

Claire L. Evans

Rochas, oráculos e o fim do paradigma do silício

Vou começar hoje com uma provocação — talvez uma simplificação —: os computadores são rochas. Essa é a magia fundamental deles, ou talvez a nossa. A capacidade de extrair elementos do interior da Terra — silício, tungstênio, cobre e estanho — e transformá-los, com trabalho, capital, linguagem e muita energia, em ferramentas de adivinhação e descoberta. Ao miniaturizá-los em chips finíssimos, transformamos pedras em oráculos. E é espantoso, não é? O que as rochas se tornaram. De sua origem em tempos geológicos profundos até os cálculos acelerados da computação contemporânea.

Essas rochas nos deram poder computacional bruto suficiente para realizar feitos antes inimagináveis: modelar o clima, descobrir e sintetizar moléculas desconhecidas, fazer jorrar poesia de chatbots. Mas há limites para o que as rochas podem fazer. Por um lado, a dura borda da física está próxima. A miniaturização tem um limite. O custo de fabricar chips de próxima geração cresce exponencialmente à medida que nos aproximamos do limite de quão pequenos eles podem ser. E também há uma limitação no número de rochas disponíveis para isso.

A demanda por areia de sílica de alta pureza, usada na fabricação de chips de silício, está atualmente provocando uma escassez global e irreversível desse recurso. E a cadeia de suprimentos dos minerais comumente usados em smartphones, baterias e computadores alimenta conflitos sangrentos, exploração e caos político ao redor do mundo. Então, o que vem depois? Depois de extraírem o último sangue da pedra, não teremos escolha a não ser transcender esse paradigma. Transcender essas rochas inteligentes. O que exigirá uma adaptação — afinal, estamos muito acostumados a elas.

Mas acredito que, no futuro, em vez de silício, tungstênio ou estanho, os computadores terão que ser extraídos de materiais muito mais estranhos. Na verdade, talvez nem precisem ser extraídos. Talvez precisem ser cultivados.

Slime mold: o cogumelo que pensa

E se isso te parece estranho, é porque você nunca conheceu um *slime mold* (bolor limoso). Felizmente, isso é fácil de corrigir. Ao contrário da areia de sílica, os *slime molds* são abundantes neste planeta, e tendem a se regenerar. Basta ir até a floresta mais próxima — tenho certeza de que há muitas por aqui —, virar um tronco caído e olhar

para o húmus úmido e em decomposição, nessa borda entre a vida e a decadência, e você os encontrará.

Ao encontrá-los, você provavelmente pensará que está diante de um cogumelo, algum tipo de fungo. E não seria a primeira a achar isso. Os *slime molds* foram mal categorizados e mal compreendidos ao longo da história. Seu nome em latim é *Mycetozoa* — *myceto*, de cogumelo, e *zoa*, de animal. Uma espécie de animal fúngico, o que é incomum. Mas eles não são fungos, nem animais. São algo muito, muito mais estranho.

São organismos acelulares — ou seja, sem células. Têm uma fisiologia verdadeiramente única. O corpo do *slime mold* *Physarum polycephalum* é uma única célula amorfa, uma gosma amarela elétrica e viscosa que abriga milhares de núcleos dispersos. Esses núcleos pulsam através do organismo num fluxo rítmico enquanto ele busca recursos em seu ambiente. Isso lhe permite mover-se com velocidade surpreendente para um organismo tão pequeno: cerca de um milímetro por segundo.

À medida que se desloca, ele estende tentáculos de busca chamados pseudópodes, em busca de comida. Onde não encontra alimento, ele retrai esses tentáculos, deixando um traço químico chamado slime extracelular, que sinaliza ao corpo para não retornar a esse local.

Memória espacial sem mente

O que é interessante é que esse traço químico, junto com a capacidade inata do molde de reler seu próprio rastro, constitui uma forma de memória espacial. Num organismo que não possui mente, nem sistema nervoso central, nem autoconsciência, nem conhecimento do que está fazendo, ainda assim é capaz de explorar e mapear o mundo com detalhes impressionantes.

Isso significa que esse organismo humilde, nas condições certas, consegue resolver labirintos. Pode desenhar redes eficientes, encontrar rapidamente o caminho mais curto entre diferentes pontos num mapa. Ele lida com facilidade com o “teste da armadilha em U”, geralmente usado para testar robôs autônomos e carros autônomos. Já modelou as estradas da Roma antiga, traçou novos caminhos na Lua e em Marte, e reproduziu perfeitamente a rede ferroviária interconectada do Japão.

Ele é especialista em problemas de otimização de redes, como o famoso problema do caixeiro viajante, que qualquer pessoa da ciência da computação sabe que é extremamente difícil — e ineficiente — de resolver pelos meios convencionais. Mas o *slime mold* não usa meios convencionais. Ele usa meios não convencionais. Aquilo que chamamos de “computação morfológica”. Ele pensa com a forma. Pensa com o corpo.

E, para certos tipos de problema — especialmente aqueles que são realmente ineficientes de resolver com métodos tradicionais —, a forma é uma maneira interessante e útil de pensar. E, embora isso possa parecer contraintuitivo, ele consegue pensar com o corpo e sem cérebro.

Pensar com o corpo vs. pensar com o cérebro

O que significa pensar com o corpo e não com o cérebro? Uma forma de abordar essa pergunta é olhar para o inverso: pensar com o cérebro e sem o corpo. Acho que essa é uma descrição bastante adequada das aspirações da inteligência artificial — do *deep learning*, da tentativa de emular as conexões sinápticas do cérebro humano por meio de redes neurais artificiais para criar sistemas de IA.

Tradicionalmente, a IA emerge desses modelos do cérebro porque é aí que está a inteligência, certo? Bem, certamente é onde está *algum* tipo de inteligência. Mas, se olharmos de fato para a biologia, descobriremos que a inteligência é muito mais amorfa e estranha do que imaginamos.

Por exemplo, o *Physarum* nos mostra que existem formas de pensar que transcendem completamente o cérebro, formas puramente corporificadas. Quando consideramos o cérebro isoladamente — como se fosse um cérebro em um frasco, ou numa cuba — estamos ignorando essa forma de inteligência, que, embora primitiva, é extremamente útil em certos contextos.

Estamos também ignorando o fato de que, mesmo nos humanos, o cérebro está situado dentro de um corpo. E, nesse corpo, os microrganismos superam as células humanas numa proporção de 10 para 1. O que sabem esses organismos? Como sua inteligência primitiva guia a nossa? E quanto às nossas outras células — as não neurais — espalhadas pelo corpo? Elas têm alguma forma de saber? Podem se lembrar?

Essas são perguntas em aberto na biologia. Mas o que estamos começando a aprender é surpreendente.

Memória para além das sinapses

Durante décadas, o consenso nas neurociências e na biologia foi de que a memória e o aprendizado são consequências da plasticidade sináptica — ou seja, que as conexões entre agrupamentos de neurônios simultaneamente ativos durante uma experiência se fortalecem em redes que permanecem mesmo depois que essa experiência passou.

Isso costuma ser expresso por um adágio muito conhecido: “neurônios que disparam juntos, se conectam”. Esse princípio é fundamental para nossa compreensão da memória e da cognição humana. E também sustenta, de maneira evidente, o design das redes neurais artificiais.

Mas, cada vez mais, pesquisas biológicas emergentes sugerem que a plasticidade sináptica não é toda a história quando se trata de inteligência. Ela não explica, por exemplo, o modo muito particular como o *slime mold* mapeia o mundo. Tampouco explica como células bem mais humildes — células não neurais, dentro e fora do corpo — também conseguem lembrar e aprender.

Células que aprendem

A memória assume muitas formas no mundo natural, nem todas as quais nos sentimos confortáveis em chamar de “memória”, porque temos uma associação muito afetiva com essa palavra. Mas se olharmos, por exemplo, para bactérias: todas elas realizam quimiotaxia — o processo de se mover por gradientes químicos e térmicos em direção a ambientes mais ideais, com melhores condições.

Elas não seriam capazes de fazer isso sem a capacidade de comparar a experiência presente com a experiência passada. As bactérias fazem isso de forma muito primitiva. É um tipo de cognição *aneuronal*. Mas, assim como a computação morfológica do *slime mold*, isso resulta efetivamente em algo parecido com a memória.

No reino dos eucariotos, criaturas unicelulares possuem capacidades notáveis. Tome-se o ciliado *Stentor roeselii*, por exemplo — um organismo unicelular que vive em poças d'água. Se você irritar o *Stentor* com um jato de micropartículas de plástico ou tinta, ele reagirá como qualquer ser vivo. Primeiro, se afastará do estímulo. Se isso não bastar, ele inverterá a direção dos cílios, cuspido água contra seu agressor. Se isso também não funcionar, ele se retrairá para sua base de fixação — uma estrutura que o ancora ao ambiente. E, se ainda assim o estímulo persistir e ele estiver realmente exasperado, se desprenderá dessa base e nadará para procurar condições mais favoráveis.

Isso parece comportamento animal, não parece? Uma hierarquia de reações a uma experiência, cada uma das quais exige conhecimento prévio do que veio antes. Você não pode aumentar sua reação a um estímulo se não sabe que a reação anterior não funcionou. Isso também é memória.

Mas esse é outro organismo que não tem neurônios. Nada além de uma única célula. Ainda assim, ele mantém essa consciência das condições ambientais passadas e presentes. E essa consciência está presente em muitas — talvez em todas — as células não neurais.

As células humanas também lembram

Um estudo publicado no ano passado revelou que células renais humanas também conseguem lembrar. E não só isso: elas demonstram aquilo que se considera um pilar da formação de memória em humanos — o chamado *efeito de espaçamento massivo (mass spacing effect)*. Esse efeito, essencialmente, mostra que, assim como nós, essas células lembram por mais tempo quando expostas a uma informação em intervalos espaçados, em vez de receberem tudo de uma vez só.

Quem já passou uma noite inteira estudando para uma prova e esqueceu tudo poucos dias depois conhece bem esse efeito. Ele é universal nas pessoas — e também comum em todo o reino animal. Abelhas demonstram esse padrão, assim como moscas da fruta, lesmas-do-mar, aves, macacos. E agora, talvez estejamos descobrindo que esse efeito permeia até mesmo as células individuais, sugerindo que formas mais básicas de cognição existem — formas mais fundamentais do que a neurociência até hoje reconheceu.

Isso implica, por extensão, que a cognição é algo onipresente. Está naturalizada na própria vida, até seus elementos mais simples. E, ainda assim, estamos apenas

começando a desvendar esse fato. Ainda há muito que não sabemos sobre como a vida conhece.

E mesmo aquilo que sabemos, temos dificuldade de traduzir e representar por meios computacionais.

O enigma do verme que desafia os computadores

Tome-se o caso do nematoide microscópico *C. elegans*. Ele é um dos animais mais estudados da biologia. É um organismo-modelo nos laboratórios desde os anos 1940. Sabemos tanto sobre ele. Mapeamos todas as suas células. Conhecemos os 302 neurônios que constituem seu cérebro. Mapeamos esses neurônios com microscopia eletrônica. Podemos usar técnicas genéticas para desligar e religar neurônios individuais e observar como o resto do cérebro responde. Temos um diagrama completo da rede de conexões desses 302 neurônios — que, se comparados aos nossos 82 bilhões, representam o que há de mais simples em termos de cérebro.

Então, poderíamos pensar que a inteligência artificial de um verme — *AWI*, para brincar com a sigla de AGI (inteligência geral artificial) — deveria estar logo ali, ao nosso alcance. Mas não está.

Na verdade, o comportamento dinâmico desses 302 neurônios é essencialmente incomputável. Simular o cérebro de um *C. elegans* é considerado um dos problemas mais espinhosos e intransponíveis da biologia computacional. Um pesquisador com quem conversei para um artigo disse que era como uma catedral — ele não imaginava que ela seria construída em sua vida, embora estivesse feliz em fazer parte do projeto.

Seria necessário um volume enorme de dados — dados de boa qualidade —, uma capacidade computacional imensa, e uma enorme colaboração entre pesquisadores, tudo isso para tentar simular algo que um verme microscópico faz com... nada. E acho isso profundamente humilhante.

O limite das máquinas diante da vida

É importante destacar o quão incapaz, às vezes, quão inadequada é a nossa infraestrutura computacional atual para expressar as coisas mais básicas e simples da natureza. Isso não quer dizer que não valha a pena fazer esses esforços — vale. Porque a IA do verme pode ser o primeiro passo para a IA da mosca, que pode ser o passo seguinte para a IA do rato. E, quem sabe um dia, para uma compreensão plena e robusta de como funciona o cérebro humano. Temos que começar por algum lugar.

As lições do *Physarum polycephalum* — embora um organismo humilde — nos ensinam muito sobre como construir redes resilientes. Matemáticos simularam o comportamento do *Physarum* para mapear as maiores estruturas do universo: a teia cósmica. E, num nível material e prático, há pesquisadores no campo da computação não convencional que estão tentando construir chips híbridos biocomputacionais. Eles usam o corpo do *Physarum*, injetando seus pseudópodes com nanopartículas condutivas para criar chips vivos, primitivos, sustentáveis e biodegradáveis.

Claro, esses são esforços especulativos, talvez mais próximos de experimentos de pensamento. Mas acho que isso coloca em perspectiva toda a ideia das rochas inteligentes.

Aprendendo com a natureza

Quando começamos a olhar ao nosso redor, para o mundo natural, percebemos que ele já oferece muitas soluções interessantes para os nossos problemas. Achamos que os nossos problemas são únicos e modernos, mas não são.

Poucos anos atrás, uma pesquisadora de Stanford, a dra. Deborah Gordon — especialista em formigas — descobriu que o algoritmo regulador que as formigas colhedoras usam para decidir como irão buscar recursos pelo deserto do Arizona é funcionalmente idêntico ao protocolo TCP/IP. Isso mesmo, o Protocolo de Controle de Transmissão, que usamos para regular o tráfego de dados na internet. A *formiguenet*. (Desculpem, eu *tinha* que dizer isso.)

Mas isso significa que as formigas são cientistas da computação? Não. Significa apenas que elas tiveram milhões de anos para resolver problemas que nós enfrentamos há poucas décadas. Por que não estamos buscando mais desses problemas e dessas soluções já incorporadas no mundo vivo?

Que outras ideias podemos tomar emprestadas da natureza?

Computação como propriedade do universo

Formigas, *slime molds*, vermes — são todos modelos úteis em contextos laboratoriais, mas não são únicos no mundo vivo. Como observa o cientista da computação Selim Akl: a computação é onipresente no universo. *Ser é computar*. E ele não está falando metaforicamente.

Nem estão os biólogos que, cada vez mais, usam termos como *algoritmo*, *processamento de informação*, *memória*, *cálculo* para descrever o que observam no campo. Porque, no fundo, o que é computar?

É a capacidade de processar uma entrada — no caso de um organismo vivo, informações do ambiente —, codificar essa informação na memória, retê-la ao longo do tempo e, então, agir sobre ela para modificar o comportamento e produzir novos resultados. E, idealmente, realimentar esse resultado no sistema e continuar melhorando.

Essa é a base da computação. Mas também é a base da sobrevivência evolutiva de qualquer ser vivo.

O que chamamos de computação — com operações em silício e estanho — é, na verdade, uma instância especializada de um processo muito mais antigo e amplo. Um processo que atravessa diferentes materiais, milênios e filos, e que existe em múltiplos graus e escalas de complexidade.

Mais uma vez: *ser é computar*.

Entre representação e realidade

Essa ideia é quase o oposto do modo como enxergamos a computação hoje. Desde a invenção das máquinas de processamento de dados no século XX, temos nos

desdoblado para tornar o mundo legível para elas. Para compartmentalizar toda a complexidade da natureza, da vida, do nosso mundo, num modelo lógico e matemático.

Nesse processo, realizamos feitos extraordinários — isso é inegável. Mas também acabamos por reduzir a vida. Reduzimos a desordem e a capacidade de transformação e mudança que são inerentes a ela.

A vida é um processo dinâmico. Não é algo que possa ser facilmente reduzido. É algo que emerge da interação entre partes constituintes em múltiplas escalas. Não se encaixa perfeitamente em caixas.

Se construíssemos nossa tecnologia de baixo para cima, a partir da Terra, para modelar esses processos mais primitivos — a forma como a natureza processa informação —, talvez não estivéssemos tentando enfiar peças quadradas em buracos redondos. Talvez houvesse espaço para toda essa bagunça, para essa vitalidade, para essa transformação.

Hoje ouvimos muito falar sobre ferramentas e agentes de IA — esses companheiros com os quais vamos compartilhar as próximas décadas. Mas nós já temos muitos companheiros ao nosso redor, neste mundo e dentro de nós, que nos ensinam muito. Eles também nos ensinam a diferença entre representação e realidade.

Por “representação”, quero dizer que os sistemas de IA são treinados com dados. Eles são treinados com palavras, símbolos, imagens, códigos, sons. Tudo isso são representações do mundo. Mas sistemas vivos e inteligentes estão sempre envolvidos em uma relação dinâmica, material e corpórea com a realidade.

Physarum não tem órgãos sensoriais para representar o mundo para si mesmo. Uma célula não representa o mundo para si. Mas ainda assim age. Ainda assim negocia com seu ambiente de forma física, convida esse ambiente para uma troca constante — química, tátil, física. Enraizada no consumo e na excreção de matéria, na transformação da matéria pela digestão e pela decomposição — processos ancestrais, nenhum dos quais opera isoladamente. Porque a vida é uma conversa.

A mente da Terra

Toda inteligência na Terra, toda complexidade, todo processamento de informação — seja de um humano, de um verme, de um slime, de uma formiga — surgiu como resultado de um longo e aberto diálogo evolutivo. Um processo pelo qual cada ser vivo encontrou sua mente no tempo, em conversa com outras mentes e com seu ambiente.

Anedoticamente, os neurônios evoluíram mais ou menos na época em que os animais começaram a comer uns aos outros. Então, o fato de termos pensamento complexo decorre de uma necessidade evolutiva de estar consciente da proximidade de outros animais. E isso não significa que a inteligência tenha raízes na hostilidade — porque, em muitos casos, a sobrevivência, o ato de escapar da predação, é uma questão de colaboração, não de competição.

A evolução, repetidas vezes, é o processo que nos trouxe a complexidade e a cognição que agora buscamos em nossos sistemas computacionais. Então, por que não trabalhar em direção à inteligência a partir desse caminho? De baixo para cima, e não de cima para baixo?

É o único caminho que sabemos que funcionou. O simples fato de eu estar aqui falando com vocês, e vocês estarem aí me ouvindo, é prova disso.

Esperança para o futuro

Nossa compreensão do mundo vivo sempre evoluiu junto com a tecnologia. Durante a primeira metade do século XX, a biologia foi dominada por uma visão mecanicista, linear e reducionista do mundo. A ideia de que a estrutura determina a função. Células eram unidades. Formigas eram autômatos. Em uma hierarquia inflexível. A vida era algo a ser dissecado, examinado, classificado, decomposto em partes e olhado no microscópio — desmontado como uma máquina — até que fosse compreendido. E isso refletia o paradigma computacional da época, como sempre acontece.

Mas a computação é uma metáfora. E pode evoluir. Pode evoluir junto com nossa compreensão da vida — a compreensão de que a vida é um processo dinâmico definido pelas interações entre suas partes constituintes. Isso não é algo que se possa decompor.

Acredito que, à medida que nosso poder computacional cresceu, nossa capacidade de compreender isso também cresceu. Nossa capacidade de modelar e simular seres vivos

melhorou, e isso deu origem a novas formas de ver o mundo — como a ciência da complexidade ou a vida artificial.

A computação, como metáfora, deu aos biólogos uma nova linguagem para falar do que os sistemas vivos fazem. Uma linguagem que nos aproxima — nós e eles. Uma linguagem que nos ajuda a entender como a vida processa informação e a preserva para manter a entropia sob controle — que é a magia fundamental da vida.

O mundo que se conhece a si mesmo

Gostaria de expressar aqui minha esperança para o futuro — que também é um apelo ao passado profundo. Acredito sinceramente que estamos cada vez mais próximos de transpor a distância entre tecnologia e vida. Embora, quanto mais examinamos essa distância, maior ela pareça.

Mas acredito que essa travessia está ao nosso alcance. Talvez seja a catedral final que teremos que construir. E espero que, uma vez erguida, ela possa nos salvar de nós mesmos, de certo modo.

Não digo isso apenas no sentido de que um dia teremos máquinas que — como disse no início desta fala — não serão mineradas, mas cultivadas. Espero que possamos usar essas máquinas para algo: para compreender mais profundamente os mecanismos do mundo vivo, os padrões que sustentam sua criatividade e sua engenhosidade, suas redes mutualísticas, sua notável capacidade de se adaptar às circunstâncias, seu impulso implacável de sobreviver, persistir e florescer contra todas as probabilidades.

Espero que possamos encontrar um modo de entender o mundo com ferramentas que sejam moldadas a partir do próprio mundo. Ferramentas que sejam gerativas, resilientes — até mesmo vivas —, não estáticas ou implacáveis como a pedra.

Porque é só então que poderemos nos tornar aquilo que sempre estivemos destinados a ser. Aquilo que sempre fomos: nada mais do que um modo de o mundo conhecer a si mesmo.

Obrigada.

