

Vaclav Smil
Energia e Civilização
Uma História

Traduzido por **Manuel Santos Marques**

Índice

Prefácio e agradecimentos	11
1 Energia e sociedade	13
Fluxos, reservas e controles	16
Conceitos e unidades de medida	22
Complexidades e advertências	32
2 Energia na pré-história	39
Sociedades forrageiras	47
Origens da agricultura	64
3 Agricultura tradicional	73
Semelhanças e peculiaridades	77
Trabalho do campo	78
O predomínio dos cereais	82
Ciclos de colheita	90
Vias para a intensificação	93
Animais de tracção	94
Irrigação	106
Fertilização	113
Diversidade de culturas	118
Persistência e inovação	120
Antigo Egito	121
China	124
Culturas mesoamericanas	131
Europa	135
América do Norte	143

Os limites da agricultura tradicional	149
Concretizações	150
Nutrição	158
Limites	160
4 Forças motrizes e combustíveis pré-industriais	171
Forças motrizes	176
Força humana e animal.	177
Força hidráulica	195
Força eólica	208
Combustíveis de biomassa	215
Madeira e carvão vegetal	217
Resíduos vegetais e esterco	222
Necessidades domésticas	224
Preparação de alimentos.	226
Calor e luz	229
Transporte e construção.	233
Deslocação terrestre	233
Embarcações a remos e à vela.	246
Edifícios e estruturas	256
Metalurgia	270
Metais não-ferrosos.	271
Ferro e aço	275
Actividade bélica	282
Energias de forças vivas.	283
Explosivos e armas de fogo.	290
5 Combustíveis fósseis, electricidade primária e renováveis	293
A grande transição	297
Os começos e a difusão da extracção de carvão	298
Do carvão vegetal ao coque	305
Motores a vapor	306
Petróleo e motores de combustão interna.	319
Electricidade	332
Inovações técnicas	347
Carvões	352
Hidrocarbonetos.	357
Electricidade	364

Energias renováveis	369
Forças motrizes no transporte	375
6 Civilização alimentada a combustíveis fósseis	381
Energia sem precedentes e os seus usos	383
Energia na agricultura	393
Industrialização	402
Transporte	417
Informação e comunicação	427
Crescimento económico	440
Consequências e preocupações	448
Urbanização	449
Qualidade de vida	454
Implicações políticas	465
Armas e guerras	470
Mudanças ambientais	486
7 A energia na história mundial	491
Os grandes padrões no uso da energia	492
Eras e transições da energia	494
Tendências a longo prazo e custos em queda	506
O que não mudou?	517
Entre o determinismo e a escolha	530
Imperativos das necessidades e usos da energia	531
A importância dos controlos	540
Os limites das explicações pela energia	546
Adenda	563
Medidas básicas	563
Unidades científicas e os seus múltiplos e submúltiplos	566
Cronologia dos desenvolvimentos relacionados com a energia	567
A potência na história	577
Notas bibliográficas	581
Bibliografia	585
Índice onomástico	647
Índice analítico	651

1 Energia e sociedade

A energia é a única moeda universal: uma das suas muitas formas tem de ser transformada para que algo possa ser feito. As manifestações universais dessas transformações variam das gigantescas rotações de galáxias às reacções termonucleares nas estrelas. Na Terra, variam das forças modeladoras da tectónica de placas, que fracturam fundos oceânicos e erguem novas cordilheiras de montanhas, até impactes erosivos acumulados de gotas da chuva minúsculas (como sabiam os Romanos, *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo*: uma gota de chuva escava uma pedra, não pela força, mas pela persistência). A vida na Terra – que, não obstante décadas de tentativas para captar sinais extraterrestres dotados de sentido, é ainda a única forma de vida que conhecemos no universo – seria impossível sem a conversão fotossintética da energia solar em fitomassa (biomassa vegetal). Os seres humanos dependem desta transformação para sobreviver e de muitos mais fluxos de energia para a existência civilizada que levam. Como escreveu Richard Adams (1982, 27):

Podemos ter pensamentos à solta, mas se não dispusermos dos meios para os converter em acção, não irão além de pensamentos [...] A história actua de maneiras imprevisíveis. Todavia, os acontecimentos na história adquirem necessariamente uma estrutura ou organização que tem de estar em concordância com os seus componentes energéticos.

A evolução das sociedades humanas resultou em populações mais numerosas, uma complexidade crescente de arranjos sociais e produtivos, e qualidade de vida enriquecida para um número cada vez maior de pessoas. De uma perspectiva biofísica fundamental,

tanto a evolução humana pré-histórica como o curso da história podem ser vistos como a busca do domínio sobre maiores reservas e fluxos de formas de energia mais concentradas e mais versáteis, e a sua conversão, por meios mais acessíveis, com custos menores e maior eficiência, em calor, luz e movimento. Esta tendência foi generalizada por Alfred Lotka (1880-1949), matemático, químico e estatístico norte-americano, na sua lei da máxima energia: «Em cada caso considerado, a selecção natural actuará de modo a aumentar a massa total do sistema orgânico, a aumentar o nível de circulação de matéria através do sistema e a aumentar o fluxo total de energia que atravessa o sistema, desde que esteja presente um resíduo não utilizado de matéria e energia disponível» (Lotka 1922, 148).

A história de sucessivas civilizações, os maiores e mais complexos organismos da biosfera, seguiu este rumo. A dependência humana de fluxos crescentes de energia pode ser vista como uma continuação inevitável da evolução orgânica. Wilhelm Ostwald (1853-1932, laureado com o Prémio Nobel da Química em 1909 pelo seu trabalho sobre a catálise) foi o primeiro cientista a alargar explicitamente «a segunda lei da energética a toda e qualquer acção e, em particular, à totalidade das acções humanas. [...] Nem todas as energias estão prontas para esta transformação, somente determinadas formas que receberam por isso o nome de energias livres. [...] A energia livre é assim o capital consumido por todas as criaturas de todos os tipos e pela sua conversão tudo se processa» (Ostwald 1912, 83). Isto levou-o a formular o seu imperativo energético: «*Vergeude keine Energie, verwerte sie*» – «Não desperdiçar nenhuma energia, torná-la útil» (Ostwald 1912, 85).

Três citações ilustram como os discípulos de Ostwald têm vindo a reformular as suas conclusões e como alguns deles tornaram a ligação entre a energia e todos os assuntos humanos ainda mais explícita, no sentido determinístico. No começo da década de 1970, Howard Odum (1924-2002) propôs uma variação do tema-chave de Ostwald: «A disponibilidade de fontes de potência determina a quantidade de trabalho que pode existir, e o domínio desses fluxos de potência determina o poder nas actividades do homem e a sua influência relativa sobre a natureza» (Odum 1971, 43). Nos últimos anos da década de 80 do século xx, Ronald Fox concluía uma obra sobre a energia

na evolução escrevendo que «produziu-se um aperfeiçoamento nos mecanismos culturais com cada aperfeiçoamento na captação do fluxo de energia» (Fox 1988, 166).

Não é preciso ser-se cientista para discernir a ligação entre provisão de energia e progressos sociais. Veja-se o que escreveu Eric Blair (George Orwell, 1903-1950) no ano de 1937, no segundo capítulo de *O Caminho para Wigan Pier*, depois da sua visita a uma mina de carvão subterrânea:

A nossa civilização, salvo o respeito devido a Chesterton, está fundada no carvão, mais completamente do que se tem consciência até ao momento em que se pára para pensar nisso. Todas as máquinas que nos mantêm vivos, e as máquinas que produzem máquinas, estão directa ou indirectamente dependentes do carvão. No metabolismo do mundo ocidental, o mineiro de carvão vem logo a seguir em importância ao homem que lavra o solo. É uma espécie de cariátide sobre cujos ombros assenta quase tudo o que não está encardido. Por esta razão, vale bem a pena observar o processo pelo qual é efectivamente extraído o carvão, caso se tenha a oportunidade e se esteja disposto a esse incómodo. (Orwell 1937, 18)

No entanto, reafirmar essa ligação fundamental (como fez Orwell) e defender que ocorreram aperfeiçoamentos culturais com cada aperfeiçoamento do fluxo de energia (como faz Fox) são duas coisas diferentes. A conclusão de Orwell é inatacável. A formulação de Fox é claramente uma reafirmação de uma perspectiva determinista expressa duas gerações antes pelo antropólogo Leslie White (1900-1975), que lhe chamou a primeira lei importante do desenvolvimento cultural: «Mantendo-se o restante idêntico, o grau de desenvolvimento cultural varia directamente na proporção da quantidade *per capita* e por ano de energia explorada e aproveitada» (White 1943, 346). Embora também não se possa discutir a formulação fundamental de Ostwald ou o efeito abrangente da energia sobre a estrutura e a dinâmica de sociedades em desenvolvimento (salvo o respeito devido a Orwell), uma ligação determinista entre o nível de utilização da energia e as realizações *culturais* é uma asserção muito discutível. Examinemos essa causalidade (ou a ausência dela) no capítulo final do livro.

Não está em causa a natureza fundamental do conceito. Como escreveu Robert Lindsay (1975, 2):

Se pudermos encontrar uma única palavra para representar uma ideia que se aplica a cada elemento da nossa existência de maneira a que sintamos que o apreendemos realmente, teremos alcançado algo económico e poderoso. Foi isto que aconteceu com a ideia expressa pela palavra «energia». Nenhum outro conceito unificou desta maneira a nossa compreensão da experiência.

O que é, porém, a energia? Espantosamente, até contemplados com o Prémio Nobel têm enorme dificuldade em fornecer uma resposta satisfatória para esta pergunta aparentemente simples. Nas suas famosas *Lições de Física*, Richard Feynman (1918-1988) insistiu que «é importante perceber que, na física actual, não temos conhecimento do que é a energia. Não temos a imagem de que a energia se apresente em pequenas gotas de magnitude definida» (Feynman 1988, 4-2).

O que sabemos é que toda a matéria é energia em repouso, que a energia se manifesta numa multiplicidade de maneiras e que essas formas distintas de energia estão ligadas por conversões numerosas, muitas das quais universais, ubíquas e incessantes, outras extremamente localizadas, raras e efémeras (fig. 1.1). A compreensão destes suprimentos, potenciais e transformações foi rapidamente alargada e sistematizada, sobretudo ao longo do século XIX, e este conhecimento foi aperfeiçoado durante o século XX, quando compreendemos como libertar energia nuclear (teoricamente em finais dos anos 30, na prática em 1943, quando começou a funcionar o primeiro reactor) antes de sabermos como se processa a fotossíntese (as suas sequências só foram deslindadas no decurso da década de 1950) – o que constitui uma observação reveladora sobre as complexidades das transformações da energia.

Fluxos, reservas e controlos

Todas as formas conhecidas de energia são cruciais para a existência humana, uma realidade que obsta a que sejam hierarquizadas pela sua importância. Muitas coisas no decurso da história foram

De Para	Electromagnética	Química	Nuclear	Térmica	Cinética	Eléctrica
Electromagnética		Quimioluminescência	Bombas nucleares	Radiação térmica	Cargas aceleradas	Radiação electromagnética
Química	Fotossíntese	Processamento químico		Ebulição	Dissociação por radiólise	Electrólise
Nuclear	Reacções gama-neutrão					
Térmica	Absorção solar	Combustão	Fissão fusão	Troca de calor	Fricção	Aquecimento por resistência
Cinética	Radiómetros	Metabolismo	Radioactividade bombas nucleares	Expansão térmica combustão interna	Engrenagens	Motores eléctricos
Eléctrica	Células solares	Células de combustível baterias	Baterias nucleares	Termoelectricidade	Geradores eléctricos	

Figura 1.1

Matriz de conversões de energia. Onde existem mais possibilidades, não estão identificadas mais do que duas transformações principais.

determinadas e circunscritas tanto por fluxos de energia planetários e universais como pelas suas manifestações regionais ou locais. As características fundamentais do universo são governadas pela energia gravitacional, que ordena inúmeras galáxias e sistemas estelares. A gravidade também mantém o nosso planeta a orbitar à distância apropriada do Sol e retém uma atmosfera suficientemente maciça para tornar a Terra habitável (caixa 1.1).

Como acontece em todas as estrelas activas, a fusão alimenta o Sol, e o produto dessas reacções termonucleares alcança a Terra sob a forma de energia electromagnética (solar e radiante). O seu fluxo abrange um amplo espectro de comprimentos de onda, incluindo a luz visível. Cerca de 30% deste enorme fluxo é reflectido por nuvens e superfícies, à volta de 20% é absorvido pela atmosfera e por nuvens, e o restante, aproximadamente metade da afluência total, é absorvido

Caixa 1.1***Gravidade e habitabilidade da Terra***

As tolerâncias extremas do metabolismo com base no carbono são determinadas pelo ponto de solidificação da água, cuja forma líquida é necessária para a formação e reacções das moléculas orgânicas (o limite inferior), e por temperaturas e pressões que desestabilizam os aminoácidos e decompõem as proteínas (o limite superior). A zona continuamente habitável da Terra – a extensão de raio orbital que garante as condições óptimas para um planeta capaz de acolher vida – é muito estreita (Perkins 2013). Um cálculo recente concluiu que estamos ainda mais próximos do limite do que antes se pensava: Kopparapu e colaboradores (2014) determinaram que, dada a sua composição e pressão atmosférica, a Terra orbita na orla interior da zona habitável, imediatamente para lá do raio de alcance onde efeitos de estufa descontrolados produziram temperaturas intoleravelmente elevadas.

Há cerca de dois mil milhões de anos, foi sequestrado pelo oceano, e por *archaea* e algas, dióxido de carbono (CO₂) suficiente para evitar este efeito na Terra, mas se o planeta estivesse apenas 1% mais distante do Sol, praticamente toda a sua água teria ficado encerrada em glaciares. E mesmo com temperaturas dentro de uma faixa óptima, o planeta não poderia acolher uma vida extremamente diversificada sem a sua atmosfera única, dominada pelo nitrogénio, enriquecida com oxigénio da fotossíntese e contendo alguns importantes gases vestigiais que regulam a temperatura da superfície; todavia, esta fina envolvente gasosa não poderia perdurar se o planeta não fosse suficientemente grande para exercer gravidade suficiente para reter a atmosfera no seu lugar.

por oceanos e continentes, converte-se em energia térmica e é novamente irradiado para o espaço (Smil 2008a). A energia geotérmica da Terra adiciona-se a um fluxo muito mais diminuto de calor: o que resulta da acreção gravitacional original da massa planetária e do decaimento de matéria radioactiva, e impulsiona vastos processos tectónicos que reorganizam continuamente oceanos e continentes e provocam erupções vulcânicas e sismos.

Só uma pequena fracção da energia radiante que nos chega, menos de 0,05%, é transformada pela fotossíntese em novas reservas de energia química nas plantas, proporcionando o alicerce insubstituível de todas as formas superiores de vida. O metabolismo activo reorganiza nutrientes em tecidos em crescimento, e preserva as funções orgânicas e a temperatura constante em todas as espécies superiores. A digestão também gera a energia mecânica (cinética) dos músculos em acção. Nas suas conversões de energia, os animais estão em si mesmos limitados pela dimensão dos seus corpos e pela disponibilidade de nutrição acessível. Uma característica distintiva fundamental da nossa espécie tem sido o alargamento desses limites físicos mediante uma utilização mais eficaz dos músculos e pelo domínio de energias exteriores aos nossos próprios corpos.

Libertadas pelo intelecto humano, essas energias extra-somáticas têm sido usadas para uma variedade crescente de tarefas, tanto na função de poderosas forças motrizes como na qualidade de combustíveis cuja queima liberta calor. Os activadores dos suprimentos de energia dependem do fluxo de informação e de uma enorme variedade de artefactos. Esses dispositivos têm variado de utensílios tão simples como pedras para martelar e alavancas até motores complexos que queimam combustível e reactores que libertam a energia da fissão nuclear. A sequência evolutiva e histórica básica destes progressos é fácil de traçar em termos qualitativos gerais. Como acontece com qualquer organismo que não produza fotossíntese, a necessidade energética humana mais básica é de alimento. O forrageio e o esgravatar de restos pelos hominíneos eram muito semelhantes às práticas de aquisição de alimentos dos seus antepassados primatas. Embora alguns primatas – bem como outros mamíferos (incluindo lontras e elefantes), algumas aves (corvos e papagaios) e até alguns invertebrados (cefalópodes) – tenham desenvolvido um repertório limitado de capacidades rudimentares para usar utensílios (Hansell 2005; Sanz, Call e Boesch 2014; fig. 1.2), só os hominíneos fizeram do fabrico de ferramentas um traço distintivo do seu comportamento.

As ferramentas deram-nos uma vantagem mecânica na aquisição de alimento, abrigo e vestuário. O domínio do fogo alargou extraordinariamente os nossos limites habitáveis e separou-nos ainda mais dos animais. Novos utensílios conduziram ao ajaezar de animais domesticados, à construção de máquinas mais complexas movidas



Figura 1.2

Chimpanzé (*Pan troglodytes*) no Gabão a recorrer a utensílios para partir nozes (Corbis).

pelo músculo e à conversão de uma fracção diminuta das energias cinéticas do vento e da água em potência útil. Estas novas forças motrizes multiplicaram a potência dominada pela espécie humana, mas o seu uso permaneceu durante muito tempo circunscrito pela natureza e magnitude dos fluxos captados. Este foi, muito claramente, o caso das velas náuticas, ferramentas antigas e eficazes cujas aptidões ficaram restringidas durante milénios a fluxos predominantes do vento e a correntes persistentes do oceano. Estes grandes fluxos conduziram as viagens transatlânticas europeias de finais do século xv para as Antilhas. Também impediram os Espanhóis de descobrirem o Havai, não obstante os navios mercantes espanhóis, os galeões de Manila, velejarem uma ou duas vezes por ano através do Pacífico, do México (Acapulco) para as Filipinas, durante 250 anos, entre 1565 e 1815 (Schurz 1939).

Lareiras com combustão controlada, fogões e fornalhas transformaram a energia química de plantas em energia térmica. Este calor tem sido usado directamente nas habitações e para fundir metais, cozer tijolos e processar e fazer o acabamento de inúmeros produtos. A queima

dos combustíveis fósseis tornou todos esses usos directos tradicionais do calor mais generalizados e mais eficientes. Algumas invenções fundamentais tornaram possível converter energia térmica da queima de combustíveis fósseis em energia mecânica. Isto foi feito primeiro com vapor e motores de combustão interna, depois em turbinas a gás e foguetões. Temos gerado electricidade pela queima de combustíveis fósseis, bem como pelo aproveitamento da energia cinética da água, desde 1882, e pela fissão de um isótopo de urânio desde 1956.

A queima de combustíveis fósseis e a geração de electricidade criaram uma nova forma de civilização de energia intensiva cuja expansão cobre agora todo o planeta e cujas fontes primárias de energia incluem actualmente pequenas quotas, mas a aumentarem rapidamente, de novas fontes renováveis, sobretudo solar (explorada por dispositivos fotovoltaicos ou em centrais concentradas de energia solar) e eólica (convertida por grandes turbinas expostas ao vento). Por sua vez, estes progressos têm-se apoiado numa concatenação de outros desenvolvimentos. Para usar uma analogia de modelo de fluxo, teve de ser criada uma combinação de portas (válvulas) e activada na sequência adequada para possibilitar o fluir do engenho humano.

As portas mais dignas de nota necessárias para libertar grandes potenciais de energia incluem oportunidades educativas indispensáveis, disposições jurídicas previsíveis, regras económicas transparentes, a disponibilidade adequada de capital e condições conducentes a investigação básica. Como seria de esperar, são normalmente necessárias várias gerações para se obterem fluxos de energia muito aumentados ou qualitativamente melhorados, ou para se poder explorar fontes de energia totalmente novas a uma escala significativa. Oportunidade, potência global e composição dos fluxos de energia resultantes são extremamente difíceis de prever e, nas fases mais prematuras dessas transições, é impossível avaliar todos os impactes finais que as forças motrizes e os combustíveis fundamentais em mudança terão na agricultura, nas indústrias, no transporte, na instalação em novos territórios, na guerra e no meio ambiente terrestre. Exposições quantitativas são essenciais para apreciar as restrições às nossas acções e o alcance das nossas realizações, e exigem o conhecimento de conceitos científicos e elementos de medida básicos.

Conceitos e unidades de medida

Há vários primeiros princípios que subjazem a todas as conversões de energia. Toda a forma de energia pode ser transformada em calor, ou energia térmica. Nunca se perde qualquer energia em nenhuma dessas conversões. A conservação da energia, primeira lei da termodinâmica, é uma das realidades mais fundamentais do universo. Porém, à medida que avançamos pelas cadeias de conversão, o potencial para trabalho útil vai diminuindo paulatinamente (caixa 1.2). Esta realidade inexorável define a segunda lei da termodinâmica, e a entropia é a medida associada a essa perda de energia útil. Apesar de o conteúdo energético do universo ser constante, as conversões de energias aumentam a sua entropia (reduzem a sua utilidade).

Caixa 1.2

Utilidade decrescente da energia convertida

Qualquer conversão de energia ilustra o princípio. Se um leitor norte-americano usar luz eléctrica para iluminar esta página, a energia electromagnética dessa luz é apenas uma pequena parte da energia química contida no pedaço de carvão usado para a gerar (em 2015, o carvão era usado para produzir 33% da electricidade gerada nos Estados Unidos). Pelo menos 60% da energia do carvão perdeu-se sob a forma de calor por uma chaminé da central e na água de arrefecimento, e se um leitor usar uma antiga lâmpada incandescente, então mais de 95% de electricidade produzida acaba por se dissipar em calor gerado quando o filamento espiralado metálico da lâmpada resiste à corrente eléctrica. A luz que atinge a página é absorvida por ela ou é reflectida e absorvida pela sua envolvente, e novamente irradiada como calor. A energia química do carvão de baixa entropia que foi inicialmente fornecida vai sendo dissipada como calor difuso de alta entropia que aqueceu o ar por cima da central, ao longo dos cabos e em torno da lâmpada, e causou um aumento imperceptível de temperatura por cima de uma página. Não se perdeu nenhuma energia, mas uma forma muito útil degradou-se a ponto de não ter utilidade prática.

Um cesto de cereais ou um barril de petróleo em bruto são reservas de energia com baixa entropia, capazes de muito trabalho útil uma vez metabolizados ou queimados, e vêm a acabar como movimento aleatório de moléculas de ar ligeiramente aquecidas, o estado irreversível de alta entropia que representa uma perda irrecuperável de utilidade.

Esta dissipação entrópica unidireccional conduz a uma perda de complexidade e a maior desordem e homogeneidade em qualquer sistema fechado. Porém, todos os organismos vivos, seja a mais ínfima bactéria ou uma civilização global, desafiam temporariamente esta tendência ao importarem e metabolizarem energia. Isto significa que cada organismo vivo deve ser um sistema aberto, mantendo um afluxo e escoamento contínuos de energia e matéria. Enquanto permanecerem vivos, esses sistemas não podem existir num estado de equilíbrio químico e termodinâmico (Prigogine 1947, 1961; von Bertalanffy 1968; Haynie 2001). A neguentropia deles – o seu crescimento, renovação e evolução – resulta numa maior heterogeneidade e aumento de complexidade estrutural e sistémica. Como acontece com tantos outros avanços científicos, só no século XIX é que se teve um entendimento coerente destas realidades, quando as disciplinas em rápido desenvolvimento da física, da química e da biologia encontraram um interesse comum no estudo das transformações da energia (Atwater e Langworthy 1897; Cardwell 1971; Lindsay 1975; Müller 2007; Oliveira 2014; Varvoglis 2014).

Estes interesses fundamentais precisavam de uma codificação em medidas padrão. Duas unidades tornaram-se comuns para medir a *energia*: caloria, uma unidade métrica, e a unidade térmica britânica (Btu). Hoje, a unidade científica básica de energia é o joule, que recebeu o nome do cientista inglês James Prescott Joule (1818-1889), que publicou o primeiro cálculo rigoroso da equivalência entre o trabalho e o calor (caixa 1.3). *Potência* refere-se ao débito do fluxo de energia. A sua primeira medida padrão, o cavalo-vapor, foi estabelecida por James Watt (1736-1819). Ele queria vender os seus motores a vapor a um preço rapidamente compreensível e, por isso, escolheu a comparação óbvia com a força motriz que iriam substituir, um cavalo arreado que era habitualmente usado para accionar um moinho ou uma bomba (fig. 1.3, caixa 1.3).

Caixa 1.3***Medir energia e potência***

Um joule é, segundo a definição oficial, o trabalho realizado quando a força de um newton actua pela distância de um metro. Outra opção consiste em definir uma unidade básica de energia através dos requisitos de calor. Uma caloria é a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 cm³ de água em 1° celsius. É uma quantidade minúscula de energia: para fazer o mesmo com 1 kg de água precisa-se de mil vezes mais energia, ou uma quilocaloria (para a lista completa de prefixos multiplicadores, ver «Medidas básicas» na Adenda. Dada a equivalência de calor e trabalho, tudo o que é necessário para converter calorias em joules é ter presente que uma caloria equivale aproximadamente a 4,2 joules. A conversão é igualmente simples para a medida não-métrica inglesa ainda comumente usada, a unidade térmica britânica. Uma Btu contém aproximadamente 1000 J (1055, para ser exacto). Uma boa bitola de comparação é a necessidade alimentar média diária. Para a maioria dos adultos moderadamente activos, essa necessidade é de 2 a 2,7 Mcal, ou cerca de 8 a 11 MJ, e podem obter-se 10 MJ comendo 1 kg de pão de trigo integral.

Em 1782, James Watt calculou, no seu *Livro de Rasuras e Cálculo*, que um cavalo de engenho trabalha à razão de 32 400 pés-libra por minuto – e no ano seguinte arredondou este valor para 33 000 pés-libra (Dickinson 1939). Presumiu uma velocidade média de marcha de cerca de 3 pés por segundo, mas não sabemos onde foi buscar o valor de uma tracção média de cerca de 180 libras. Alguns animais de maior porte tinham essa força, mas a maioria dos cavalos na Europa do século XVIII não aguentava o débito de um cavalo-vapor. Actualmente, a unidade padrão de potência, um watt, é igual ao fluxo de um joule por segundo. Um cavalo-vapor equivale a cerca de 750 watts (745,699, para ser exacto). Consumir 8 MJ de alimento por dia corresponde a um débito de potência de 90 W ($8 \text{ MJ}/24 \text{ h} \times 3600 \text{ s}$), menos do que o débito de uma lâmpada normal (100 W). Uma torradeira dupla precisa de 1000 W, ou 1 kW; automóveis pequenos produzem cerca de 50 kW; uma grande central eléctrica a carvão ou nuclear produz electricidade à taxa de 2 GW.

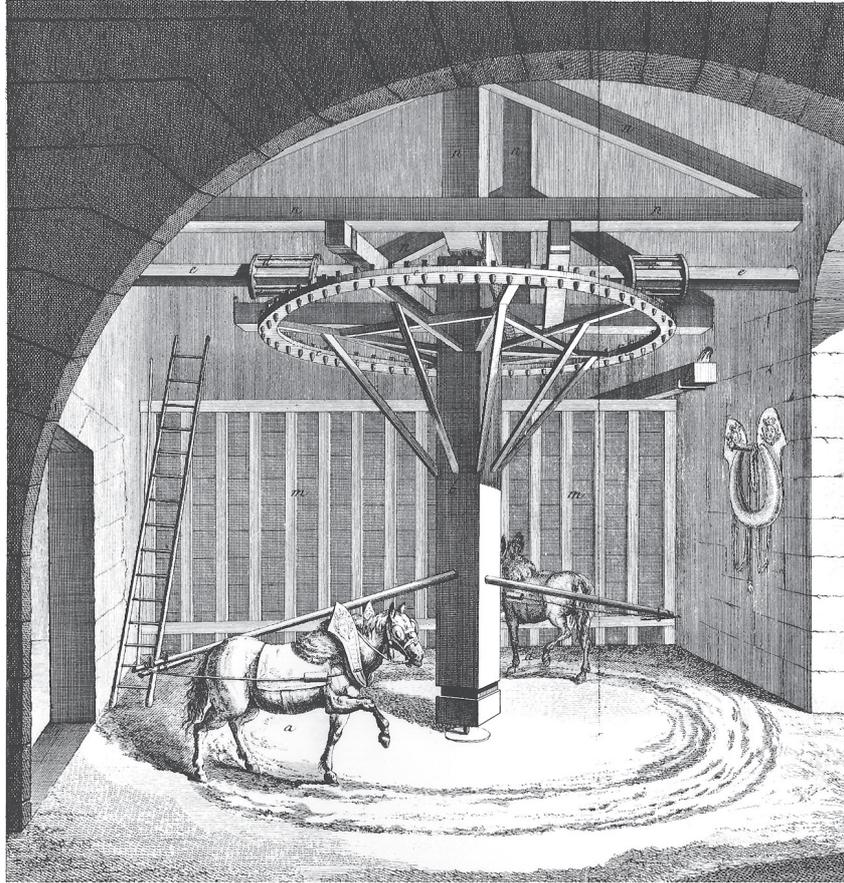


Figura 1.3

Dois cavalos fazem rodar um cabrestante, engrenado para bombear água de um poço, numa fábrica francesa de tapetes de meados do século XVIII (reproduzido da *Encyclopédie* [Diderot e d'Alembert 1769-1772]). Um cavalo médio desse período não aguentava a intensidade uniforme de trabalho de um cavalo-vapor. James Watt usou uma taxa exagerada para garantir a satisfação dos clientes com os seus motores a vapor, graduados em cavalos-vapor, que instalava para substituir os animais arreados.

Outra grandeza importante é a *densidade de energia*, a quantidade de energia por unidade de massa de um recurso (caixa 1.4). Este valor é de importância crucial para os alimentos – mesmo onde alimentos abundantes com baixa densidade energética nunca se poderiam