



VACLAV SMIL

COMO O MUNDO FUNCIONA

**UM GUIA
CIENTÍFICO
PARA O
PASSADO,
O PRESENTE
E O FUTURO**

“Um livro acessível que nos oferece as bases necessárias para lidarmos com nossos desafios mais complexos.”

BILL GATES

VACLAV SMIL

**COMO O
MUNDO
FUNCIONA**

**UM GUIA
CIENTÍFICO
PARA O NOSSO
PASSADO,
PRESENTE E
FUTURO**

Tradução de Antenor Savoldi Jr.



Copyright © Vaclav Smil, 2022

Publicado originalmente em inglês pela Viking, um selo da Penguin General.

A Penguin General é parte do Grupo Penguin Random House.

TÍTULO ORIGINAL

How The World Really Works

PREPARAÇÃO

Carolina Leocadio

Iuri Pavan

REVISÃO

Carolina Vaz

Laís Curvão

DIAGRAMAÇÃO

Julio Moreira | Equatorium Design

DESIGN DE CAPA

Gabriela Pires

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

S645c

Smil, Vaclav, 1943-

Como o mundo funciona : um guia científico para o nosso passado, presente e futuro / Vaclav Smil ; tradução Antenor Savoldi Jr. - 1. ed. - Rio de Janeiro : Intrínseca, 2024.

400 p. ; 21 cm.

Tradução de: How the world really works : the science behind how we got here and where we're going

ISBN 978-65-5560-607-2

1. Ciência - Aspectos sociais. 2. Ciência e civilização. 3. Inovações tecnológicas - Aspectos sociais. 4. Tecnologia e civilização. I. Savoldi Jr., Antenor. II. Título.

24-88010

CDD: 303.483

CDU: 316.422.44



Meri Gleice Rodrigues de Souza - Bibliotecária - CRB-7/6439

25/01/2024 30/01/2024

[2024]

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA INTRÍNSECA LTDA.

Av. das Américas, 500, bloco 12, sala 303

22640-904 – Barra da Tijuca

Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax: (21) 3206-7400

www.intrinseca.com.br

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

POR QUE PRECISAMOS DESTE LIVRO? 7

1. ENTENDENDO A ENERGIA:

COMBUSTÍVEIS E ELETRICIDADE 21

2. ENTENDENDO A PRODUÇÃO DE ALIMENTOS:

COMER COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS 62

3. ENTENDENDO O NOSSO MUNDO MATERIAL:

OS QUATRO PILARES DA CIVILIZAÇÃO MODERNA 105

4. ENTENDENDO A GLOBALIZAÇÃO:

MOTORES, MICROCHIPS E MUITO MAIS 141

5. ENTENDENDO OS RISCOS:

DOS VÍRUS ÀS DIETAS E EXPLOSÕES SOLARES 184

6. ENTENDENDO O MEIO AMBIENTE:

A ÚNICA BIOSFERA QUE TEMOS 229

7. ENTENDENDO O FUTURO:

ENTRE O APOCALIPSE E A SINGULARIDADE 278

APÊNDICE

ENTENDENDO OS NÚMEROS: ORDENS DE MAGNITUDE 311

NOTAS E REFERÊNCIAS

317

AGRADECIMENTOS

385

ÍNDICE

387

INTRODUÇÃO

POR QUE PRECISAMOS DESTE LIVRO?

Cada época tem seus argumentos para se considerar única, mas, mesmo que as experiências das últimas três gerações — isto é, das décadas desde o fim da Segunda Guerra Mundial — não tenham sido tão profundamente transformadoras quanto as das três anteriores ao início da Primeira Guerra Mundial, não faltaram acontecimentos e avanços sem precedentes. O que impressiona é que agora um número maior de pessoas desfruta de um padrão de vida mais alto e vive por mais tempo e com melhor saúde do que em qualquer outro momento da história. No entanto, os que se beneficiam disso ainda são uma minoria (apenas cerca de um quinto) da população mundial, cuja contagem total é de aproximadamente oito bilhões de pessoas.

A segunda conquista a ser admirada é o inédito aumento da nossa compreensão do mundo físico e de todas as formas de vida. Nosso conhecimento se estende desde grandes generalizações sobre sistemas complexos na escala universal (galáxias, estrelas) e planetária (atmosfera, hidrosfera, biosfera) até processos no nível dos átomos e dos genes: linhas gravadas na superfície do microprocessador mais poderoso são apenas cerca de duas vezes o diâmetro do DNA humano. Traduzimos esse entendimento em um conjunto cada vez maior de máquinas, dispositivos, procedimentos, protocolos e intervenções que sustentam a civilização moderna, e a enormidade do nosso conhecimento acumulado — e

as maneiras como o utilizamos a nosso serviço — está muito além da compreensão de qualquer mente isolada.

Seria possível conhecer homens renascentistas de verdade na Piazza della Signoria de Florença em 1500, mas não por muito tempo depois disso. Em meados do século XVIII, dois sábios franceses, Denis Diderot e Jean le Rond d’Alembert, ainda podiam reunir um grupo de colaboradores eruditos para resumir o conhecimento da época em definições bastante extensas nos vários volumes da *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Algumas gerações depois, a extensão e a especialização do nosso conhecimento avançaram em ordens de grandeza, com descobertas fundamentais como a indução magnética (por Michael Faraday em 1831, base da geração de eletricidade), o metabolismo das plantas (por Justus von Liebig em 1840, base da fertilização das lavouras) e as teorias sobre eletromagnetismo (por James Clerk Maxwell em 1861, base de toda a comunicação sem fio).

Em 1872, um século após o surgimento do último volume da *Encyclopédie*, qualquer compilação de conhecimentos precisaria recorrer ao tratamento superficial de uma variedade de temas em rápida expansão, e, um século e meio depois, é impossível resumir nossa compreensão, mesmo dentro de especialidades estritamente delimitadas: termos como “física” ou “biologia” são rótulos sem muito sentido, e especialistas em física de partículas achariam muito difícil entender até mesmo a primeira página de um novo trabalho de pesquisa sobre imunologia viral, por exemplo. É claro que essa atomização do conhecimento dificulta os processos decisórios públicos. Ramos altamente especializados da ciência moderna se tornaram tão impenetráveis que muitas pessoas neles empregadas são forçadas a estudar até meados dos trinta anos para ingressar em seu novo sacerdócio.

Essas pessoas podem compartilhar longos períodos de aprendizagem, mas muitas vezes não conseguem concordar sobre a melhor forma de agir. A pandemia de covid-19 deixou claro que as divergências entre especialistas podem se estender até mesmo a decisões aparentemente simples, como usar uma máscara de proteção facial. No final de março de 2020 (terceiro mês de disseminação do vírus), a Organização Mundial da Saúde (OMS) ainda desaconselhava seu uso, exceto para pessoas infectadas e pessoas em contato com elas, e a mudança de postura ocorreu apenas no início de junho de 2020. Como alguém que não tem nenhum conhecimento especial pode tomar partido ou compreender essas disputas que, muitas vezes, terminam em retratações ou no abandono das posições que antes eram dominantes?

Ainda assim, tais incertezas e divergências sem fim não são desculpa para que a maioria das pessoas entenda tão mal o funcionamento essencial do mundo moderno. Afinal, entender como o trigo é cultivado (Capítulo 2), ou como o aço é feito (Capítulo 3), ou perceber que a globalização não é nova nem inevitável (Capítulo 4) não é o mesmo que pedir que alguém compreenda a femtoquímica (o estudo das reações químicas nas escalas de tempo de 10^{-15} segundos — Ahmed Zewail, Prêmio Nobel em 1999) ou as reações em cadeia da polimerase (a cópia rápida do DNA — Kary Mullis, Prêmio Nobel em 1993).

Por que, então, a maioria das pessoas nas sociedades modernas tem um conhecimento tão superficial sobre como o mundo realmente funciona? As complexidades do mundo moderno são um motivo óbvio: as pessoas estão o tempo todo interagindo com caixas-pretas, e a relativa simplicidade de seu uso exige pouca ou nenhuma compreensão do que está acontecendo dentro da caixa. Isso vale tanto para dispositivos onipresentes como celulares e laptops (digitar um simples termo para pesquisa resolve tudo) quanto para procedimentos em grande escala, como

a vacinação — sem dúvida o melhor exemplo de 2021 em todo o planeta, em que a única parte normalmente compreensível era enrolar a manga da blusa. Mas as explicações para esse déficit de compreensão vão além do fato de que o nível do nosso conhecimento incentiva a especialização, e a outra face disso é uma compreensão cada vez mais superficial, e até mesmo ignorante, das coisas mais básicas.

Urbanização e mecanização são duas razões importantes para esse déficit de compreensão. Desde o ano de 2007, mais da metade da humanidade vive em grandes cidades (número que passa de 80% nos países ricos), e, ao contrário das cidades industrializadas do século XIX e início do século XX, os empregos nas áreas urbanas modernas se concentram principalmente no ramo de serviços. Portanto, a maioria dos habitantes urbanos modernos está desconectada não apenas da maneira como produzimos nossos alimentos, mas também do modo como construímos nossas máquinas e dispositivos. A crescente mecanização de todas as atividades produtivas significa que apenas uma parcela muito pequena da população global atual se dedica a fornecer à civilização a energia e os materiais que compõem nosso mundo moderno.

Hoje os Estados Unidos têm apenas cerca de três milhões de homens e mulheres (proprietários de fazendas e trabalhadores contratados) diretamente envolvidos na produção de alimentos, isto é, pessoas que de fato aram os campos, plantam as sementes, aplicam fertilizantes, retiram ervas daninhas, colhem as lavouras (colher frutas e vegetais é a parte mais trabalhosa do processo) e cuidam dos animais. Isso representa menos de 1% da população do país; portanto, não é de admirar que a maioria dos habitantes não tenha nenhuma ideia, ou tenha apenas uma vaga noção, sobre como seu pão ou seus cortes de carne chegaram a eles. As colheitadeiras colhem trigo, mas será que também colhem soja e

lentilha? Quanto tempo leva para um porquinho se tornar uma costeleta de porco: semanas ou anos? A grande maioria da população norte-americana simplesmente não sabe — e eles não estão sozinhos. A China é o maior produtor mundial de aço (fundição, moldagem e laminação de quase um bilhão de toneladas por ano), mas tudo isso é feito por menos de 0,25% dos 1,4 bilhão de habitantes do país. Apenas uma pequena porcentagem da população chinesa chegará perto de um alto-forno ou verá uma máquina de lingotamento contínuo e suas faixas vermelhas de aço quente em movimento. E essa desconexão acontece em todo o mundo.

A outra grande razão para a compreensão cada vez mais limitada desses processos fundamentais que fornecem energia (como alimento ou como combustível) e materiais duráveis (sejam metais, minerais não metálicos ou concreto) é que eles passaram a ser vistos como antiquados — até ultrapassados — e pouco interessantes em comparação ao mundo da informação, dos dados e das imagens. As famosas “melhores mentes” não se dedicam à ciência do solo nem tentam fazer um cimento de qualidade superior. Em vez disso, o que as atrai é lidar com informações etéreas, hoje apenas fluxos de elétrons em miríades de microdispositivos. De advogados e economistas a programadores e gerentes financeiros, os ganhos são muito mais altos para funções que estão completamente afastadas das realidades materiais da vida na Terra.

Além disso, essa adoração aos dados fez muitos passarem a acreditar que os fluxos eletrônicos tornarão desnecessárias essas antigas necessidades materiais. Os campos serão substituídos pela agricultura urbana nos arranha-céus, e os produtos sintéticos acabarão eliminando a necessidade de cultivar qualquer alimento. A desmaterialização, alimentada pela inteligência artificial, acabará com a nossa dependência em relação às massas

moldadas de metais e minerais processados, e, em algum momento, podemos até não precisar do meio ambiente da Terra: quem precisa dele se vamos “terraformar” Marte? Claro, essas são previsões não apenas muito prematuras, mas também fantasias, fomentadas por uma sociedade na qual as notícias falsas se tornaram comuns e realidade e ficção se misturaram a tal ponto que mentes ingênuas, suscetíveis ao culto de ideias assim, acreditam naquilo que observadores mais afiados do passado considerariam, sem receio, ilusão ou total delírio.

Ninguém que está lendo este livro se mudará para Marte. Todos nós continuaremos a comer grãos básicos cultivados no solo em grandes extensões de terras agrícolas, e não nos arranha-céus imaginados por quem propõe a chamada agricultura urbana. Nenhum de nós viverá em um mundo desmaterializado, que não necessita de serviços naturais insubstituíveis, como a evaporação da água ou a polinização das plantas. Mas suprir essas necessidades existenciais será uma tarefa cada vez mais desafiadora, porque grande parte da humanidade vive nas condições que uma minoria próspera deixou para trás há algumas gerações, e porque a crescente demanda por energia e materiais vem desgastando a biosfera tanto, e tão rápido, que colocamos em risco a capacidade de manter seus fluxos e recursos dentro dos limites compatíveis com seu funcionamento no longo prazo.

Fazendo apenas uma única comparação básica, em 2020 a média anual de fornecimento de energia *per capita* de cerca de 40% da população mundial (3,1 bilhões de pessoas, o que inclui quase todas as pessoas da África Subsaariana) não ultrapassava a taxa alcançada na Alemanha e na França em 1860! Para se aproximar do limiar de um padrão de vida digno, essas 3,1 bilhões de pessoas precisarão pelo menos dobrar — de preferência, triplicar — seu uso de energia *per capita* e, ao fazê-lo, multiplicar seu suprimento de eletricidade, aumentar sua produção de alimentos e

construir infraestruturas urbanas, industriais e de transporte essenciais. Inevitavelmente, essas demandas sujeitarão a biosfera a uma maior degradação.

E como vamos lidar com os desdobramentos das mudanças climáticas? Hoje existe o consenso de que precisamos fazer *alguma coisa* para evitar as diversas consequências muito indesejáveis. Contudo, que tipo de ação, que tipo de transformação comportamental funcionaria melhor? Para aqueles que ignoram as necessidades energéticas e materiais do nosso mundo, que preferem entoar os mantras de soluções verdes para entender como chegamos a este ponto, a receita é fácil: basta descarbonizar — mudar da queima de carbono fóssil para o uso de fontes renováveis de energia. Mas eis o balde de água fria: somos uma civilização movida a combustíveis fósseis, cujos avanços técnicos e científicos, qualidade de vida e prosperidade dependem da combustão de enormes quantidades de carbono fóssil, e não podemos simplesmente abandonar esse fator determinante para nossa existência, nem nas próximas décadas e muito menos em poucos anos.

Hoje, a descarbonização completa da economia global até 2050 só seria concebível à custa de uma recessão econômica global impensável, ou como resultado de transformações extraordinariamente rápidas baseadas em avanços tecnológicos quase milagrosos. Mas como projetar esse cenário se ainda não temos nenhuma estratégia global convincente, prática e acessível, e tampouco os meios técnicos necessários? O que vai acontecer na vida real? A lacuna entre o desejo e a realidade é grande, porém, em uma sociedade democrática, nenhuma disputa de ideias e propostas pode prosseguir de maneira racional sem que todos os lados compartilhem ao menos o mínimo de informações relevantes sobre o mundo real, em vez de usar seus preconceitos para justificar demandas desconectadas das possibilidades físicas.

Este livro é uma tentativa de reduzir esse déficit de compreensão, e de explicar algumas das realidades dominantes mais fundamentais que definem nossa sobrevivência e nossa prosperidade. Meu objetivo não é prever nem delinear cenários incríveis ou deprimentes do que está por vir. Não há necessidade de dar mais espaço para esse gênero popular, mas geralmente equivocado: no longo prazo, há muitos acontecimentos inesperados e muitas interações complexas que nenhum esforço individual ou coletivo pode prever. Também não vou defender interpretações específicas (tendenciosas) da realidade, sejam elas fonte de desespero ou de expectativas exageradas. Não sou pessimista nem otimista: sou um cientista tentando explicar como o mundo realmente funciona e usarei esse conhecimento para que possamos compreender melhor os limites e as oportunidades que teremos no futuro.

É inevitável que uma investigação desse tipo precise ser seletiva, mas cada um dos sete tópicos-chave escolhidos para uma análise mais detalhada tem como critério sua necessidade existencial: não há escolhas fúteis nessa lista. O primeiro capítulo deste livro mostra como as sociedades baseadas no alto consumo de energia vêm sendo cada vez mais dependentes dos combustíveis fósseis e, em particular, da eletricidade, a forma mais flexível de energia. O conhecimento dessa realidade serve como uma necessária correção para os argumentos, comuns hoje em dia (baseados em uma compreensão equivocada de realidades complexas), de que podemos descarbonizar o suprimento global de energia rapidamente, e que levaria apenas duas ou três décadas para passarmos a depender somente de fontes de energia renováveis. Embora estejamos convertendo parcelas cada vez maiores de geração de eletricidade a partir de novas fontes de energia renováveis (solar e eólica, novidades se comparadas à hidroeletricidade, já

consolidada há muito tempo) e colocando mais carros elétricos nas estradas, descarbonizar caminhões, aviões e navios será um desafio muito maior, bem como a produção de materiais essenciais sem depender de combustíveis fósseis.

O segundo capítulo trata da necessidade mais básica para a sobrevivência: a produção do nosso alimento. Seu foco é explicitar que nossos meios de subsistência, do trigo ao tomate e ao camarão, requerem uma grande quantidade, direta e indireta, de insumos de combustíveis fósseis. A consciência dessa nossa dependência fundamental em relação aos combustíveis fósseis leva a uma compreensão realista da nossa necessidade contínua de carbono fóssil: é relativamente fácil gerar eletricidade com turbinas eólicas ou células solares em vez de queimar carvão ou gás natural, mas seria muito mais difícil operar todo o maquinário do campo sem combustíveis fósseis líquidos e produzir todos os fertilizantes e outros agroquímicos sem gás natural e petróleo. Em resumo, por décadas será impossível alimentar adequadamente o planeta sem utilizar combustíveis fósseis como fontes de energia e de matérias-primas.

O terceiro capítulo explica como e por que nossas sociedades são sustentadas por materiais criados pela engenhosidade humana, focando no que chamo de quatro pilares da civilização moderna: amônia, aço, concreto e plásticos. Compreender essa realidade deixa clara a natureza enganosa das mais recentes e populares afirmações sobre a desmaterialização das economias modernas, dominadas por serviços e dispositivos eletrônicos miniaturizados. A redução relativa das necessidades de material por unidade de muitos produtos manufaturados tem sido uma das tendências que definiram os avanços industriais modernos. Mas, em termos absolutos, as demandas materiais têm aumentado mesmo nas sociedades mais ricas do mundo e permanecem muito abaixo de qualquer nível de saturação concebível em países de

baixa renda, onde possuir apartamentos bem construídos, equipamentos de cozinha e ar-condicionado (sem falar nos automóveis) continua sendo um sonho para bilhões de pessoas.

O quarto capítulo é a história da globalização, ou de como o mundo se tornou tão interconectado pelo transporte e pela comunicação. Essa perspectiva histórica mostra como são velhas (melhor dizendo, antigas) as origens desse processo, e como é recente (e global, de fato) o ápice de sua extensão. E um olhar mais atento deixa claro que não há nada de inevitável a respeito do curso futuro desse fenômeno percebido de forma tão ambivalente (muito elogiado, muito questionado e muito criticado). Recentemente, houve alguns recuos nítidos em todo o mundo, além de uma tendência geral ao populismo e ao nacionalismo, mas não está claro até que ponto eles continuarão ou até que ponto essas mudanças serão motivadas por uma combinação de fatores econômicos, políticos e de segurança.

O quinto capítulo oferece uma estrutura realista para julgar os riscos que encaramos: as sociedades modernas conseguiram eliminar ou reduzir muitos riscos que antes eram mortais ou incapacitantes — a pólio e o parto, por exemplo —, mas muitos perigos seguirão conosco para sempre enquanto persistirmos em avaliações de risco inadequadas, ao mesmo tempo subestimando e exagerando os perigos que enfrentamos. Depois de terminar esse capítulo, os leitores terão uma boa avaliação dos riscos relativos a muitas exposições involuntárias e atividades voluntárias comuns — de sofrer uma queda em casa a voar entre continentes; de viver em uma cidade propensa a furacões a saltar de paraquedas. E, fugindo dos absurdos da indústria da dieta, veremos uma gama de opções do que podemos comer para vivermos uma vida mais longa.

O sexto capítulo vai primeiro examinar como as mudanças ambientais podem afetar nossas três necessidades essenciais:

oxigênio, água e comida. O restante do capítulo vai se concentrar no aquecimento global, a mudança que vem dominando as preocupações ambientais recentes e que levou, por um lado, ao surgimento de um novo e quase apocalíptico catastrofismo e, por outro, a negações completas do processo. Em vez de retomar e julgar a contestação a esses argumentos (muitos livros já fizeram isso), vou enfatizar que, ao contrário da impressão geral, esse não é um fenômeno descoberto recentemente: nós entendemos os fundamentos desse processo há mais de 150 anos.

Além disso, estamos cientes do verdadeiro grau de aquecimento associado à duplicação do CO₂ atmosférico há mais de um século, e fomos alertados sobre a natureza inédita (e desenfreada) desse experimento planetário há mais de meio século (medições ininterruptas e precisas de CO₂ começaram em 1958). Mas optamos por ignorar essas explicações, advertências e fatos registrados. Em vez disso, multiplicamos nosso uso de combustíveis fósseis, provocando uma dependência que não será interrompida de forma fácil ou barata. A rapidez com que podemos reverter esse quadro ainda não está clara. Some isso a todas as outras preocupações ambientais, e vamos concluir que não há respostas fáceis à principal questão existencial: a humanidade é capaz de realizar suas aspirações dentro dos limites seguros da nossa biosfera? Mas é fundamental entender os fatos levantados por essa questão. Só assim poderemos enfrentar o problema de maneira eficaz.

No capítulo final, vou olhar para o futuro, mais especificamente para as recentes tendências antagônicas de abraçar o catastrofismo (aqueles que dizem que faltam apenas alguns anos para que a cortina final desça sobre a civilização moderna) e o tecno-otimismo (aqueles que projetam que os poderes da invenção abrirão horizontes ilimitados além dos confins da Terra, transformando todos os desafios terrestres em histórias insignificantes).

Como se pode imaginar, não sigo qualquer um desses pontos de vista, e minha perspectiva não encontrará lugar em nenhuma dessas doutrinas. Não prevejo qualquer ruptura iminente com a história em nenhuma direção: não vejo nenhum desfecho já predeterminado, mas, sim, uma trajetória complicada que depende das nossas escolhas, que estão longe de ser limitadas.

Este livro se baseia em dois fundamentos: nas abundantes descobertas científicas e em meu meio século como pesquisador e autor de livros. O primeiro inclui itens que vão desde contribuições clássicas, como as descobertas pioneiras das conversões de energia e do efeito estufa do século XIX, até as mais recentes avaliações dos desafios globais e das probabilidades de risco. Este livro ambicioso não poderia ter sido escrito sem minhas décadas de estudos interdisciplinares, refinados em meus muitos outros livros. Em vez de recorrer a uma antiga comparação entre raposas e ouriços (o aforismo diz que uma raposa sabe muitas coisas, mas um ouriço sabe de uma grande coisa), tendo a dividir os cientistas modernos entre os que cavam buracos cada vez mais profundos (atualmente o principal caminho para a fama) e os que investigam horizontes mais amplos (hoje em dia um grupo muito reduzido).

Cavar o buraco mais profundo possível e ser o mestre insuperável de uma pequena fatia do fundo visível do céu nunca me atraiu. Sempre preferi investigar tão longe quanto minhas capacidades limitadas me permitiram. Minha principal área de interesse ao longo da vida tem sido os estudos de energia, porque, para um entendimento satisfatório desse vasto campo, é preciso combinar uma compreensão de física, química, biologia, geologia e engenharia com uma atenção à história e aos fatores sociais, econômicos e políticos.

Quase metade dos meus agora mais de quarenta livros, principalmente os mais acadêmicos, tratam de vários aspectos da energia,

desde grandes pesquisas sobre energia geral e a energia ao longo da história até olhares mais atentos para categorias individuais de combustível (petróleo, gás natural, biomassa) e propriedades e processos específicos (densidade de potência, transições de energia). O restante da minha produção expõe minhas buscas interdisciplinares: escrevi sobre fenômenos fundamentais como crescimento, em todas as suas formas naturais e antropogênicas, e risco, meio ambiente global (biosfera, ciclos biogeoquímicos, ecologia global, produtividade fotossintética e colheitas), alimentos e agricultura, materiais (sobretudo aço e fertilizantes), avanços técnicos, o progresso e recuo da manufatura, além de história da Roma Antiga, da América Moderna e da comida japonesa.

É inevitável que este livro — produto do trabalho da minha vida e escrito para o leitor leigo — seja uma continuação da minha longa busca por entender as realidades básicas da biosfera, da história e do mundo que criamos. Ele também faz o que já venho fazendo há décadas: defender fortemente o afastamento das visões extremistas. Os mais recentes (e cada vez mais barulhentos ou irresponsáveis) defensores de tais posições ficarão desapontados: aqui não é o lugar para encontrar lamentos sobre o fim do mundo em 2030, tampouco o deslumbramento com a chegada, mais cedo do que o pensado, dos poderes surpreendentes e transformadores da inteligência artificial. Em vez disso, este livro tenta trazer uma base para uma perspectiva mais comedida e necessariamente agnóstica. Espero que minha abordagem racional e prática ajude os leitores a entender como o mundo de fato funciona e quais são nossas chances de vê-lo oferecer melhores perspectivas para as próximas gerações.

Mas, antes de mergulhar nos temas específicos, tenho um aviso, bem como um possível pedido. Este livro está repleto de números (todos em escala métrica), porque as realidades do mundo moderno não podem ser compreendidas apenas por descrições

qualitativas. Vários deles são, inevitavelmente, muito grandes ou muito pequenos, e tais realidades são tratadas de forma mais adequada em termos de ordens de grandeza, utilizando prefixos válidos em todo o mundo. Se você não tiver uma base nesses assuntos, o apêndice sobre a compreensão dos números, grandes e pequenos, trata disso; portanto, talvez para alguns leitores seja preferível começar este livro pelo final. Caso contrário, vejo você no Capítulo 1 para uma visão mais detalhada e quantitativa das fontes de energia. É um ponto de vista que nunca deveria sair de moda.

1. ENTENDENDO A ENERGIA:

COMBUSTÍVEIS E ELETRICIDADE

Vamos imaginar um cenário positivo de ficção científica: não com viagens para planetas distantes em busca de vida, mas com a Terra e seus habitantes sendo alvos de um monitoramento remoto por uma civilização extremamente avançada, que envia suas sondas para galáxias próximas. Por que é que eles fazem isso? Apenas pela satisfação de uma compreensão sistemática, e talvez para evitar surpresas perigosas, caso o terceiro planeta orbitando em torno de uma estrela comum em uma galáxia espiral se torne uma ameaça, ou ainda caso precisem de um segundo lar. Por isso, tal planeta mantém um monitoramento periódico da Terra.

Vamos imaginar que uma sonda se aproxime do nosso planeta uma vez a cada cem anos e que ela esteja programada para fazer uma segunda passagem (uma inspeção mais detalhada) somente quando detectar um tipo de conversão de energia — a mudança de energia de uma forma para outra — nunca observado antes, ou uma nova manifestação física causada por ela. Em termos físicos fundamentais, qualquer processo, seja chuva, erupção vulcânica, crescimento de plantas, predação animal ou o avanço da inteligência humana pode ser definido como uma sequência de conversões de energia, e, por algumas centenas de milhões de anos após a formação da Terra, as sondas veriam apenas as mesmas exibições variadas, porém monótonas, de erupções vulcânicas, terremotos e tempestades atmosféricas.

MUDANÇAS FUNDAMENTAIS

Os primeiros microrganismos surgem há quase quatro bilhões de anos, mas as sondas que passam não os registram, pois essas formas de vida são raras e permanecem ocultas, associadas a fontes hidrotermais alcalinas no fundo do oceano. A primeira ocasião para um olhar mais atento surge 3,5 bilhões de anos atrás, quando uma sonda de passagem capta os primeiros micróbios fotossintéticos simples e unicelulares em mares rasos: eles absorvem radiação infravermelha — aquela que está logo além do espectro visível — e não produzem oxigênio.¹ Centenas de milhões de anos se passam sem sinais de mudança antes que as cianobactérias comecem a usar a energia da radiação solar visível para converter CO₂ e água em novos compostos orgânicos e liberar oxigênio.²

Trata-se de uma mudança radical, que dará origem à atmosfera oxigenada da Terra, mas muito tempo se passa até que novos organismos aquáticos mais complexos sejam vistos, há 1,2 bilhão de anos, quando as sondas documentam o surgimento e a difusão de algas vermelhas de cor intensa (devido ao pigmento fotossintético ficoeritrina) e de algas marrons, muito maiores. As algas verdes chegam quase meio bilhão de anos depois, e, por causa da nova proliferação de plantas marinhas, as sondas obtêm sensores melhores para monitorar o fundo do mar. Isso compensa, pois, há mais de seiscentos milhões de anos, as sondas fazem outra descoberta histórica: os primeiros organismos feitos de células diferenciadas. Essas criaturas achatadas, macias e adaptadas ao fundo do mar (conhecidas como fauna ediacarana, em referência à região da Austrália onde foram encontradas) são os primeiros animais simples que metabolizam oxigênio e são capazes de se mover, ao contrário das algas, que são apenas empurradas por ondas e correntes.³

Então, as sondas começam a documentar o que são, em termos comparativos, mudanças rápidas: em vez de passar por continentes sem vida e esperar centenas de milhões de anos antes de registrar outra mudança importante, elas começam a captar as ondas de aumento, ápice e declínio no surgimento, difusão e extinção de uma enorme variedade de espécies. Esse período começa com a explosão cambriana de pequenos habitantes do fundo marinho (541 milhões de anos atrás, com o domínio inicial dos trilobitas) até a chegada dos primeiros peixes, anfíbios, plantas terrestres e animais de quatro patas (portanto, excepcionalmente móveis). Extinções periódicas reduzem ou, às vezes, quase eliminam tamanha variedade, e, mesmo há apenas seis milhões de anos, as sondas não encontram nenhum organismo dominando o planeta.⁴ Não muito tempo depois, elas quase não percebem a importância de uma mudança mecânica com enormes implicações energéticas: muitos animais de quatro patas ficam em pé por um momento ou andam de modo desajeitado sobre duas pernas, e há mais de quatro milhões de anos essa forma de locomoção se torna a regra para pequenas criaturas similares a macacos, que começam a passar mais tempo em terra do que nas árvores.⁵

Agora, os intervalos entre os comunicados de algo digno de nota à sua base encolhem de centenas de milhões para apenas centenas de milhares de anos. Por fim, os descendentes desses bípedes primitivos (que nós classificamos como hominídeos, pertencentes ao gênero *Homo*, da longa linhagem de nossos ancestrais) fazem algo que os coloca em um caminho acelerado para o domínio do planeta. Várias centenas de milhares de anos atrás, as sondas detectam o primeiro uso extrassomático de energia — ou seja, externo ao corpo, o que significa qualquer conversão de energia além de digerir alimentos — quando alguns desses seres que caminham eretos dominam o fogo e começam a usá-lo

intencionalmente para cozinhar, ter conforto e segurança.⁶ Essa combustão controlada converte a energia química das plantas em energia térmica e luz, permitindo que os hominídeos comam alimentos que antes eram difíceis de digerir, se aqueçam durante as noites frias e afastem animais perigosos.⁷ Esses são os primeiros passos para moldar e controlar de modo deliberado o ambiente em uma escala sem precedentes.

Essa tendência se intensifica com a próxima mudança digna de nota: a adoção do cultivo agrícola. Cerca de dez milênios atrás, as sondas registram os primeiros fragmentos de plantas cultivadas de forma intencional, à medida que uma pequena parte da fotossíntese total da Terra passa a ser controlada e manipulada por humanos que domesticam — selecionam, plantam, cuidam e colhem — culturas para o próprio benefício (no futuro).⁸ A primeira domesticação de animais ocorre logo em seguida. Antes que isso aconteça, os músculos humanos são os únicos motores primários, isto é, conversores de energia química (alimento) em energia cinética (mecânica) do trabalho. A domesticação de animais para o trabalho, começando com o gado cerca de nove mil anos atrás, fornece a primeira energia extrassomática vinda além dos músculos humanos — os animais são usados para arar os campos, para tirar água de poços, para puxar ou levar cargas e para fornecer transporte individual.⁹ E muito mais tarde vêm os primeiros motores inanimados: as velas há mais de cinco milênios; as rodas-d'água há mais de dois milênios; e os moinhos de vento há mais de mil anos.¹⁰

Depois disso, as sondas não têm muito a observar após a chegada de outro período de (relativa) desaceleração: século após século, há apenas repetição, estagnação ou o lento crescimento e difusão dessas conversões já conhecidas. Nas Américas e na Austrália (sem quaisquer animais de tração nem motores primários mecânicos simples), todo o trabalho antes da chegada dos europeus

é feito por músculos humanos. Em algumas das regiões pré-industriais do Velho Mundo, animais arreados, vento, água corrente ou quedas d'água fornecem energia significativamente para processamento de grãos, prensagem de óleo, moagem e forja, e os animais de tração se tornam indispensáveis para o trabalho pesado no campo (sobretudo para arar, pois a colheita ainda é feita manualmente), transportando mercadorias e sendo usados em guerras.

Mas, nesse ponto, mesmo em sociedades com animais domesticados e motores mecânicos primários, muito trabalho ainda é humano. Usando totais aproximados de animais e pessoas trabalhando no passado e considerando taxas de trabalho diárias típicas com base em medições modernas de esforço físico, minha estimativa é que, seja no início do segundo milênio da Era Comum (em 1000) ou quinhentos anos depois (em 1500, no começo da era moderna), mais de 90% de toda a energia mecânica útil era fornecida pela energia animada, dividida de forma mais ou menos igual entre pessoas e animais, enquanto toda a energia térmica vinha da queima de combustíveis vegetais, principalmente madeira e carvão, mas também palha e esterco seco.

Então, em 1600, a sonda alienígena entra em ação e detecta algo inédito. Em vez de depender apenas da madeira, a sociedade de uma ilha está queimando cada vez mais carvão, um combustível produzido pela fotossíntese dezenas ou centenas de milhões de anos antes, fossilizado pelo calor e pressão durante seu longo armazenamento subterrâneo. As melhores projeções indicam que, na Inglaterra, o carvão como fonte de calor supera o uso de combustíveis de biomassa por volta de 1620, talvez até antes. Em 1650, a queima de carbono fóssil fornece dois terços de todo o calor, fatia que chega a 75% em 1700.¹¹ A Inglaterra começa excepcionalmente cedo: todas as minas de carvão que farão do Reino Unido a principal economia do século XIX já estão produzindo carvão antes de

1640.¹² E então, no início do século XVIII, algumas minas inglesas passam a contar com motores a vapor, os primeiros motores inanimados movidos pela queima de combustível fóssil.

Esses primeiros motores são tão ineficientes que só podem ser utilizados em minas onde o suprimento de combustível é diretamente acessível, sem necessidade de transporte.¹³ Mas, por gerações, o Reino Unido continua sendo a nação mais interessante para a sonda alienígena, por ser um excepcional pioneiro na adoção de novidades. Mesmo em 1800, a extração combinada de carvão em alguns países europeus e nos Estados Unidos é uma pequena fração da produção britânica.

Por volta de 1800, a passagem da sonda registrará que, em todo o planeta, os combustíveis vegetais ainda fornecem mais de 98% de todo o calor e luz usados pelos bípedes dominantes e que os músculos humanos e animais ainda fornecem mais de 90% de toda a energia mecânica necessária na agricultura, na construção civil e na manufatura. No Reino Unido, onde James Watt inventou um motor a vapor aprimorado durante a década de 1770, a empresa Boulton & Watt começa a construir motores cuja potência média é igual à de 25 cavalos. Porém, até 1800, foram vendidas menos de quinhentas dessas máquinas, o que conseguiu reduzir apenas um pouco da potência total fornecida por cavalos arreados e por trabalhadores humanos.¹⁴

Mesmo em 1850, o aumento da extração de carvão na Europa e na América do Norte não fornece mais de 7% de toda a energia como combustível, e quase metade de toda a energia cinética útil vem de animais de tração, cerca de 40% de músculos humanos, e apenas 15% dos três principais motores inanimados: rodas-d'água, moinhos de vento e motores a vapor, que se espalham aos poucos. O mundo de 1850 é muito mais parecido com o de 1700 ou até mesmo com o de 1600 do que com o mundo do ano 2000.

Mas, em 1900, a participação global dos combustíveis fósseis e renováveis e dos motores muda consideravelmente à medida que as fontes de energia modernas (carvão mineral e algum petróleo bruto) passam a fornecer metade de toda a energia primária, e os combustíveis tradicionais (madeira, carvão vegetal, palha), a outra metade. Turbinas hidráulicas em usinas hidrelétricas geram eletricidade primária durante a década de 1880; depois vem a eletricidade geotérmica e, após a Segunda Guerra Mundial, a eletricidade nuclear, solar e eólica (as novas fontes de energia renováveis). Mas, até 2020, mais da metade da eletricidade do mundo ainda será gerada pela queima de combustíveis fósseis, principalmente carvão e gás natural.

Por volta de 1900, os motores inanimados fornecem aproximadamente metade de toda a energia mecânica: motores a vapor movidos a carvão dão a maior contribuição, seguidos por rodas-d'água aprimoradas e novas turbinas hidráulicas (que surgem na década de 1830), moinhos de vento e novas turbinas a vapor (desde o final da década de 1880) e motores de combustão interna (movidos a gasolina, também utilizados pela primeira vez nos anos 1880).¹⁵

Em 1950, os combustíveis fósseis já fornecem quase três quartos da energia primária (ainda dominada pelo carvão), e os motores inanimados — agora com a liderança de motores de combustão interna movidos a gasolina e diesel — são responsáveis por mais de 80% de toda a energia mecânica. E, até o ano 2000, apenas pessoas pobres em países de baixa renda dependerão de combustíveis de biomassa, com madeira e palha fornecendo apenas cerca de 12% da energia primária do mundo. Os motores primários animados detêm apenas 5% da energia mecânica, pois os esforços humanos e o trabalho dos animais de tração são quase totalmente substituídos por máquinas movidas a líquidos ou por motores elétricos.

Durante os dois últimos séculos, as sondas alienígenas terão testemunhado uma rápida substituição global das fontes de energia primária, acompanhada pela expansão e diversificação do suprimento de energia fóssil, e também pelo surgimento, adoção e crescimento não menos rápidos da capacidade de novos motores inanimados — primeiro os motores a vapor movidos a carvão, depois os motores de combustão interna (pistões e turbinas). A visita mais recente da sonda veria uma sociedade verdadeiramente global, construída e definida por conversões massivas de carbono fóssil em unidades estacionárias ou móveis, implantadas em todos os lugares, exceto em algumas regiões desabitadas do planeta.

USOS MODERNOS DA ENERGIA

Que diferença fez essa mobilização de energias extrassomáticas? Em geral, a oferta global de energia primária se refere à produção total (bruta), mas fica mais fácil entender quando olhamos para a energia que está realmente disponível para conversão em formas úteis. Para fazer isso, precisamos subtrair as perdas pré-consumo (durante a triagem e limpeza do carvão, refino de petróleo bruto e processamento de gás natural), o uso não energético (sobretudo como matéria-prima para indústrias químicas, como óleos lubrificantes para máquinas, de bombas até turbinas de aeronaves, e como materiais de pavimentação) e as perdas durante a transmissão de eletricidade. Com esses ajustes — e arredondando bastante, para evitar a impressão de um número preciso sem fundamento —, meus cálculos mostram um aumento de sessenta vezes no uso de combustíveis fósseis durante o século XIX, um aumento de dezesseis vezes durante o século XX e um aumento de cerca de 1.500 vezes ao longo dos últimos 220 anos.¹⁶

Essa dependência crescente em relação aos combustíveis fósseis é o fator mais importante para explicar os avanços da civilização moderna, além de nossas preocupações com a vulnerabilidade do suprimento e os impactos ambientais da queima desses combustíveis. Na realidade, o ganho de energia foi substancialmente maior do que as 1.500 vezes que acabei de mencionar, porque devemos levar em conta o aumento simultâneo nas eficiências médias de conversão.¹⁷ Em 1800, a combustão de carvão em fogões e caldeiras para produzir calor e água quente não era mais do que 25% a 30% eficiente, e apenas 2% do carvão consumido pelas máquinas a vapor era convertido em trabalho útil, resultando em uma eficiência de conversão global que não passa dos 15%. Um século depois, fogões, caldeiras e motores aprimorados aumentaram a eficiência geral para quase 20%, e, no ano 2000, a taxa média de conversão era de cerca de 50%. Dessa forma, o século XX viu um ganho de quase quarenta vezes em energia útil, e, desde 1800, o aumento foi de cerca de 3,500 vezes.

Para ter uma visão ainda mais clara da magnitude de tais mudanças, devemos expressar essas taxas em termos *per capita*. A população global aumentou de um bilhão em 1800 para 1,6 bilhão em 1900 e 6,1 bilhões no ano 2000; portanto, a oferta de energia útil aumentou (com todos os valores em gigajoules (GJ) *per capita*) de 0,05 em 1800 para 2,7 em 1900 e para cerca de 28 no ano 2000. A ascensão da China no cenário mundial pós-2000 foi a principal razão para um novo aumento da taxa global para cerca de 34 GJ *per capita* até 2020. Um habitante médio da Terra hoje tem à sua disposição quase setecentas vezes mais energia útil do que seus ancestrais tinham no início do século XIX.

Além disso, dentro do tempo de vida das pessoas nascidas logo após a Segunda Guerra Mundial, a taxa mais do que triplicou, de cerca de 10 para 34 GJ *per capita* entre 1950 e 2020. Traduzindo a última taxa em medidas equivalentes mais fáceis de entender, é

como se um terráqueo médio tivesse à sua disposição, todos os anos, cerca de 800 quilogramas (0,8 tonelada, quase seis barris) de petróleo bruto ou aproximadamente 1,5 tonelada de carvão betuminoso de boa qualidade. Em termos de trabalho físico, é como se sessenta adultos estivessem trabalhando sem parar, dia e noite, para cada pessoa média. Para os habitantes de países mais ricos, esse número hipotético de adultos trabalhando constantemente ficaria entre duzentos e 240, a depender do país. Em média, os seres humanos hoje em dia têm quantidades sem precedentes de energia à sua disposição.

As consequências disso no que diz respeito a esforço humano, horas de trabalho físico, tempo de lazer e padrão de vida geral são óbvias. Uma abundância de energia útil é a base que explica todos os ganhos — por exemplo, alimentação melhor, viagens em grande escala, mecanização da produção e transporte à comunicação eletrônica pessoal instantânea — que se tornaram a regra, e não exceções, em todos os países ricos. As mudanças recentes em escala nacional variam muito: como esperado, são menores para os países de alta renda, cujo uso de energia *per capita* já era relativamente alto havia um século, com um aumento maior nas nações que viram a modernização mais acelerada de suas economias desde 1950, sobretudo Japão, Coreia do Sul e China. Entre 1950 e 2020, os Estados Unidos quase dobraram a energia útil *per capita* fornecida por combustíveis fósseis e eletricidade primária (para cerca de 150 GJ); no Japão, a taxa mais do que quintuplicou (para quase 80 GJ per capita), e a China viu um aumento surpreendente de mais de 120 vezes (para quase 50 GJ per capita).¹⁸

Traçar a trajetória da implantação de energia útil é muito esclarecedor, pois a energia não é só mais um componente nas estruturas complexas da biosfera, sociedades humanas e suas economias, nem mais uma variável nas intrincadas equações que

determinam a evolução desses sistemas interativos. As conversões de energia são a própria base da vida e da evolução. A história moderna pode ser vista como uma sequência extraordinariamente rápida de transições para novas fontes de energia, e o mundo moderno é o resultado cumulativo dessas conversões.

Os físicos foram os primeiros a reconhecer a importância fundamental da energia nos assuntos humanos. Em 1886, Ludwig Boltzmann, um dos pais da termodinâmica, falou sobre energia livre — a energia disponível para conversões — como o *Kampfobjekt* (objeto de luta) pela vida, que, em última análise, depende da radiação solar recebida.¹⁹ Erwin Schrödinger, ganhador do Prêmio Nobel de Física em 1933, resumiu a base da vida: “O alimento de um organismo é entropia negativa” (entropia negativa ou negentropia = energia livre).²⁰ Durante a década de 1920, seguindo essa visão fundamental dos físicos do século XIX e início do século XX, o matemático e estatístico norte-americano Alfred Lotka concluiu que os organismos que melhor capturam a energia disponível detêm a vantagem evolutiva.²¹

No início dos anos 1970, o ecologista norte-americano Howard Odum explicou como “todo progresso se deve a subsídios especiais de energia, e o progresso evapora sempre e onde quer que estes sejam removidos”.²² Mais recentemente, o físico Robert Ayres, de modo insistente, reforçou em sua obra o papel central da energia em todas as economias: “o sistema econômico é em essência um sistema para extrair, processar e transformar a energia enquanto recurso em energia incorporada em produtos e serviços.”²³ Em outras palavras, a energia é a única moeda verdadeiramente universal e nada (das rotações galácticas à vida efêmera dos insetos) pode ocorrer sem suas transformações.²⁴

Mesmo diante de todas essas realidades que podem ser facilmente confirmadas, é difícil entender por que o campo da economia moderna, com suas explicações e preceitos e cujos profis-

sionais exercem mais influência nas políticas públicas do que quaisquer outros especialistas, ignora tanto a energia. Como Ayres observou, a economia não só carece de uma consciência sistemática da importância da energia para o processo físico de produção, mas também considera “que a energia não importa (muito) porque a fatia do custo da energia na economia é tão pequena que pode ser ignorada... como se a produção fosse resultado apenas do trabalho e do capital... ou como se a energia fosse meramente uma forma de capital feito pelo homem capaz de ser produzida (e não extraída) por trabalho e capital”.²⁵

Os economistas modernos não recebem suas verbas e premiações por se preocuparem com a energia, e as sociedades modernas só dão atenção a isso quando o fornecimento de qualquer forma comercial importante de energia é ameaçado e seus preços disparam. O Ngram Viewer, uma ferramenta do Google que registra a popularidade de termos que apareceram em fontes impressas entre 1500 e 2019, ilustra esse argumento: durante o século XX, a frequência do termo “preço da energia” permaneceu bastante insignificante até um pico repentino no início dos anos 1970 — causado pela quintuplicação dos preços do petróleo bruto pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (Opep), cujos detalhes veremos mais adiante neste capítulo — e atingiu seu auge no início dos anos 1980. Depois que os preços caíram, seguiu-se um declínio igualmente acentuado, e, em 2019, o termo “preço da energia” era menos mencionado que em 1972.

Não é possível compreender como o mundo funciona de fato sem um mínimo de alfabetização energética. Neste capítulo, explicarei primeiro que pode não ser fácil definir o que é energia, mas é fácil não cometer o erro comum de confundir-la com potência. Veremos como diferentes formas de energia (com suas vantagens e desvantagens específicas) e diferentes densidades (energia armazenada por unidade de massa ou volume, funda-

mental para seu armazenamento e portabilidade) afetaram estágios distintos de desenvolvimento econômico, e vou trazer algumas avaliações realistas dos desafios enfrentados pela transição para sociedades que dependem cada vez menos do carbono fóssil. Como veremos, nossa civilização depende tanto de combustíveis fósseis que a próxima transição levará muito mais tempo do que pensa a maioria das pessoas.

O QUE É ENERGIA?

Como definimos essa grandeza fundamental? A etimologia grega é clara. Escrevendo em sua *Metafísica*, Aristóteles combinou *ἐν* (dentro) com *ἐργον* (trabalho) e concluiu que todo objeto é mantido por *ἐνέργεια*.²⁶ Essa compreensão envolvia todos os objetos com potencial de ação, movimento e mudança — uma boa caracterização de um potencial a ser transformado em outras formas, seja levantando, lançando ou queimando.

Pouco mudou nos dois milênios seguintes. Em certo momento, Isaac Newton estabeleceu leis físicas fundamentais envolvendo massa, força e momento, e sua segunda lei do movimento tornou possível derivar as unidades básicas de energia. Usando unidades científicas modernas, 1 joule é a força de 1 newton, isto é, a massa de 1 quilograma acelerada por 1 m/s^2 atuando em uma distância de 1 metro.²⁷ Mas essa definição se refere apenas à energia cinética (mecânica) e certamente não traz uma compreensão intuitiva da energia em todas as suas formas.

Nossa compreensão prática de energia foi muito ampliada durante o século XIX graças aos diversos experimentos da época com combustão, calor, radiação e movimento.²⁸ Isso levou àquela que ainda é a definição mais comum de energia: “a capacidade de realizar trabalho”, uma definição válida apenas quando o termo

“trabalho” significa não apenas algum trabalho investido, mas, como disse um dos principais físicos da época, um “ato físico geral de produzir uma mudança de configuração em um sistema em oposição a uma força que resiste a essa mudança”.²⁹ Mas isso também é muito newtoniano e pouco intuitivo.

Não há melhor maneira de responder à pergunta “O que é energia?” do que recorrer a um dos físicos mais perspicazes do século XX: Richard Feynman. Com sua mente multifacetada, que, em suas famosas *Lições de física*, enfrentou o desafio fazendo uso de seu estilo direto, Feynman enfatiza que “a energia tem um grande número de *diferentes formas*, e há uma fórmula para cada uma. São elas: energia gravitacional, energia cinética, energia térmica, energia elástica, energia elétrica, energia química, energia radiante, energia nuclear, energia de massa”.

E então temos esta encantadora, mas inquestionável, conclusão:

É importante perceber que, na física de hoje, não temos conhecimento sobre o que *é* energia. Não temos a noção de que a energia vem em pequenas gotas de uma quantidade definida. Não é assim que funciona. No entanto, existem fórmulas para calcular algumas grandezas numéricas, e, quando somamos tudo, chegamos... sempre ao mesmo número. É uma coisa abstrata, pois não nos esclarece o mecanismo nem as *razões* daquelas várias fórmulas.³⁰

Assim tem sido. Podemos usar fórmulas para calcular, com muita precisão, a energia cinética de uma flecha em movimento ou de um avião a jato, ou a energia potencial de uma grande pedra que está prestes a cair de uma montanha, ou a energia térmica liberada por uma reação química ou pela energia (radiante) da luz de uma vela bruxuleante ou de um laser pontiagudo — mas não podemos reduzir essas energias a uma única entidade descrita facilmente em nossa cabeça.

Entretanto, essa natureza instável da energia não incomodou os exércitos de especialistas de plantão: desde o início dos anos 1970, quando a energia se tornou um tema importante do discurso público, eles opinam sobre questões energéticas com ignorância e entusiasmo. A energia está entre os conceitos mais evasivos e incompreendidos, e uma percepção equivocada das realidades básicas levou a muitas ilusões e desilusões. Como vimos, a energia existe em várias formas, e, para torná-la útil, precisamos converter uma forma dela em outro tipo. Mas a regra tem sido tratar as muitas faces dessa abstração como uma coisa só, como se diferentes formas de energia fossem facilmente substituíveis.

Algumas dessas substituições são até fáceis e benéficas. A substituição das velas (a energia química da cera transformada em energia radiante) por lâmpadas elétricas alimentadas pela eletricidade gerada por turbinas a vapor (a energia química dos combustíveis transformada primeiro em calor e depois em energia elétrica, que é então transformada em energia radiante) trouxe muitos benefícios óbvios (um tipo de energia mais segura, mais luminosa, mais barata e mais confiável). A substituição de motores ferroviários movidos a vapor e diesel por motores com acionamento elétrico permitiu um transporte mais barato, mais limpo e mais rápido: todos os elegantes trens de alta velocidade são elétricos. Mas muitas substituições desejáveis ainda são bastante caras, momentaneamente inacessíveis ou impossíveis nas escalas necessárias — não importa o quanto seus defensores exaltem suas virtudes.

Os carros elétricos são um exemplo comum da primeira categoria: hoje disponíveis para pronta-entrega, os melhores modelos são bastante confiáveis, porém, em 2020, ainda eram mais caros do que os veículos de tamanho semelhante movidos por motores de combustão interna. Na segunda categoria, como vou detalhar

no próximo capítulo, a síntese da amônia necessária para produzir fertilizantes nitrogenados hoje é muito dependente do gás natural como fonte de hidrogênio. O hidrogênio poderia ser produzido pela decomposição (eletrólise) da água, mas esse processo continua sendo quase cinco vezes mais caro do que a extração do elemento a partir do metano, abundante e barato — e ainda não criamos uma indústria de hidrogênio em grande escala. E o voo comercial de longa distância movido a eletricidade (equivalente a um Boeing 787 movido a querosene de Nova York a Tóquio) é o excelente exemplo da terceira categoria: como veremos, essa é uma conversão de energia que permanecerá fora da realidade ainda por muito tempo.

A primeira lei da termodinâmica afirma que nenhuma energia é perdida durante as conversões: seja de energia química a energia química ao digerir alimentos; de química a mecânica ao mover os músculos; de química a térmica na queima de gás natural; de térmica a mecânica ao girar uma turbina; de mecânica a elétrica em um gerador; ou de elétrica a eletromagnética, como a luz que ilumina a página que você está lendo. No entanto, todas as conversões de energia acabam resultando em calor dissipado em baixa temperatura: nenhuma energia foi perdida, mas sua utilidade, sua capacidade de realizar trabalho útil, desapareceu (essa é a segunda lei da termodinâmica).³¹

Todas as formas de energia podem ser medidas nas mesmas unidades: joule é a unidade científica; calorias são usadas com frequência em estudos nutricionais. No próximo capítulo, quando detalharmos os enormes subsídios energéticos destinados à produção moderna de alimentos, encontraremos a realidade existencial das diferentes qualidades energéticas. A produção de frango requer uma quantidade de energia cujo total é várias vezes superior ao conteúdo energético da carne comestível. Embora possamos calcular a razão da contribuição em termos de quanti-

dades de energia (entrada/saída de joules), há, claro, uma diferença fundamental entre as entradas e as saídas: não podemos digerir óleo diesel ou eletricidade, enquanto a carne magra do frango é um alimento quase perfeitamente digerível, contendo proteínas de alta qualidade, um macronutriente indispensável que não pode ser substituído por uma quantidade igual de energia de lipídios ou carboidratos.

Existem muitas opções de conversões de energia disponíveis, algumas bem melhores que outras. A alta densidade de energia química no querosene e no diesel é ótima para voos e transportes de carga intercontinentais, mas, se você quiser que seu submarino permaneça submerso enquanto cruza o oceano Pacífico, a melhor escolha é fazer a fissão de urânio enriquecido em um pequeno reator para produzir eletricidade.³² Em terra, os grandes reatores nucleares são os produtores mais confiáveis de eletricidade: alguns deles mantêm a geração 90% a 95% do tempo, em comparação a aproximadamente 45% do tempo para as melhores turbinas eólicas em alto-mar e 25% para as células fotovoltaicas, mesmo no mais ensolarado dos climas, enquanto os painéis solares da Alemanha produzem eletricidade em apenas cerca de 12% do tempo.³³

Isso é física ou engenharia elétrica em sua forma mais simples, mas é notável a frequência com que essas realidades são ignoradas. Outro erro comum é confundir energia com potência, o que acontece de modo ainda mais frequente. Isso revela uma ignorância a respeito da física básica que, lamentavelmente, não se limita aos leigos. A energia é uma grandeza escalar, que na física é uma quantidade descrita apenas por sua magnitude; volume, massa, densidade e tempo são outras grandezas escalares recorrentes. A potência mede a energia por unidade de tempo, portanto, é uma taxa (na física, uma taxa mede a mudança, em geral por tempo). Os estabelecimentos que geram eletricidade são

muitas vezes chamados de usinas de potência, mas a potência é simplesmente a taxa de produção de energia ou de uso de energia. A potência é igual à energia dividida pelo tempo: em unidades científicas, é dada em watts = joules/segundos. A energia é igual à potência multiplicada pelo tempo: joules = watts × segundos. Se você acender uma pequena vela como oferenda em uma igreja, ela pode queimar por quinze horas, convertendo a energia química da cera em calor (energia térmica) e luz (energia eletromagnética) com uma potência média de quase 40 watts.³⁴

Infelizmente, até mesmo publicações de engenharia costumam escrever sobre uma “usina de potência gerando 1.000 MW de eletricidade”, no entanto isso é impossível. Uma estação geradora pode ter potência instalada (nominal) de 1.000 megawatts — isto é, pode produzir eletricidade a essa taxa —, mas, ao fazê-lo, geraria 1.000 megawatts-hora ou, em unidades científicas básicas, 3,6 trilhões de joules em uma hora (1.000.000.000 watts × 3.600 segundos). De forma análoga, a taxa metabólica basal de um homem adulto (a energia necessária em repouso absoluto para executar as funções essenciais do corpo) é de cerca de 80 watts, ou 80 joules por segundo; deitado de bruços o dia todo, um homem de 70 quilos ainda precisaria de cerca de 7 megajoules (80 × 24 × 3.600) de energia alimentar, ou cerca de 1.650 quilocalorias, para manter a temperatura corporal, dar energia a seu coração e executar inúmeras reações enzimáticas.³⁵

Mais recentemente, uma compreensão equivocada da energia fez com que os proponentes de um novo mundo verde pedissem, de forma ingênua, uma troca quase instantânea dos combustíveis fósseis — abomináveis, poluentes e finitos — para a eletricidade solar — superior, verde e sempre renovável. Mas hidrocarbonetos líquidos refinados de petróleo bruto (gasolina, querosene de aviação, óleo diesel, óleo pesado residual) têm a densidade de energia mais alta de todos os combustíveis comuns disponíveis e,

portanto, são muito mais adequados para dar energia a todos os meios de transporte. A seguir, uma escala de densidade, com todas as taxas em gigajoules por tonelada: madeira seca, 16; carvão betuminoso, 24-30, a depender da qualidade; querosene e diesel, cerca de 46. Em termos de volume (todas as taxas em gigajoules por metro cúbico), as densidades de energia são apenas cerca de 10 para madeira, 26 para carvão bom, 38 para querosene. O gás natural (metano) contém apenas 35 MJ/m³, ou menos de 1/1.000 da densidade do querosene.³⁶

As implicações da densidade de energia, bem como das propriedades físicas dos combustíveis, para o transporte são óbvias. Os transatlânticos movidos a motores a vapor não queimavam madeira, porque, mantendo as demais condições, a lenha teria consumido 2,5 vezes o volume necessário do carvão betuminoso de boa qualidade para uma travessia transatlântica (e seria pelo menos 50% mais pesada), reduzindo bastante a capacidade do navio de transportar pessoas e mercadorias. Não poderia existir nem um voo movido a gás natural, pois a densidade de energia do metano é três ordens de magnitude menor que a do querosene de aviação, e tampouco um voo movido a carvão — a diferença de densidade não é tão grande, mas o carvão não fluiria do tanque nas asas até os motores.

As vantagens dos combustíveis líquidos vão muito além da alta densidade energética. Ao contrário do carvão, o petróleo bruto é muito mais fácil de ser extraído (não há necessidade de enviar mineradores para o subsolo nem de destruir paisagens com grandes minas abertas), armazenado (em tanques ou no subterrâneo — devido à densidade de energia muito superior do petróleo, qualquer espaço fechado pode armazenar 75% mais energia como combustível líquido do que como carvão) e distribuído (entre continentes, por navios-tanque e por oleodutos, o modo mais seguro de transferência de massa entre longas distâncias),

portanto, está prontamente disponível conforme a demanda.³⁷ O petróleo bruto precisa ser refinado para separar a complexa mistura de hidrocarbonetos em combustíveis específicos, dos quais a gasolina é o mais leve. O óleo combustível residual é o mais pesado, mas esse processo produz combustíveis mais valiosos para usos específicos e também dá origem a produtos não combustíveis indispensáveis, como lubrificantes.

Os lubrificantes são necessários para minimizar o atrito em tudo, dos enormes motores turbofan em jatos de fuselagem larga até rolamentos em miniatura.³⁸ Em todo o mundo, o setor automotivo, agora com mais de 1,4 bilhão de veículos nas estradas, é o maior consumidor, seguido pelo uso na indústria, cujos maiores mercados são o têxtil, o de energia, o de produtos químicos e o de processamento de alimentos, e em embarcações oceânicas. O uso anual desses compostos hoje ultrapassa 120 megatons (para comparação, a produção global de todos os óleos comestíveis, de azeite a óleo de soja, hoje é de cerca de 200 megatons por ano), e, como as alternativas disponíveis são mais caras — lubrificantes sintéticos feitos de óleos mais simples, mas ainda geralmente à base de compostos, e não derivados diretamente do petróleo bruto —, a demanda vai crescer ainda mais à medida que essas indústrias se expandirem em todo o mundo.

Outro produto derivado do petróleo bruto é o asfalto. A produção global desse material preto e pegajoso é hoje da ordem de 100 megatons, com 85% indo para pavimentação (misturas asfálticas quentes e mornas) e a maior parte do restante para cobertura de casas.³⁹ E os hidrocarbonetos ainda têm outro uso não combustível indispensável: como matéria-prima para muitas sínteses químicas diferentes (sobretudo etano, propano e butano de líquidos de gás natural), que produzem uma variedade de fibras sintéticas, resinas, adesivos, corantes, tintas e revestimentos, detergentes e pesticidas, todos vitais de inúmeras maneiras para o

nosso mundo moderno.⁴⁰ Dadas essas vantagens e benefícios, era previsível — inevitável, na verdade — que nossa dependência em relação ao petróleo bruto aumentasse conforme o produto se tornasse mais acessível e pudesse ser entregue de forma confiável em escala global.

A mudança do carvão para o petróleo bruto levou gerações para ser realizada. A extração comercial de petróleo bruto começou durante a década de 1850 na Rússia, no Canadá e nos Estados Unidos. Os poços eram rasos, perfurados com o antigo método de percussão envolvendo o levantamento e lançamento de uma pesada broca cortante, sua produtividade diária era baixa, e o querosene para lamparinas (que substituiu o óleo de baleia e as velas) era o principal produto do refino simples de petróleo bruto.⁴¹ Novos mercados para derivados de petróleo só foram criados com a ampla adoção de motores de combustão interna: primeiro as máquinas a gasolina (usando o ciclo de Otto) para carros, ônibus e caminhões; depois as máquinas mais eficientes de Rudolf Diesel, abastecidas por uma fração mais pesada e barata (chamada de, isso mesmo, diesel) e usada principalmente para navios, caminhões e máquinas pesadas (para saber mais sobre esse assunto, veja o Capítulo 4 sobre globalização). A difusão desses novos motores foi lenta, e os Estados Unidos e o Canadá foram os dois únicos países com altas taxas de propriedade de automóveis antes da Segunda Guerra Mundial.

O petróleo bruto se tornou um combustível global e, a partir de determinado momento, a fonte de energia primária mais importante do mundo, graças às descobertas de campos petrolíferos gigantes no Oriente Médio e na União Soviética — e, é claro, também graças ao surgimento dos navios-petroleiros. Alguns dos reservatórios gigantes do Oriente Médio foram perfurados pela primeira vez nas décadas de 1920 e 1930 (Gachsaran no Irã e Kirkuk no Iraque, em 1927, Burgan no Kuwait, em 1937), mas a maioria

deles só foi descoberta após a Segunda Guerra, incluindo Ghawar (o maior do mundo), em 1948, Safaniya, em 1951 e Manifa, em 1957, todos na Arábia Saudita. As maiores descobertas soviéticas foram em 1948 (Romashkino, na bacia Volga-Ural) e em 1965 (Samotlor, na Sibéria Ocidental).⁴²

Cientista renomado faz análise fundamental sobre o que a ciência e a tecnologia modernas — que tornam possível a vida no século XXI — são ou não capazes de fazer.

Nunca tivemos tanta informação na palma da mão, e, ainda assim, a maioria de nós não faz ideia de como as coisas realmente funcionam. Este livro explica sete das realidades fundamentais para nossa sobrevivência e prosperidade. Da produção de energia à de alimentos, passando pelo mundo material e sua globalização, até os riscos que enfrentam o meio ambiente e seu futuro, *Como o mundo funciona* é um necessário choque de realidade — porque, para que possamos lidar bem com nossos problemas, precisamos estar cientes dos fatos.

Neste livro ambicioso e provocante, vemos, por exemplo, que a globalização não é inevitável — em 2020, ficou evidente que era uma ingenuidade permitir que 70% das luvas de borracha do mundo inteiro viessem de uma única fábrica — e que nossas sociedades têm sido cada vez mais dependentes de combustíveis fósseis, a ponto de qualquer promessa de descarbonização até 2050 não passar de um conto de fadas. Por exemplo, cada tomate cultivado em estufa e comprado em supermercado tem o equivalente a cinco colheres de diesel embutidas em sua produção, e ainda não conseguimos fabricar aço, cimento ou plástico em escala sem grandes emissões de carbono.

Com base nos mais recentes dados científicos, Smil responde à pergunta mais profunda de nossa época: estamos condenados ou há luz no fim do túnel? Este guia interdisciplinar aponta as falhas nessas duas teorias e, dotado de um olhar quantitativo para o mundo, revela as verdades ocultas que mudam nosso jeito de enxergar o passado, o presente e o futuro incerto.

“Um livro acessível que nos oferece as bases necessárias para lidarmos com nossos desafios mais complexos.”

— **Bill Gates**

SAIBA MAIS:

<https://intrinseca.com.br/livro/como-o-mundo-funciona/>