. *Ver também* ROSE, J. P. Sc KELLMAN, M. E. Spectral patters of chaotic *acetylene*. *Journal of Physical Chemistry A* [no prelo].

21. CAS ATI, G.; MASPERO, G. Sc SHEPELYANSKY, D. L. Quantum Poincaré recurrences. *Physical Review Letters*, v. 82, n. 3, p. 524-527,1999.

22. HERSCH, J. S.; HAGGERTY, M. R. Sc HELLER, E. J. Diffractive orbits in an open microwave billiards. *Physical Review Letters*, v. 83, n. 25, p. 5.342-5.345,1999.

23. AMMAN, H. *et al.* Quantum delta-kicked rotor: experimental observation of decoherence. *Physical Review Letters*, v. 80, n. 19, p. 4.111-4.115,1998.

24. KEATING, J. P. *et al.* *Disordered systems and quantum chaos: report from the organizers*. New York: Cambridge University, 1997. [Ênfase adicionada].

Capitulo 17

1. EDDINGTON, A. S. *The nature of the physical world*. Cambridge: Cambridge University Press, 1928. p. 211.

2. COLLIER, C. P. *et al.* Electronically configurable molecular-based logic gates. *Science*, n. 285, p. 391-398, 1999.

3. BUTTLER, W. T. *et al.* Practical free-space quantum key distribution over 1 km. *Physical Review Letters*, v. 81, n. 15, p. 3.283-3.286,1998.

4. MONROE, C. *et al.* A “Schroedinger Cat” superposition state of an atom. *Science*, v. 272, n. 5.265, p. 1.131-1.135,1996.

5. POLK3NGHORNE, J. *Thefaith of a physicist*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1994.

6. *Apud* MATSUMARA, M. (Ed.). *Voices for evolution*. El Cerrito, California: National Center for Science Education, 1995. p. 33.
7. HUXLEY, T. H. *Collected essays*, 2. *Darwiniana: the origin of the species*. London: Macmillan, 1893. p. 52.
8. BEGLEY, S. Science finds God. *Newsweek*, p 46-51, 1998. *Ver também* EASTERBROOK, G. Science and God: a warming trend? *Science*, n. 277, p. 890-893, 1997. JOHNSON, G. Science and religion: bridging the great divide. *The New York Times*, p. F4, July 1, 1998.
9. JOHNSON, G. Science and religion: bridging the great divide. *The New York Times*, p. F4, July 1, 1998.
10. LARSON, E. J. & WITHAM, L. Scientists are still keeping the faith. *Nature*, n. 386, p. 435-436, 1997.
11. LARSON, E. J. & WITHAM, L. Leading scientists still reject God. *International Weekly Journal of Science Nature*, n. 394, p. 313, 1998.
12. *Apud* JOHNSON, G. Science and religion: bridging the great divide. *The New York Times*, p. F4, July 1,

1998.

13. *Apud* EASTERBROOK, G. Science and God: a warming trend? *Science*, n. 277, p. 890-893, 1997.
14. *Ibidem*.
15. *Ibidem*.
16. *Ibidem*.
17. *Ibidem*.
18. *Ibidem*.
19. *Ibidem*.
20. DAWKINS, R. *River out of Eden: a Darwinian view of life*. New York: Basic Books, 1995. p. 133.
21. KELLMAN, M. E. Personal communication, 2000.
22. HARKAVY, A. A. Speculation concerning will and a local God. In: *Human will: the search for its physical basis*. New York: Peter Lang, 1995.
23. CHURCHLAND, P. S. & SEJNOWSKI, T. J. *The computational brain*. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1993. p. 1-2.

Apêndice B

1. COLLINS, M. A. et al., *Physical Review*, B 19, p. 3.630,1979.
2. MONTROLL, E. W. In: RICE, S. A.; FREED, K. F. & LIGHT, J. C. (Eds.). *Statistical mechanics*. Chicago: University of Chicago, 1972.
3. CHOU, K. C.; ZHANG, C. T. & MAGGIORA, G. M. *Biopolymers*, n. 34, p. 143,1994.
4. SATARIC, M. V.; TUSZYNSKI, J. A. & ZACULA, R. B. Kinklike excitations as an energy-transfer mechanism in microtubules. *Physical Review*, E 48, p. 589-597, 1993; SATARIC, M. V.; ZACULA, R. B. & TUSZYNSKI, J. A. A model of the energy transfer mechanisms in microtubules involving a single soliton. *Nanobiology*, n. 1, p. 445-450,1992.
5. SATARIC, M. V.; ZACULA, R. B.; IVIC, Z. & TUSZYNSKI, J. A. Influence of a solitonic mechanism on the process of chemical catalysis. *Journal of Molecular Electronics*, n. 7, p. 39-46,1991.
6. WOAF, P.; GUENOUE, G. H. & BOKOSAH, A. S. Discreteness effects on kinklike excitations in microtubules. *Physical Review*, E 55, n. 1, p. 1.209-1.212,1997.
7. MANIOTIS, A. C. et al. Demonstration of mechanical connections between integrins, cytoskeletal filaments, and nucleoplasm that stabilize nuclear structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, n. 94, p. 849-854, 1997. GLANZ, J. Force-carrying web pervades living cell. *Science*, n. 276, p. 678,1997.
8. SEGEL, L. A. & PARNAS, H. *Biologically inspired physics*. New York: Plenum, 1991. TUSZYNSKI, J. A.; BROWN, J. & HAWRYLAK, P. Dielectric polarization, electrical conduction, information processing, and quantum computation in microtubules. Are they plausible? *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, n. 356, p. 1.897-1.926,1998.
9. MALETIC-SAVATICH, M.; MALINOW, R. & SVOBODA, K. Rapid dendritic morphogenesis in CA hippocampal dendrites induced by synaptic activity. *Science*, n. 283, p. 1.923-1.927,1999. SMITH, S. J. Dissecting dendrite dynamics. *Science*, n. 283, p. 1.860-1.861,1999.
10. BROWN, J. A. & TUSZYNSKI, J. A. Dipole interaction in axonal microtubules as a mechanism of signal propagation. *Physical Review*, E 56, p. 5.834-5.840,1997. SATARIC, M. V.; ZACULA, R. B. & TUSZYNSKI, J. A. A model of the energy transfer mechanisms in microtubules involving a single soliton. *Nanobiology*, n. 1, p. 445-450,1992. TRPISOVA, B. & TUSZYNSKI, J. A. Possible link between guanosine 5' triphosphate hydrolysis and solitary waves in microtubules. *Physical Review*, E 55, n. 3, p.

3.288-3.305,1999.

Apêndice C

1. PFLEEGOR, R. L. & MANDEL, L. Interference of independent photon beams. *Physical Review*, n. 159, p. 1.084-1.088,1967.
2. GREENSTEIN, G. & ZAJONC, A. G. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers, 1997. p. 45-46.
3. OMNÉS, R. *Understanding quantum mechanics*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999. p. 76.
4. *Ibidem*

CRÉDITOS

Figuras 5-1 e 5-4(a): reproduzidas de *The neurosciences*, mediante autorização de *copyright* da Rockefeller University Press.

Figura 5-4(b): reproduzida mediante autorização de *copyright* de: LORENTE DE NO, R. The structure of the cerebral cortex. In: FULTON, J. E. (Ed.). *Physiology of the Nervous System*. New York: Oxford University Press, 1949. p. 288-330.

Figuras 7-4, 7-5 e 7-9(b): geradas pelo Departamento de Matemática e Computação do Laboratório de Inteligência Artificial do MIT, e utilizadas mediante permissão.

Figura 7-8(c): transcrita de *Exploring complexity*, de Prigogine e Nicolis © 1989 por Gregoire Nicolis e Ilya Prigogine. Usada mediante permissão de W. H. Freeman e Companhia.

Figura 8-5: adaptada de simulação construída por Juha Haataja no Centro de Computação Científica de Espoo, Finlândia, e usada mediante sua permissão.

Figuras 8-9(a) e 8-9(b): © Hugo de Garis. Reproduzida mediante permissão.

Figura 11-10: reimpressa por permissão de: TONOMURA, A.; ENDO, J. *et al.* Demonstration of single-electron build-up of an interference pattern. *American Journal of Physics*, v. 57, n. 2, p. 117-120, 1989. © 1989, Associação Norte-Americana de Professores de Física.

Figura 11-13(b): © 1999, W. Blaine Stine, Evanston Northwestern Healthcare Research Institute. Reproduzida mediante permissão.

Figuras 11-13(c) e 12-1 : cortesia dos laboratórios do IBM Almaden Research Center.

Figura 14-1: MCINTOSH, J. R. The roles of microtubules in chromosome movement. In: HYAMS, J. S. & LLOYD, C. W. (Eds?). *Microtubules* © 1994 J. R. McIntosh. Reproduzida mediante permissão de Wiley-Liss, Inc., uma subsidiária de John Wiley & Sons, Inc.

Figuras 14-3(a) e 14-4(c): Gary Borisy © 1997, Laboratório de Biologia Molecular, Northwestern University. Reproduzidas mediante permissão.

Figuras 14-3(b) e 14-4(f): Linda A. Amos © 1999, Laboratório MRC de Biologia Molecular, Universidade de Cambridge. Reproduzidas mediante

permissão.

Figura 14-3(d): SMITH, E. F. & SALE, W. S. Mechanism of flagellar movement. In: HYAMS, J. S. & LLOYD, C. W. (Eds.). *Microtubules* © 1994 J. R. McIntosh. Reproduzida mediante permissão de Wiley-Liss, Inc., uma subsidiária de John Wiley & Sons, Inc.

Figura 14-4(a): SCHOLEY, J. M. & VALE, R. D. Kinesin-based organelle transport. In: HYAMS, J. S. & LLOYD, C. W. (Eds.). *Microtubules* © 1994 J. R. McIntosh. Reproduzida mediante permissão de Wiley-Liss, Inc., uma subsidiária de John Wiley & Sons, Inc.

Figura 14-4(b): WORDERMAN, L. & MITCHESON, T. J. Dynamics of microtubule assembly in vivo. In: HYAMS, J. S. & LLOYD, C. W. (Eds.). *Microtubules* © 1994 J. R. McIntosh. Reproduzida mediante permissão de Wiley-Liss, Inc., uma subsidiária de John Wiley & Sons, Inc.

Figuras 14-5(a) e 14-5(b): reproduzidas com permissão de Stuart Hameroff.

Figura 14-8(c): CACHON, R. J. & CACHON, M. The axopodial systems of *Radiolaria nassellaria*. *Archiv für Protistenkunde*, n. 113, p. 80-97, 1971. © 1992 Overseas Publishers Association. Reproduzido com permissão de Gordon and Breach Publishers.

Figura 15-5: adaptado de um filme de animação produzido por Hector Rodriguez, da Universidade da Califórnia, *campus* Santa Bárbara, e por Lydia Gregoret, da Universidade da Califórnia, *campus* Santa Cruz.

Figura 15-10(c): © 1999, Jacqueline K. Barton, Instituto de Tecnologia da Califórnia. Reproduzida mediante permissão.

Figura 16-14: © 1986, James P. Crutchfield. Adaptada e reproduzida mediante permissão.

Figuras 16-16(a) e 16-16(b): PEITGEN, H. O. *et al. Fractals for the classroom: strategic activities*, v. 2. New York: Springer Verlag, 1992. p. 187. © 1992 Springer Verlag. Reproduzida mediante permissão.

Figura 16-19: © 2000, Ralf Aurich, Grupo do Caos Quântico, Universidade de Ulm, Alemanha. Reproduzida mediante permissão.

Figura 16-20: reproduzida mediante permissão da revista *Nature* (v. 387, n. 6.633, p. 575-577): WILKINSON, S. R. & BHARUCHA, C. Experimental evidence for non-exponential decay in quantum tunneling. © 1997 Macmillan Magazines, Ltd.

Excertos retirados de *Albert Einstein: a biography*, por Albrecht Folsing, traduzido por Ewald Osers, copyright © 1993 Suhrkamp Verlag; texto © 1997 Ewald Osers, tradutor. Usado mediante permissão da Viking Penguin, uma divisão de Penguin Putnam, Inc.

TIPOLOGIA: Adobe Caslon - Regular [texto]

VAG Rounded - Light [entretítulos e legendas] PAPEL: Chambril 75 g/m²
[miolo]

Supremo 250 g/m² [capa]

IMPRESSÃO: Graphium Gráfica [abril de 2013]

1ª EDIÇÃO: novembro de 2007

2ª EDIÇÃO: novembro de 2008 [2 reimpressões]