



GORKA BUENO

Os blecautes se sucedem. No verão de 2003 aconteceram blecautes na Dinamarca, Itália e Reino Unido; em novembro de 2006 um blecaute originado na Alemanha deixou sem luz meia Europa. Passaram à história os blecautes de Nova York, no verão de 2003, e da Catalunha, no verão de 2007. Está cada vez mais evidente a complexidade da gestão do sistema elétrico. Na opinião de muitos especialistas, nos países desenvolvidos, a rede elétrica se encontra em estado crítico, quase incontrolável. Nos EUA, estudos indicam que as probabilidades empíricas de que sucedam falhas na rede estão resultando ser mais altas do que o esperado em análises teóricas. Isto está obrigando alguns especialistas a utilizarem modelos que se afastam do usado até agora, entrando no terreno dos sistemas não lineares e na teoria do caos. O comportamento da rede está se complicando muito, e não parece que uma utilização massiva de fluxos de energia renovável melhore o panorama.

EM DEBATE 2)

A CRISE DO ATUAL MODELO ENERGÉTICO E SUA DIFÍCIL SOLUÇÃO



EM DEBATE 2)

GORKA BUENO

UNIVERSIDADE DO PAÍS BASCO



Sindicato dos Engenheiros no
Estado do Rio de Janeiro



Copyright © 2010 SENGE-RJ

Sindicato dos Engenheiros no Estado do Rio de Janeiro

Av. Rio Branco, 277 - 17º andar - GR 1701/1704

Centro - Rio de Janeiro - CEP.20047-900

Tel.: (0xx21) 3505-0707- Fax: (0xx21) 2533-3409

E-mail: sengerj@sengerj.org.br

Filiado à



Conselho Diretor

Olímpio Alves dos Santos (Presidente)

Agamenon Rodrigues E. Oliveira

Antonio Carlos Soares Pereira

Antonio Gerson Ferreira de Carvalho

Carlos Alberto da Cruz

Clayton Guimarães do Vabo

Clovis Francisco do Nascimento Filho

Eduardo Ramos Duarte

Fernando de Carvalho Turino

Flávio Ribeiro Ramos

Francisco Parentes de Rezende Correa

Gunter de Moura Angelkorte

Jorge Antônio da Silva

Jorge Saraiva da Rocha

José Amaro Barcelos Lima

José Stelberto Porto Soares

Julio César Arruda de Carvalho

Luiz Antônio Cosenza

Lusia Maria de Oliveira

Marco Antônio Barbosa

Maria Virginia Martins Brandão

Miguel Santos Leite Sampaio

Paulo Cesar Nayfeld Granja

Paulo Cesar Quintanilha

Conselho Fiscal

Titulares

Nei Rodrigues Beserra

Paulino Cabral da Silva

Sergio Gomes dos Santos

Suplentes

Agostinho Guerreiro

Rubem Corveto de Azeredo

Sonia da Costa Rodrigues

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO-NA-FONTE
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ
B94c

Bueno, Gorka

A crise do atual modelo energético e sua difícil solução / Gorka Bueno. - Rio de Janeiro: Espalhafato Comunicação, 2010.

Tradução de: La crisis del actual modelo energetico y su difícil solución

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-63359-01-8

1. Recursos energéticos. 2. Desenvolvimento energético. I. Título. II. Série.

10-5812. CDD: 333.79

CDU: 620.91

10.11.10 16.11.10

022619



EM DEBATE 2)

A CRISE

DO ATUAL MODELO ENERGÉTICO E SUA DIFÍCIL SOLUÇÃO¹



GORKA BUENO



Sindicato dos Engenheiros no
Estado do Rio de Janeiro





SUMÁRIO

ENERGIA: HISTÓRIA E CONCEITOS	7
PARA UMA DEFINIÇÃO DE ENERGIA	9
TIPOS DE ENERGIA	13
QUANTA ENERGIA HÁ DISPONÍVEL?.....	15
ALGUMAS QUANTIDADES DE ENERGIA	18
POTÊNCIA	21
EFICIÊNCIA	25
FATOR DE CARGA	31
A REDE ELÉTRICA	34
O PAPEL DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS COMO VETOR DE ENERGIA	40
NOTAS DE RODAPÉ	41



ENERGIA: HISTÓRIA E CONCEITOS

Um dos problemas políticos mais sérios com que se depara a humanidade é fazer a transição de seus sistemas energéticos atuais de base fóssil para outros com predominância de energias renováveis.

Desde a chamada primeira Revolução Industrial que ocorreu inicialmente na Inglaterra, no final do século XVIII, passou-se a usar de forma intensiva o carvão mineral muito abundante na própria Inglaterra, e também na Alemanha e na Bélgica. Com a descoberta do petróleo, em 1859, na Pensilvânia, EUA, ele e seus derivados tornaram-se as fontes fundamentais de energia, com todas as consequências hoje amplamente reconhecidas como deletérias para a vida no planeta.

O termo energia tem sido atribuído ao cientista inglês Thomas Young (1773-1829), médico de formação, mas muito mais conhecido pelos seus trabalhos em física ondulatória, em especial a interferometria ótica. Em 1807 ele usou pela primeira vez o termo energia com o significado atual, qual seja a capacidade de realizar um certo trabalho. Alguns autores também atribuem tal feito a William Thomson (1824-1907), o famoso Lorde Kelvin.

Independentemente de quem tenha sido o primeiro a usar o termo energia, o fato mais importante do ponto de vista da história das ciências é que o conceito de energia é fruto do desenvolvimento das ciências no século XIX como a eletricidade, o calor, a ótica, o magnetismo, a química e a eletroquímica, entre outras. Outro fato

também interessante é que o conceito de energia é o resultado do trabalho independente de vários laboratórios científicos na Europa, como assinala o físico e historiador das ciências Thomas Kuhn (1922-1996).

Ainda do ponto de vista científico é importante assinalar que o princípio da conservação da energia é um princípio fundamental da natureza regendo uma série de processos que ocorrem inclusive com os organismos vivos, além do seu caráter unificador para uma melhor compreensão do mundo físico no qual vivemos.

Este caderno temático, que integra a série Em Debate, apresenta e discute de forma elementar e bastante didática um conjunto de conceitos e problemas dirigidos principalmente a quem não é da área.

Gorka Bueno é Doutor em Engenharia, professor titular de Tecnologia Eletrônica na Universidade do País Basco e especialista em energia fotovoltaica. Considera que as energias renováveis não vão poder substituir os combustíveis fósseis, porque acredita na necessidade de mudanças significativas nos hábitos de consumo.

Com a publicação parcial de *A crise do atual modelo energético e sua difícil solução*, o SENGE-RJ pretende contribuir com o aprofundamento e o estudo das questões relacionadas à energia, indispensáveis para as transformações que estão em curso.

A Diretoria

PARA UMA DEFINIÇÃO DE ENERGIA

O que é a energia? A ciência não foi capaz de entender este conceito em toda a sua complexidade até o início do século XX. Quando Albert Einstein apresentou sua famosa relação entre massa e energia - que deu lugar ao uso civil e militar da energia atômica de fusão e fissão -, muitos de seus contemporâneos se mantiveram céticos diante da famosa fórmula. Como poderiam ser a mesma coisa matéria e energia? A energia poderia ser tão abundante como a matéria? A questão é, certamente, muito complicada.

Existem muitos tipos de energia, de características diferentes, e é difícil obter uma definição precisa e geral ao mesmo tempo. Por um lado, digamos que a energia é algo ligado intimamente à condição da matéria: poderíamos dizer que a energia é uma característica da matéria, algo intimamente ligado a ela. Em Termodinâmica - a ciência que estuda a transferência, transformação e armazenamento da energia - é habitual utilizar o conceito de «sistema». Nele, sempre aparecerá algum elemento material. Conforme o tipo de energia, a relação desta com a matéria será diferente: no caso da energia eólica, o vento traz a energia, e seu fundamento reside na velocidade do vento - a sua energia cinética. A energia dos combustíveis, por outro lado, se aloja nas ligações químicas entre os átomos que formam suas moléculas. Como se vê, é difícil obter uma definição genérica.

No entanto, sim podemos - e devemos - realizar algumas afirmações muito importantes. Para começar, devemos lembrar que a energia não se cria do nada.

Não se cria nem se destrói – é a Primeira Lei da Termodinâmica–; a energia sempre vai se transformando de uma forma em outra. Por essa razão o conceito de *fonte de energia* é enganoso, e de certo modo errôneo: a energia não tem fontes. De forma mais adequada, devemos dizer que na natureza existem *fluxos de energia*, e o que, muitas vezes, tomamos como *fonte* não é mais do que um *depósito* temporário, ou um transformador de energia de uma forma em outra.

Muitas vezes, para definir a energia o modo mais adequado é entender as consequências de sua transformação ou uso. Assim, podemos dizer que é a capacidade de um sistema físico para realizar um trabalho mecânico. Mas o que é um trabalho mecânico? O mais simples pode consistir, por exemplo, em levantar um peso a uma determinada altura. E trabalho é, também, o que se realiza para mover máquinas – desde uma simples alavanca, até uma gigantesca máquina perfuradora de túneis. Por outro lado, a energia está muito ligada ao conceito de calor. Em alguns processos a energia se transforma em calor; em outros, o calor da matéria é utilizado para realizar um trabalho mecânico.

Se repararmos em qualquer forma de energia, nos daremos conta de que por trás dela sempre encontraremos outra forma de energia. Na sociedade atual, por trás dos processos mais vulgares que consomem energia – desde acender uma luz até pôr um veículo em funcionamento –, aparecerá sempre uma *cadeia energética*. Esta será uma série encadeada de diferentes transformações energéticas. Em algum elo, com uma alta probabilidade, aparecerá a eletricidade, ou os combustíveis fósseis. E se chegarmos ao início da cadeia, com toda segurança chegaremos ao Sol luminoso.

O conceito de *cadeia energética* é muito adequado para analisar o sistema energético. De alguma forma, o comprimento da cadeia reflete o fluxo de energia. Cada elo está associado, por outro lado, a cada um dos tipos de energia que podemos encontrar, e os encadeamentos entre os elos estarão associados a cada um dos conversores ou transformadores energéticos do sistema: o motor elétrico que converte a eletricidade em trabalho mecânico, ou a célula fotovoltaica que transforma os raios de luz em energia elétrica.

Ainda que a energia não desapareça – porque sempre se transforma em outro tipo –, o fluxo energético não é bidirecional ao longo da cadeia. Em todos os sistemas físicos que não são ideais, ou seja, no mundo real, os processos de transformação energética não são completamente reversíveis. Explicar o fundamento desta afirmação não é nada fácil. Como mencionamos, existem diferentes tipos de energia: a energia cinética do vento, a energia química que une os átomos dentro de uma molécula... mas nos processos energéticos, sempre aparecerão outros fenômenos intimamente relacionados com a energia: o calor e o trabalho mecânico. Os três conceitos – trabalho mecânico, calor e os diferentes tipos de energia –, em última instância, nada mais são do

que diferentes manifestações do mesmo conceito². As transformações de um em outro, entretanto, não são bidirecionais em geral nem reversíveis sob qualquer condição. Pensemos, por exemplo, no caso do café que alguns de nós tomamos a cada manhã. Se após esquentá-lo no forno de microondas o deixarmos em cima da mesa, nosso café esfriará. No processo, como o ambiente está a uma temperatura inferior - mais frio -, as moléculas do líquido irão liberar parte de sua energia cedendo-a ao ambiente, até que as temperaturas do líquido e do ambiente se igualem. Este processo, em si, é irreversível. Ninguém esperará que, uma vez deixado o café frio em cima da mesa, em algum momento posterior o encontrará quente. A lei física que se encontra por trás da irreversibilidade de todos os processos energéticos - a Segunda Lei da Termodinâmica - pode ser formulada de diversas maneiras. Simplificando, diremos que em todos os processos energéticos, sempre se perde no caminho uma parte da energia útil. A energia que se perde não desaparece, mas sim se transforma em outro tipo de energia que já não é útil - por útil entendemos utilizável para realizar um trabalho mecânico, por exemplo.

As consequências da Segunda Lei da Termodinâmica são de grande importância em todos os fenômenos físico-químicos. Unido à irreversibilidade, nos deparemos com outro fenômeno: em todo processo termodinâmico - processo no qual se dá uma transformação de energia -, a quantidade de energia disponível no referido processo - energia útil - apresentará um limite. Esse limite não está relacionado com a tecnologia empregada que, em geral, sempre será melhorável, mas sim reside no mesmo fundamento físico-químico do processo. Expliquemos isto.

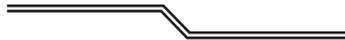
Levemos em conta, por exemplo, o caso de um motor de explosão, como o que podemos encontrar em qualquer automóvel. Este converte em trabalho mecânico a energia química das moléculas de diesel ou gasolina. Para isso, em uma primeira fase o combustível é queimado liberando a energia química das moléculas, convertendo-a em energia térmica. A energia liberada reside no movimento das moléculas do gás gerado. O motor, mediante sua mecânica, transforma o movimento caótico das moléculas quentes do gás em trabalho mecânico - o giro das rodas. Após realizar o seu trabalho

**A MARGEM QUE SE
PERDE ENTRE A ENERGIA
PRIMÁRIA - O
FORNECIMENTO DE
ENERGIA NO INÍCIO DA
CADEIA - E O CONSUMO
FINAL NÃO DEPENDE
EXCLUSIVAMENTE DAS
MELHORIAS
TECNOLÓGICAS.**

- mover os pistões do motor -, o gás residual é liberado através do tubo de descarga. Ainda que a tecnologia do motor seja muito evoluída - e de fato o é -, devemos levar em conta que à medida que os gases não são liberados à temperatura do zero absoluto, isto é, 0 K ou $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, está sendo perdida uma parte da energia química do combustível liberada na combustão: neste caso, sob a forma de calor. À medida que se libera energia térmica na atmosfera pelo tubo de descarga - ou através da chaminé de uma usina térmica de gás ou de carvão -, essa energia já não é utilizável. Na atmosfera, o calor das moléculas de gás é repartido rapidamente entre as moléculas do ambiente e já não é possível recuperar daí nenhum trabalho mecânico. Do ponto de vista termodinâmico, dizemos que no processo aumentou a *entropia* - a desordem - do sistema, já que no processo diminuiu a quantidade de energia útil disponível.

Em todos os processos de transformação de energia, no mundo real, a entropia do sistema sempre aumenta. A *entropia* pode ser entendida como uma medida da energia utilizável no referido sistema, no qual a energia degradada já não é novamente utilizável para realizar mais trabalho. Voltaremos a este ponto quando analisarmos a eficiência de diferentes processos e dispositivos. É ilustrativo, por exemplo, o caso da lâmpada. O fundamento deste dispositivo que utilizamos para gerar luz foi desenvolvido por Thomas Alva Edison há mais de um século. As primeiras lâmpadas viáveis fabricadas por Edison não tinham uma eficiência superior a 0,2%, isto é, só convertiam em radiação luminosa 0,2% da energia elétrica a elas fornecida. No caso dessas lâmpadas, praticamente toda a energia elétrica era perdida sob a forma de calor. Nas lâmpadas atuais mais evoluídas, a eficiência pode ser facilmente superior a 20%, isto é, utilizam a energia elétrica de uma forma muito mais eficiente.

Como vemos, o desenvolvimento tecnológico tem um efeito manifesto no uso energético ao longo da cadeia de energia. As melhorias no uso da energia ao longo da cadeia permitem fornecer ao último elo³ - o consumo final - mais energia, sem necessidade de aumentar o fornecimento de energia nos primeiros elos - energia primária. Entretanto, a margem que se perde entre a energia primária - o fornecimento de energia no início da cadeia - e o consumo final não depende exclusivamente das melhorias tecnológicas.





TIPOS DE ENERGIA

A grande variedade de tipos de energia que podemos encontrar é um elemento que dificulta em grande medida nossa vontade de esclarecer o conceito. Como já dissemos, a energia está intimamente ligada à matéria, e essa ligação se dá através de alguma ou de várias das quatro forças fundamentais que podemos encontrar na natureza: força eletromagnética, força gravitatória e forças nucleares forte e fraca. Na Tabela 1 são mostrados alguns exemplos. Em cada um é apresentada também a matéria envolvida, assim como onde reside ou é armazenada a energia.

Tabela 1. Alguns tipos de energia.

Matéria	Onde reside a energia?	Força fundamental
Sol (hidrogênio)	Energia nuclear, nos próprios átomos	Forças nucleares
Petróleo, carvão, gás natural	Energia química, nas ligações entre os átomos em cada molécula	Força eletromagnética
Vento	Energia potencial na altura do ar, e energia cinética na velocidade do vento	Força eletromagnética e gravitatória
Água de um reservatório	Energia potencial na altura da água	Força gravitatória
Raios luminosos	Energia eletromagnética nos fótons de luz	Força eletromagnética



O Sol converte sua própria matéria em energia, através de processos termonucleares. Neles, ao se fundirem dois átomos de hidrogênio é criado um de hélio; no processo são liberadas as forças nucleares entre as partículas dentro de cada átomo; com isso, o novo átomo apresenta uma massa inferior à soma dos originais, e a diferença é emitida sob a forma de radiação eletromagnética. Os raios solares – fótons – transportam a energia através do vácuo. O calor também é propagado sob a forma de radiação eletromagnética, como os raios luminosos, os raios X e as ondas de rádio.

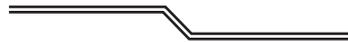
Mediante diversos processos, a energia é transformada de uma forma em outra. Na combustão, por exemplo, a energia química é liberada das moléculas do combustível, e se transforma em outra forma de energia: energia eletromagnética – luz e calor –, e energia mecânica – o movimento das moléculas de gás liberadas, o qual moverá o pistão no cilindro de um motor de explosão.

A grande maioria das diferentes formas de energia trata de diferentes manifestações de *energia solar*, já que se buscarmos o primeiro elo de cada cadeia energética chegaremos ao Sol: energia eólica, hidrelétrica, fototérmica, fotovoltaica; a energia da biomassa, mas também as energias fósseis; todas são energia solar. Normalmente, os *fluxos de energia renovável* se relacionam diretamente com a energia solar. Entretanto, o gás natural, o carvão e o petróleo também vêm do Sol, ainda que não sejam considerados como renováveis. Os combustíveis fósseis se formaram há milhões de anos, mediante processos geológicos, a partir da radiação solar captada pela biomassa mediante o processo fotossintético.

As energias renováveis, entretanto, são fluxos de energia existentes na natureza – o vento, a radiação do Sol, os fluxos geotérmicos ou o fluir da água dos rios –; fluxos que *a própria natureza mantém e renova de forma constante e sustentada*. Este último aspecto é importante. A maioria dos fluxos renováveis é energia solar, são fluxos inesgotáveis, que podem ser consumidos de forma sustentada, mas também que *devemos consumir de maneira sustentável*. Os combustíveis fósseis são energia solar, e neste momento estão sendo consumidos pela humanidade a uma velocidade muito mais rápida do que a que se deu na natureza para sua criação. E os fluxos de energia renovável também são finitos. São o que são, e devemos saber o quanto representam.

Muitas vezes, o limite da consideração renovável de um recurso é difuso, já que em todo momento deve ser garantida a sustentabilidade do processo, e isso é complicado, tal e como fica claro no atual debate em torno dos biocombustíveis. A história da humanidade nos oferece exemplos claros. Antes da Revolução Industrial – entre os séculos XVI e XVIII, durante a denominada Pequena Idade do Gelo –, a

lenha das florestas de toda a Europa se converteu na principal fonte de energia da população. Como consequência da exploração massiva das florestas daquela época, grande parte da massa florestal europeia desapareceu. Esse consumo de biomassa pode ser considerado como um consumo de energia renovável? Seguramente não. Ao falar de energias renováveis, é fundamental ter muito presente o nível de consumo. Se o consumo não for sustentável, a fonte não deve ser considerada renovável, já que não é renovada.



QUANTA ENERGIA HÁ DISPONÍVEL?

O fluxo de energia que nos chega do Sol é imenso. O potencial energético deste fluxo é, muitas vezes, sublinhado em todos os relatórios, com um argumento similar⁴:

A radiação solar proporciona, de longe, o maior fluxo de energia de todas as alternativas neutras em geração de carbono. A radiação solar recebida pela Terra em uma hora (430 EJ, ou $4,3 \times 10^{20}$ joules) é maior do que toda a energia consumida no planeta em um ano (410 EJ, ou $4,1 \times 10^{20}$ joules).

No entanto, esta argumentação necessita de destaques importantes. Sendo enorme o fluxo energético que nos oferece o Sol, um aproveitamento substancial de semelhante fluxo teria algumas implicações que não podemos desprezar. Levando-o ao extremo, uma utilização massiva do fluxo energético solar implicaria:

- a) que deveríamos interpor entre a Terra e o Sol um dispositivo conversor gigante, de dimensões comparáveis às do nosso planeta: por exemplo, uma célula solar gigante;
- b) o fluxo solar capturado não chegaria à superfície terrestre, e, portanto, ficaria prejudicado o equilíbrio energético que mantém o clima do planeta em condições aptas para a vida – não o esqueçamos: a energia do Sol já está sendo usada por nós;
- c) antes de qualquer coisa, haveria que fabricar a célula fotovoltaica gigante e colocá-la no espaço, para o que haveria que adiantar alguns custos energéticos enormes, custos que depois o dispositivo devolveria;
- d) a energia elétrica que proporcionaria a célula fotovoltaica sempre seria inferior à que capta do Sol; se devêssemos transformá-la novamente em calor, ou em um combustível para poder armazená-la, em sucessivas transformações se perderia mais energia disponível. Isto é, não podemos comparar diretamente quantidades de energia de dois pontos muito afastados de uma mesma cadeia energética sem levar em conta os custos que representam as transformações sucessivas ao longo da cadeia⁵.

Para que o uso da energia solar seja viável, este tem que ser tecnológico, energético e economicamente possível, além de não representar consequências graves para o clima e para o equilíbrio natural em geral. De quanta energia solar dispomos, realmente? Nas linhas seguintes nos encarregaremos das grandezas dos fluxos que estamos manejando.

Tabela 2. Algumas quantidades de energia (I)⁶.

Algumas quantidades de energia (I)

Unidade de energia: joule (J)

Energia solar interceptada pela Terra, no exterior da atmosfera	5,43x10²⁴ J	100 %
Radiação solar que chega até a superfície	2,81x10 ²⁴ J	52 %
Energia envolvida no ciclo da água do planeta	1,26x10 ²⁴ J	23 %
Energia do vento	5-15x10 ²² J	1-3 %
Energia capturada pela biomassa	1,7x10 ²¹ J	0,031 %
Fluxo de energia geotérmica	1,26x10 ²¹ J	0,023 %

Consumo comercial de energia primária (2004, IEA)	$4,64 \times 10^{20}$ J	0,009 %
Energia hidráulica dos rios do planeta	3×10^{20} J	0,006 %
Consumo de petróleo (2006, BP)	$1,64 \times 10^{20}$ J	0,003 %
Consumo de energia elétrica (2004, IEA)	$6,3 \times 10^{19}$ J	0,001 %
Teor energético da alimentação da humanidade (2005, FAO)	$2,7 \times 10^{19}$ J	0,0005 %
Fabricação de adubos nitrogenados para agricultura (gás natural)	$6,3 \times 10^{18}$ J	0,0001 %

Todos os conceitos em âmbito planetário, e anualmente.

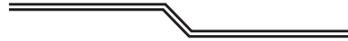
É certo que a grandeza da energia que nosso planeta intercepta do Sol em seu caminho pelo espaço é enorme: a cada ano, $5,43 \times 10^{24}$ joules. Entretanto, só a metade chega até a superfície, aproximadamente 52 %. Por outro lado, a energia que a humanidade consome a cada ano através do mercado é muito mais modesta, em torno de $4,6 \times 10^{20}$ joules, isto é, 460 exajoules (460 EJ). São apenas 0,009% da quantidade previamente citada, e, portanto, muito mais reduzida, ainda que devemos dar-nos conta de que o consumo comercial de energia não é o único consumo que realizamos – de que necessitamos. A energia solar recebida pelo planeta também é utilizada, e de fato nos é fundamental: 23%, por exemplo, mantém em funcionamento o ciclo da água na natureza, que é, por sua vez, um elemento chave da regulação do clima. A humanidade, mediante as represas hidrelétricas, captura uma pequena parte deste enorme fluxo para gerar eletricidade. A energia que move os ventos é muito mais modesta do que a que move o ciclo da água, entre 1% e 3%, e ainda assim é cem vezes maior do que o consumo comercial primário da humanidade.

As grandezas citadas são gigantescas, mas não são apropriáveis: como já dissemos, necessitaríamos de um dispositivo do tamanho do planeta, e nesse caso as consequências sobre o clima seriam catastróficas.

A maior parte da energia que recebemos do Sol nos é absolutamente necessária para que o nosso planeta se mantenha nas condições nas quais o conhecemos, isto é, um planeta vivo: para fazer funcionar o ciclo da água, para manter a temperatura da atmosfera e dos oceanos dentro de margens adequadas para a vida etc. A energia que realmente nos é acessível só representa uma pequena parte do que o Sol nos envia. Uma referência a ser levada muito em conta é a quantidade de energia que a biomassa – a *massa vivente* de nosso planeta – captura a cada ano,

fundamentalmente mediante a fotossíntese⁷: $1,7 \times 10^{21}$ joules, 0,031% do fluxo solar total, ou 1.700 EJ. O consumo comercial humano equivale a 26% da grandeza anterior. De fato, este consumo final é superior à energia hidráulica dos rios, 300 EJ. O teor energético da alimentação humana⁸, por outro lado, não é mais do que 27 EJ.

De todos estes dados se deduz que o consumo global humano é certamente enorme. E no consumo primário que sustenta o referido consumo final, o petróleo tem um peso fundamental. Dos 460 EJ, 164 EJ correspondiam ao petróleo em 2005. Energeticamente, o consumo humano de petróleo equivale a mais de uma décima parte do fluxo energético capturado pelos organismos vivos do planeta, ou a mais da décima parte do fluxo geotérmico do planeta⁹ – sim, esse que põe em atividade vulcões, causa terremotos e move as placas tectônicas sobre as quais se apoiam os continentes.



ALGUMAS QUANTIDADES DE ENERGIA

Para medir a energia, a unidade estabelecida internacionalmente é o joule (J). Como o joule é uma unidade pequena, nas contabilidades energéticas costumam ser utilizadas outras unidades maiores. Para medir o consumo – ou geração – de eletricidade, é habitual utilizar o quilowatt-hora (kWh). Um quilowatt-hora equivale a 3.600.000 joules. No entanto, o quilowatt-hora é ainda uma unidade pequena. Como no mundo o petróleo é uma das principais fontes de energia comercial, é habitual usar o teor energético de uma determinada quantidade de petróleo como unidade de conta. A quantidade de referência é geralmente a tonelada¹⁰, e assim, nas estatísticas se costuma utilizar a *tonelada equivalente de petróleo* (tep) para medir

o consumo de energia. Uma tonelada equivalente de petróleo equivale a 42 bilhões de joules (42 GJ, $4,2 \times 10^9$ J). Muitas vezes, não é o peso, mas sim o volume de petróleo que é usado como referência, usando o *barril de petróleo* para medir a energia. Um barril tem um volume de 159 litros.

Na Tabela 3 são comparadas as densidades energéticas de diversas substâncias. A densidade energética da gasolina, por quilograma, é de 46 MJ (1 MJ, 1 milhão de joules), um pouco mais alta do que a do petróleo (42 MJ/kg). É bastante difundida a crença de que a densidade energética do petróleo e de seus derivados é excepcionalmente alta. Entretanto, devemos destacar este ponto. Sendo muito alta, ao nosso redor encontraremos inúmeras substâncias com densidades de energia na mesma categoria. É o caso dos óleos vegetais; e os alimentos muito energéticos, como a manteiga (30 MJ/kg) ou os cereais (15 MJ/kg), apresentam densidades energéticas não muito distantes das do petróleo.

Tabela 3. Algumas quantidades de energia (II).

Algumas quantidades de energia (I) Unidade de energia: joule (J)

1 tonelada equivalente de petróleo (tep)	$4,2 \times 10^{10}$ J	42 GJ
1 barril de petróleo (159 litros)	$5,73 \times 10^9$ J	5,73 GJ
1 kg de hidrogênio	$1,14 \times 10^8$ J	114 MJ
1 kg de gasolina	$4,6 \times 10^7$ J	46 MJ
1 kg de manteiga	3×10^7 J	30 MJ
1 kg de cereais	$1,5 \times 10^7$ J	15 MJ
1 kg de hidrogênio (com cilindro)	8×10^5 J	800 kJ
Densidade das baterias elétricas (kg^{-1})	$0,9-5 \times 10^5$ J	90-500 kJ
Pilha alcalina do tipo AA	1×10^4 J	10 kJ

De fato, se observarmos a parte superior da tabela aparecerá uma substância com uma densidade energética muito acima da do petróleo. É o hidrogênio, com uma densidade energética de 114 MJ/kg. Neste valor tão alto reside, em parte, a tão trazida e levada *economia do hidrogênio*¹¹ que segundo alguns representará

um dos pilares do sistema energético em um futuro próximo. No entanto, a viabilidade da economia do hidrogênio é muito questionada na atualidade¹², até o ponto de ser considerada por alguns como um autêntico exagero – o que em inglês denominam *hype*. Entre outros inconvenientes, o hidrogênio é o gás mais leve que existe, e isso tem profundas implicações na hora de falar de densidades energéticas. Ao contrário do que acontece com a gasolina, o estado mais comum do hidrogênio não é o líquido. Para armazenar hidrogênio é necessário um recipiente – o cilindro –, no qual o gás será armazenado a uma pressão muito alta. Caso se leve em conta o peso do cilindro – o que é imprescindível caso se queira avaliar a viabilidade técnica –, a densidade energética do hidrogênio decresce até 0,8 MJ/kg, inferior a 2% da gasolina. Entre os dispositivos mais comuns que armazenam energia, só os que armazenam energia elétrica – baterias e pilhas – apresentam densidades energéticas inferiores, em torno de 1% da gasolina. No debate em torno do modelo de transporte do futuro – o qual definirá se os automóveis serão elétricos, a hidrogênio ou à gasolina –, para discutir honestamente entre alternativas será fundamental levar muito em conta – senão a verdadeira chave – a viabilidade técnica de cada vetor energético para ser armazenado¹³.

Nos dias de hoje, para transportar e armazenar energia, em inúmeros setores – e o do transporte é prioritário –, o hidrogênio e a eletricidade não são competitivos diante dos combustíveis líquidos. O que é mais grave, não parece que no futuro ocorrerão avanços tecnológicos surpreendentes neste campo. Em última instância, neste ponto reside precisamente a importância dos combustíveis fósseis líquidos: além do fato da densidade energética ser muito alta, são transportados muito facilmente e são vertidos de um contêiner para outro sem maiores problemas, graças a sua condição de líquidos.

Na atualidade, os únicos substitutos diretos do petróleo e de seus derivados são os óleos e álcoois vegetais. Suas características físico-químicas são similares – em última instância têm a mesma origem: fotossíntese e biomassa. Entretanto, seria viável esse suposto processo de substituição? Como já dissemos, toda a biomassa do planeta captura ao ano um fluxo de energia que é só dez vezes o consumo comercial humano. A substituição do petróleo por biomassa é absolutamente impossível se antes não for reduzido significativamente o nível de consumo.

POTÊNCIA

De um ponto de vista físico, a potência é o trabalho realizado na unidade de tempo, ou a quantidade de energia que é transportada na unidade de tempo. A unidade de potência é o *watt* (W). A capacidade da máquina para realizar trabalho é medida em watts. Na Tabela 4 são mostrados alguns exemplos de quantidades de potência, tanto do ponto de vista do consumo, como da geração – definitivamente, transformação de energia na unidade de tempo.

Tabela 4. Alguns exemplos de quantidades de potência.

Alguns exemplos de quantidades de potência¹⁴ Unidade de potência: watt (W)

Fluxo solar, fora da atmosfera	$1,72 \times 10^{17}$ W
Fluxo solar, na superfície do planeta	$8,81 \times 10^{16}$ W
Fluxo geotérmico	4×10^{13} W
Potência hidrelétrica instalada no mundo (2005)	$7,62 \times 10^{11}$ W, 762 GW
Potência nuclear instalada no mundo (2005)	$3,74 \times 10^{11}$ W, 374 GW
Potência elétrica na Espanha (2007)	$8,5 \times 10^{10}$ W, 85 GW

Potência eólica na Espanha (2007)	13×10^9 W, 13 GW
Usina térmica de ciclo combinado	8×10^8 W, 800 MW
Usina nuclear	500×10^8 W, 500 MW
Aerogerador de última geração	2×10^6 W, 2 MW
Automóvel (100 CV)	75 kW
Perurena levantando a pedra de 200 kg	2 kW
Cavalo	700 W
Metabolismo de uma pessoa de 70 kg	80 W
Capacidade de trabalho continuado de uma pessoa	70-200 W

O consumo de energia do metabolismo básico - as funções vitais básicas - de uma pessoa com um peso de 70 kg é de 80 W, justamente o equivalente ao consumo de uma lâmpada. A capacidade de uma pessoa normal para realizar um trabalho físico de forma continuada é de entre 70 e 200 watts, e um atleta de elite¹⁵ pode chegar a desenvolver 2.000 watts (2 kW) - imaginemos o atleta basco Perurena levantando a pedra de 200 kg.

Do mesmo modo que ocorre em todos os processos naturais, as ações humanas também acarretam transformações energéticas. E mais, os inúmeros avanços de aspectos relacionados com a vida da humanidade - e não só no campo tecnológico, mas também social, econômico e cultural -, podem ser vistos e analisados como avanços da civilização na hora de capturar e aproveitar os fluxos de energia e recursos materiais¹⁶; isso se tomadas todas as precauções para não cair em um grosseiro e simples materialismo.

Nas sociedades primitivas só se dispunha da força humana, e em consequência a produtividade do trabalho manual limitava, em grande medida, o tamanho das populações, a estrutura social e as condições gerais de vida. Com o passar dos séculos, o início da utilização da força animal na agricultura representou um grande avanço. Dependendo da técnica utilizada para prender o animal à canga, as potências disponíveis podiam oscilar ente 300 e 1.000 watts, aliviando a carga física dos homens e mulheres e permitindo que suas atividades se abrissem a outros campos. A potência de um cavalo é equivalente à de sete pessoas, e os cavalos tiveram um

importante papel como animal de carga nas sociedades ocidentais. Seguramente por esta razão, James Watt, quando inventou sua máquina de vapor no século XVIII, ao comercializá-la, para medir sua potência tomou como referência a potência do cavalo, criando o termo *cavalo de vapor* (1 CV equivale a 746 watts).

Por outro lado, os seres humanos puseram em funcionamento nos últimos dois mil anos diversas soluções tecnológicas para poder explorar de forma proveitosa os diversos fluxos naturais de energia disponíveis. A civilização romana conseguiu importantes avanços no uso dos moinhos de água, superando com eles amplamente a potência disponível mediante animais de carga; para o ano 1000, a potência das rodas hidráulicas já era superior a vários quilowatts, o que deu lugar a importantes avanços em inúmeros processos industriais: a fundição de ferro e de outros metais, a moagem de cereais, e muitos outros processos. A potencialidade da energia hidráulica também é grande se for utilizada a tecnologia adequada: a roda hidráulica gigante de nome *Lady Isabella*¹⁷, construída em 1854 e com um diâmetro de 22 metros, desenvolvia uma potência de 200 kW por meios exclusivamente mecânicos. Também a captura do fluxo eólico, ao longo dos séculos, pôs em nossas mãos uma potência nada desprezível. Os moinhos de vento começaram a ser utilizados na Pérsia no século VII, e dali se estenderam pela Ásia e Europa para que no século X os maiores, de mais de 1 kW, e de até 10 kW, fossem utilizados fundamentalmente na moagem de cereais. E tudo isto sem esquecer o papel fundamental que teve o vento no transporte marítimo – e que ainda hoje tem em muitos lugares –, já que a navegação à vela foi indispensável não só no transporte, mas também na exploração, no comércio e na guerra ao longo dos séculos.

De qualquer forma, em relação à acessibilidade a grandes potências, o que realmente marcou a diferença na história da humanidade foi o começo da utilização massiva dos combustíveis fósseis: primeiro o carvão e depois o petróleo, os quais se complementaríamos mais tarde com o gás natural. Por causa da alta densidade energética dos combustíveis fósseis, quando se desenvolveram tecnologicamente dispositivos capazes de utilizar sua energia térmica – a máquina de vapor, o motor de combustão interna, as turbinas –, a humanidade dispôs de uma capacidade des-

EM RELAÇÃO À
ACESSIBILIDADE A
GRANDES POTÊNCIAS,
O QUE
REALMENTE MARCOU A
DIFERENÇA NA
HISTÓRIA DA
HUMANIDADE FOI O
COMEÇO DA
UTILIZAÇÃO MASSIVA
DOS COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS.

comunal para transformar a natureza como nunca tinha sido vista antes. Até que se começasse a utilizar a máquina de vapor no século XVIII, os fluxos de energia disponíveis pela humanidade haviam sido renováveis: animais de carga, moinhos de vento e água e a força humana. As potências destes denominados *motores primários*, entretanto, se tornam pequenas diante das de muitos dos conversores de energia que podemos encontrar baseados no consumo de combustíveis fósseis. Um automóvel vulgar de 100 cavalos de potência poderá desenvolver 75 kW ao pisar fundo no acelerador. A respeito da geração elétrica, quando começaram a ser utilizados os combustíveis fósseis os sistemas de geração entraram em outra dimensão. Cada uma das máquinas de vapor da primeira usina termelétrica construída por Thomas Edison no final do século XIX desenvolvia uma potência de 5 milhões de watts (5 MW). Os aerogeradores de última geração também se movem nessa margem: cada um, quando o vento se move à velocidade adequada – em torno de 20 metros por segundo – pode chegar a desenvolver entre 2 e 5 MW.

Entretanto, se falarmos de potência, a dos aerogeradores é muito pequena ao lado da das usinas termelétricas, as quais nos levam à categoria dos gigawatts (bilhões de watts, 10^9 W, GW). No mundo há quase 400 usinas nucleares, com potências em geral entre 500 MW e 1 GW. As usinas termelétricas de combustíveis fósseis também se movem na categoria em torno do gigawatt. Mas na geração elétrica, o tipo de geração que supera com folga inclusive esta categoria é o da geração hidrelétrica gigante: a represa de Três Gargantas, situada no rio Yangtze, na China, terá uma potência de 18,2 GW quando em 2009 for concluída sua última fase de construção.

A geração elétrica instalada na Espanha peninsular era no final de 2007, no total, de 85 GW. No mundo, em 2005, a potência nuclear era de 374 GW, e a hidrelétrica nesse mesmo ano de 772 GW, conforme a *Energy Information Administration* dependente do governo dos EUA. Por outro lado, a potência do fluxo solar na superfície do planeta é imensa e gigantesca: quase cem milhões de gigawatts. Mas novamente devemos levar em conta que esta potência está muito dispersa. Em condições ótimas – ao meio-dia de um dia claro de verão – a radiação solar, ao nível do mar, é de 1 kW por metro quadrado. Se levarmos em conta o movimento do Sol – à noite não há luz; no inverno a radiação nos chega mais inclinada que no verão –, a radiação solar média ao longo de todo o ano é de 170 W/m^2 . Ao contrário do que acontece com o funcionamento das usinas termelétricas de combustíveis fósseis, para atingir potências baseadas em radiação solar da ordem de gigawatts são necessárias superfícies de vários quilômetros quadrados.

EFICIÊNCIA

Como já dissemos, a energia vai se transformando ao longo da cadeia energética. Essas transformações ocorrem através de processos conhecidos (de combustão, expansão de um gás, reação química, fissão nuclear...) e de dispositivos (motor elétrico, turbina, pilha de combustível, célula fotovoltaica...). Em cada transformação, sempre é perdida no caminho uma parte da energia útil. No elo seguinte da cadeia, a energia útil disponível será inferior à do elo prévio. A redução de energia útil disponível é determinada pelo tipo de processo por um lado, e pelas características do sistema físico no qual se dá o processo, por outro. Ao falar de uma transformação energética sempre faremos referência a sua *eficiência*.

A eficiência de um processo nunca será 100 %. Muitas vezes, os limites da eficiência estão marcados pela tecnologia. Por exemplo, os aerogeradores atuais aproveitam a energia cinética do vento muito melhor do que os moinhos de vento do século XVIII; são muito mais eficientes: o desenho das pás é radicalmente diferente, a qualidade dos materiais utilizados infinitamente melhor, os atritos muito mais reduzidos etc. As melhorias técnicas contínuas deram lugar historicamente a

melhorias constantes na eficiência da tecnologia energética em geral, desde o desenho dos arados e sua amarração aos animais de tiro, até o desenho dos aerogeradores e usinas de ciclo combinado de última geração.

Mas há outros limites à eficiência que não são tecnológicos. Voltemos ao exemplo do aerogerador. O vento, ao passar entre as pás do moinho, as fará girar cedendo-lhes parte de sua energia e reduzindo sua velocidade. Mas devemos constatar que é impossível captar toda a energia cinética do vento. Por quê? Se assim ocorresse, todo o ar se acumularia ao pé do aerogerador e a circulação de ar acabaria sendo freada. Algo similar acontece na geração termelétrica. Um litro de gasolina tem um teor energético de 42 MJ, mas o motor do carro não pode converter toda essa energia em movimento mecânico, ainda que as perdas sejam reduzidas. Uma parte importante da energia térmica do combustível será perdida pelo tubo de descarga, já que as moléculas dos gases por ele emitidas estarão quentes. No entanto, ao comparar as eficiências dos diferentes processos e dispositivos encontraremos grandes diferenças, tal e como pode ser comprovado na Tabela 5.

Tabela 5. Eficiência de alguns processos e dispositivos.

Eficiências

Motor elétrico	60-95 %
Transporte de eletricidade	80-90%
Eletrólise (para gerar H ₂)	70-80%
Pilha de combustível	75%
Usina de ciclo combinado	70%
Aerogerador	50%
Usina termelétrica clássica	45%
Motor diesel	30-35%
Motor de gasolina	15-25%
Célula fotovoltaica	15-25%
Eficiência líquida da fotossíntese	0,1-4%

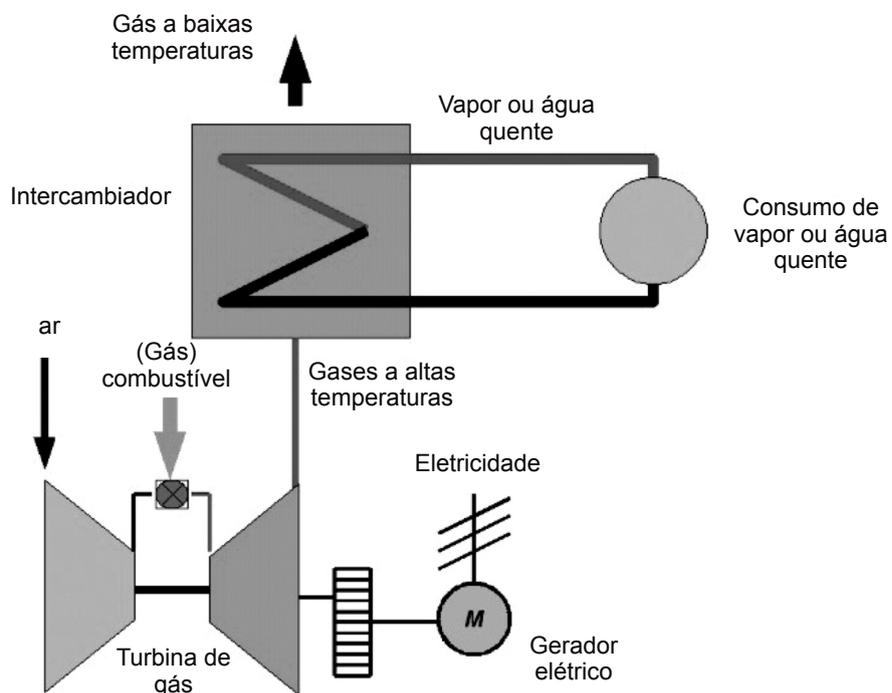
A eficiência do motor, no caso da gasolina, se situa entre 15 e 25 %. A do motor a diesel é um pouco mais alta, entre 30-35 %. A eficiência mais alta que uma central termelétrica clássica pode alcançar é de quase 45 %, já que, como mencionamos, é impossível utilizar toda a energia térmica que libera o combustível. A eficiência das centrais nucleares é equiparável à da geração termelétrica clássica.

De um modo geral, os processos que envolvem a combustão - um processo térmico - tendem a apresentar eficiências menores, porque nos processos térmicos o limite termodinâmico tende a ser inferior - que, como mencionamos, é independente das perdas que apresente uma tecnologia concreta.

No entanto, entre as tecnologias energéticas que envolvem a combustão aparece uma exceção, tal e como pode ser observado na Tabela 5. A eficiência dos ciclos combinados que queimam gás natural pode chegar a ser de quase 70 %, muito acima da que apresenta a geração termelétrica clássica. O ciclo combinado é um caso específico de um caso mais geral, denominado *cogeração*. O fundamento da cogeração é muito simples: o resíduo de calor gerado em um primeiro ciclo de transformação é reutilizado em um segundo ciclo energético, utilizando assim melhor a energia disponível no início do processo (ver a Figura 1). Em última instância, o fundamento da cogeração consiste em encadear dois - ou mais - ciclos de transformação de energia. Suponhamos que em uma pequena central térmica são utilizados em um segundo ciclo os gases quentes que são emitidos pela chaminé para esquentar água e proporcionar água quente sanitária, ou para fornecer aquecimento, através de um intercambiador (ver a Figura 1). No segundo ciclo não será possível utilizar toda a energia que de outra forma se perderia através da chaminé, mas sim elevar a eficiência líquida do processo global. Na cogeração se encadeiam dois tipos diferentes de geração de energia: eletricidade e água quente, por exemplo. No entanto, também é possível encadear dois ciclos que gerem eletricidade: se a uma turbina que gera eletricidade queimando gás natural se acrescenta à saída um novo ciclo de geração termelétrica que utilize os gases na saída da turbina para aquecer vapor, que por sua vez move outra turbina que gera eletricidade, então se obtém o que denominamos um *ciclo combinado*, com uma eficiência global que quase dobra a de um único ciclo.

**A FOTOSSÍNTESE CAPTA
A RADIAÇÃO LUMINOSA
NOS TECIDOS VERDES
DAS PLANTAS,
TRANSFORMANDO-A EM
ENERGIA QUÍMICA. A
CADEIA ENERGÉTICA DA
VIDA EM NOSSO
PLANETA TEM A
FOTOSSÍNTESE COMO
PRIMEIRA CADEIA.**

Figura 1. Diagrama de um sistema de cogeração.



Na parte superior da Tabela 5, aparecem as eficiências de diversos processos que envolvem a eletricidade. A eficiência de um motor elétrico está entre 60 e 95% – de um modo geral, os motores elétricos são mais eficientes quanto maior o seu tamanho. Recordemos que nas centrais hidrelétricas são utilizados enormes motores elétricos para converter em eletricidade a energia mecânica da água nas quedas-d'água. Os motores elétricos quase quadruplicam a eficiência dos motores de combustão interna; seguramente era este fato o que tinha em mente Thomas Edison quando defendia o automóvel elétrico frente a Henry Ford, defensor por sua parte do que utilizava um motor à gasolina¹⁸. No funcionamento das *pilhas de combustível*, que utilizando hidrogênio – e em alguns casos também metano – geram eletricidade, não acontece qualquer combustão, e por esta razão transformam a energia química do combustível em energia elétrica de modo muito eficiente: superior a 75% com a melhor tecnologia. A transformação energética no sentido inverso, a *eletrólise* – mediante a qual se utiliza uma corrente elétrica para separar o oxigênio e o hidrogênio das moléculas de água –, apresenta uma eficiência que se situa na

mesma margem: entre 70 e 80%. Em uma suposta economia do hidrogênio, a eletrólise seria indispensável para fabricar o combustível, o hidrogênio.

A questão da eficiência é mais importante do que pode parecer. O *Livro Verde sobre a eficiência energética*¹⁹ da Comissão Europeia deixava muito claro em 2005: no caso de tomar medidas rigorosas e implantar políticas adequadas voltadas para a melhoria da eficiência, a economia energética no ano de 2020 poderia equivaler na União Europeia (UE) a um consumo de 360 milhões de toneladas de petróleo, ou 20% do consumo primário de energia na UE em 2005. O Livro Verde calcula em 29% a energia perdida nas transformações dentro do sistema energético. Ao mesmo tempo, no setor elétrico se calcula que as perdas são de 66%. Isto é, por cada quilowatt/hora consumido no final da cadeia se perdem outros dois no caminho: na geração e no transporte; e isto sem levar em consideração as perdas acrescentadas no consumo. Por isso, a Comissão Europeia promove a utilização dos ciclos combinados e a cogeração, entre outras muitas medidas. Uma lâmpada de alta eficiência pode ter um consumo inferior à quinta parte da de uma ordinária. Uma adequada manutenção dos pneus do automóvel pode supor uma redução do consumo em 5%. Existem muitos âmbitos com ampla margem para a melhoria da eficiência energética.

Deve realmente ser levado em consideração o último item da Tabela 5. A fotossíntese capta a radiação luminosa nos tecidos verdes das plantas, transformando-a em energia química. A cadeia energética da vida em nosso planeta tem a fotossíntese como primeira cadeia. A fotossíntese é, certamente, o processo mais fundamental para a vida em nosso planeta. Mediante ela se cria matéria viva a partir de matéria inerte, se renova a reserva de oxigênio da atmosfera, e se armazena nos tecidos dos vegetais a radiação solar em forma de energia química, que por sua vez se utilizará para alimentar e sustentar toda a vida no planeta através da cadeia trófica. Sem fotossíntese não se pode entender a vida, e é surpreendente e maravilhoso comprovar como a natureza conseguiu desenvolver moléculas e processos químicos capazes de captar a radiação solar, processos por outro lado que a ciência só começou a compreender há relativamente pouco tempo.

A fotossíntese é um processo fascinante: simples – moléculas que se encontram nos tecidos verdes de qualquer vegetal transformam em energia química os raios de luz, evitando o recurso a complicadas tecnologias e dispositivos necessários em outras tecnologias energéticas –; os dispositivos conversores, as folhas e em geral os tecidos verdes de qualquer vegetal, podem chegar a ser diminutos – em comparação com as gigantescas centrais térmicas –; a conversão energética não

requer movimento nem partes móveis - ao contrário do que acontece em todos os motores -; a fotossíntese está, no final das contas, na origem dos principais recursos energéticos da humanidade, os combustíveis fósseis.

No entanto, as vantagens da fotossíntese também têm a sua contrapartida. A sua eficiência líquida é muito baixa. A fotossíntese não captura todo o espectro luminoso disponível. Como muito claramente - melhor dito, muito verde - pode ser comprovado, as moléculas que realizam o processo fotossintético nos tecidos vegetais não absorvem a radiação de cor verde, e só são capazes de utilizar umas partes muito definidas do espectro luminoso solar. A fotossíntese é muito eficiente - mais de 25% - utilizando a radiação luminosa de algumas partes concretas do espectro, mas a maior parte da radiação se perde ou se reflete. Na verdade, também se deve agradecer por este fato, já que nosso entorno natural seria terrivelmente deprimente se a fotossíntese fosse muito mais eficiente. Alguém imagina um mundo no qual toda a vegetação fosse da cor preta?

Levando em conta a energia da radiação disponível na superfície das folhas, no melhor dos casos a eficiência da fotossíntese se situa entre 4 e 10 %, se atendemos à energia química que fica fixada nas moléculas das plantas. No entanto, devemos nos dar conta de que a eficiência líquida será, não obstante, menor, já que também devem ser satisfeitas as necessidades energéticas da própria planta para viver, e para isso, como é óbvio, cada planta utiliza as suas próprias reservas. A energia que fica disponível para o resto da cadeia trófica, em geral, será entre 0,1 e 1% da radiação solar recebida pelo vegetal ao longo de sua vida, segundo a planta e as condições particulares, já que não é o mesmo, por exemplo, o caso do fitoplâncton ou das algas dos oceanos, a floresta ou o cultivo de cereais²⁰.

FATOR DE CARGA

Os conversores de energia, em geral, não funcionam de modo contínuo no máximo de potência. Assim, quando falamos que uma central térmica de carvão tem uma potência de um gigawatts, isso não implica que a central, ou a represa, o tempo todo, esteja gerando energia elétrica a esse nível máximo de potência. Na verdade, o regime de geração elétrica da maioria das instalações varia ao longo do tempo, e o valor médio sempre é inferior ao máximo, de modo significativo em alguns casos, como veremos a seguir.

A comparação das gerações nuclear e hidrelétrica no mundo nos proporciona um exemplo claro do que queremos dizer. Como apresentamos na Tabela 4, a potência hidrelétrica mundial dobra em capacidade a potência nuclear instalada no planeta. No entanto, a eletricidade de origem nuclear em 2004 foi de 2.740 TWh (15,7 % do total), enquanto que a de origem hidrelétrica foi somente ligeiramente superior, 2.809 TWh, ou 16,1% do total²¹. Tecnicamente, falamos que o *fator de carga* da geração hidrelétrica é inferior ao da geração nuclear. O fator de carga de uma instalação geradora em um período determinado, ou a sua produtividade, é o tanto por cento equivalente do tempo que a mencionada instalação funcionaria em sua potência máxima para gerar a mesma energia, ou o tanto por cento da potência máxima em que funcionaria de forma constante. O fator de carga sempre é inferior a 100 %.

Por trás das variações do fator de carga de uma instalação – ou um dispositivo – podemos encontrar situações de duas naturezas. Por um lado, como é lógico no caso de muitos fluxos de energia renovável, só quando o fluxo está disponível é possível o seu aproveitamento: os aerogeradores só geram eletricidade quando há vento, e os painéis fotovoltaicos só quando há sol no céu podem converter os fótons de luz em eletricidade. Por outro lado, temos o caso da geração elétrica que usa um combustível. Nela, desaparece a dependência que antes existia do fluxo renovável. Em nossos lares não temos por que depender de que saia o sol para dispor de água quente na torneira; para isso só devemos queimar na caldeira o gás natural que recebemos pelo encanamento de gás. Mesmo assim, a dependência não desaparece em absoluto, já que passamos a depender do fornecimento de combustível. Na geração baseada no consumo de combustíveis fósseis aparece a dependência energética do fornecimento dos mencionados combustíveis.

Do mesmo modo que acontece no mundo da economia, podemos nos aproximar da análise do sistema energético tanto desde o lado da oferta, como desde o ponto de vista da demanda. O conceito de fator de carga também é aplicável ao consumo de energia, e, de fato, no consumo o mais comum é que o fator de carga seja sempre muito inferior a 100%. O caso do automóvel é especialmente significativo, já que o seu fator de carga é especialmente baixo: um automóvel pode talvez desenvolver uma potência de 100 CV, e assim acontecerá quando se pisa fundo no acelerador em uma ultrapassagem; não obstante, a potência média que o motor desenvolve ao longo de sua vida é muito mais baixa; ainda mais quando o carro está parado na garagem. De um modo geral, as máquinas, aparelhos, dispositivos que consomem energia não funcionam em um ritmo constante. Alguns – os sistemas de iluminação, por exemplo – consumirão mais energia quando não há sol; outros – a máquina do sistema produtivo – estarão mais sincronizados com a atividade produtiva; o uso de outros conversores, no entanto, dependerá do clima: pensemos nos sistemas de ar condicionado nos dias mais calorosos de verão, ou o aquecimento na época mais fria do inverno.

Em nossa sociedade, o consumo de energia não é em geral constante, mas sim variável segundo a atividade econômica, o ciclo dos dias, o clima etc. Em um sistema energético concreto, em qualquer momento, deverá ser dado um ajuste entre oferta e demanda de energia, entre geração e consumo. Sobre este ajuste, o fator de carga do sistema irá variando. Esta variação se observa de forma insuperável no caso da geração elétrica. A Tabela 6 mostra tanto a eletricidade gerada anualmente como os fatores de carga segundo tipos de geração, para o ano 2007, no sistema elétrico espanhol peninsular²².

Tabela 6. Fatores de carga da geração elétrica na Espanha, 2007 (Fonte: REE).

Fator de carga da geração elétrica na Espanha (final de 2007)

Tipo de geração	Potência instalada (GW)	Energia gerada (GWh, % total)	Fator de carga (%)
Hidráulica	16,66	29.730, 10,7 %	20,37
Nuclear	7,72	55.415, 20 %	81,98
Carvão	11,4	69.965, 25,2 %	69,91
Fuel-gás	5,9	2.317, 0,83 %	4,49
Ciclo combinado	20,2	65.015, 23,42 %	36,82
Eólica	13,0	26.355, 9,5 %	23,09
Outras	9,9	28.858, 10,4 %	33,27

No total, a potência do sistema elétrico espanhol peninsular é de quase 85 GW. Por tipos de geração, o parque hidrelétrico foi o maior na Espanha até abril de 2007, com quase 17 GW. No entanto, as centrais nucleares e as alimentadas com carvão geram mais eletricidade que o parque hidrelétrico, e há poucos meses o parque de centrais de ciclo combinado também contribuiu com mais potência para a rede que o hidrelétrico: mais de 20 GW no início de 2008. Se prestarmos atenção à coluna do fator de carga da Tabela 6, observaremos que cada tipo de geração tem um regime de funcionamento muito diferente. As centrais nucleares têm um fator de carga muito alto, superior a 80%. As centrais nucleares funcionam à potência máxima de forma contínua, e só são paradas periodicamente para realizar as revisões técnicas, ou para recarregar o combustível nuclear. Na geração elétrica do sistema espanhol, as centrais térmicas de carvão têm um peso importante - a eletricidade por elas gerada supõe mais de 25% do total -, e nelas o fator de carga também é muito alto, quase 70%. O carvão, além de ser muito contaminante é re-

lativamente barato; além disso, as centrais térmicas de carvão têm custos fixos - a própria central - relativamente altos, e principalmente, a sua capacidade de regulação é baixa: demoram muito tempo para ser ligadas e desligadas. Por tudo isso, funcionam, normalmente, no regime de potência mais alto possível. O fator de carga da geração eólica é muito mais modesto: em torno de 25 %. A geração que apresenta um fator de carga mais reduzido é a hidrelétrica, ainda que apresente um parque de potência muito grande. Isto pode surpreender muitas pessoas, mas pode ser compreendido. Se as represas hidrelétricas funcionassem de forma constante ao máximo de potência, as represas se esvaziariam em poucos dias. As represas hidrelétricas constituem uma das colunas do *sistema de regulação elétrica*, junto com a geração térmica a partir de combustíveis fósseis: em cada momento, mediante a regulação de seu fator de carga - a potência que entregam em cada momento - ajustam a geração de eletricidade no sistema à demanda. Deve-se levar em consideração, além disso, que a capacidade de regulação das centrais hidrelétricas é a mais alta do sistema: as turbinas podem chegar a ser enormes, entregando grandes potências, e podem começar a funcionar ou parar em poucos minutos. Assim, são fundamentais para poder fazer frente aos *auges de demanda* no sistema - desde que haja água na represa.

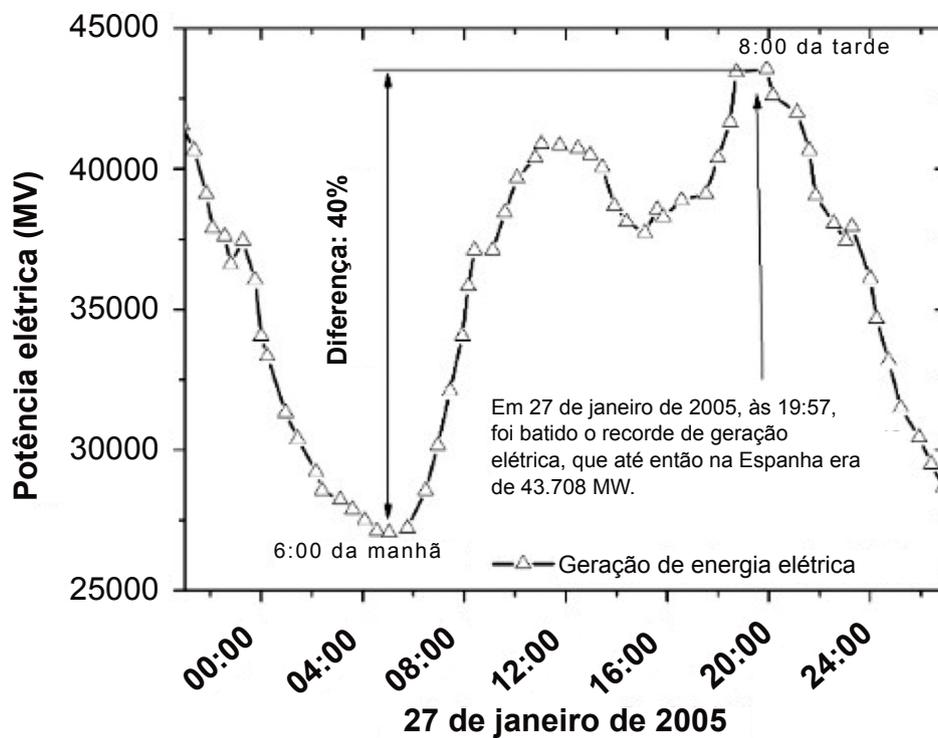


A REDE ELÉTRICA

Um funcionamento adequado da rede elétrica é um requisito essencial na sociedade atual²³. Certamente estamos muito acostumados a comprovar como, ao apertar qualquer interruptor, automaticamente, algum aparelho elétrico começa a

funcionar. Sendo certo que alguns aparelhos – a maioria dos pequenos dispositivos eletrônicos – se alimentam mediante pequenas baterias, a energia elétrica não pode ser armazenada em grande escala. A eletricidade à qual a cada momento temos acesso através da rede elétrica, nesse mesmo instante está sendo gerada em uma central nuclear, uma central de ciclo combinado, ou no aerogerador de um parque eólico. Como a demanda de energia é variável, a geração também deve ir variando a cada momento, ajustando-se à demanda – o consumo –, e este ajuste é, exatamente, um dos elementos mais importantes do funcionamento da rede elétrica. Felizmente, é possível prever de algum modo a demanda de energia elétrica, já que de um modo geral a curva de demanda tem um perfil semelhante a cada dia, como o que se pode observar na Figura 2²⁴.

Figura 2. Curva de geração elétrica na Espanha em 27 de janeiro de 2005 (Fonte: REE).



Como se pode comprovar na Figura 2, todas as curvas de geração - e de demanda - elétrica apresentam uma queda durante as primeiras horas da manhã, em torno do mínimo diário. A partir desse instante, a demanda de energia aumenta com rapidez, até o meio-dia. Nesse momento costuma suceder o primeiro máximo diário de demanda elétrica, quando a atividade econômica se encontra em seu ponto culminante. Na parte da tarde o consumo elétrico diminui um pouco, para voltar a aumentar nas últimas horas da tarde, até que entre as oito e às nove horas da noite - quando o sol já se pôs, a iluminação artificial se acende, e a população prepara o jantar em casa - volta a acontecer um novo auge de consumo, que no inverno será de um modo geral inclusive mais alto que o de meio-dia. Ao longo da noite e da madrugada a demanda voltará a cair com rapidez, até alcançar um novo mínimo na madrugada do dia seguinte.

No dia-a-dia, as curvas de demanda são muito parecidas, com poucas mudanças, que por outro lado serão relativamente previsíveis. Nos finais de semana e nos feriados toda a curva de demanda descende; nos dias calorentos de verão aumenta o consumo nas horas centrais do dia, devido à grande utilização de sistemas de ar condicionado, do mesmo modo que nos dias mais frios de inverno a conexão massiva à rede de sistemas de aquecimento levanta o nível do auge noturno de consumo.

A curva que aparece na Figura 2 tem uma relevância especial, porque corresponde a um dia no qual se bateu o que até então tinha sido o recorde de geração na rede elétrica peninsular do Estado. Em 27 de janeiro de 2005, às oito da noite, foram gerados em total 43,7 gigawatts de potência. O mínimo de geração nesse mesmo dia foi de 27 gigawatts, por volta das seis da manhã. Como se vê, a parte variável da geração elétrica costuma estar em torno de 40% do máximo de geração. Em geral, os outros 60% supõe a *base de geração*, que nunca se apaga e que pode funcionar com os fatores de carga mais elevados. Neste trecho encontraremos, por exemplo, a geração nuclear, e uma grande parte da geração térmica a partir de combustíveis fósseis, fundamentalmente a de carvão, mas também cada vez mais os ciclos combinados de gás natural.

Como se pode entender, o ajuste entre oferta e demanda de energia elétrica na rede elétrica não é exatamente uma questão sem importância. Para conseguir o mencionado ajuste é fundamental a *capacidade de regulação*. O sistema elétrico tem duas vias para realizar o mencionado ajuste, ou regulação; uma desde o lado da demanda, a segunda desde a oferta. Começando pela primeira, seu fundamento é simples: o regulador do sistema - na Espanha a companhia Red Eléctrica de Es-

paña - tem acordado com alguns grandes consumidores - em geral grandes indústrias, que na Espanha são 200 empresas com um valor total de consumo de 2 GW - o desligamento ou desconexão da rede, no caso de que a geração em um dado momento não seja capaz de fazer frente à demanda. Como contrapartida, obviamente, estes grandes consumidores conseguem em troca descontos e abatimentos importantes em suas faturas. Mesmo assim, a desconexão seletiva de alguns clientes é o último recurso que resta ao regulador, já que o sistema tem outros meios desde o lado da oferta para fazer frente à variabilidade da demanda. O sistema põe em andamento a geração complementar se a demanda sobe, ou reduz a geração em algumas centrais se a demanda diminui - até parar completamente a geração, se é necessário e possível tecnicamente. Este tipo de regulação não é possível na mesma medida em todos os tipos de geração. Assim como mencionamos acima, a geração nuclear, por exemplo, é muito rígida e apresenta uma capacidade de regulação quase nula. As centrais térmicas de carvão também não podem variar a sua potência muito rapidamente, e podem chegar a precisar de mais um dia para ser acesas ou completamente apagadas. As centrais de ciclo combinado, que queimam gás natural, são pelo contrário bastante flexíveis, e podem ajustar a sua potência em intervalos horários, ainda que a partida no frio seja mais lenta que quando já está em funcionamento a uma potência muito baixa. A geração hidrelétrica é capaz de responder à demanda em prazos de minutos, mas lembremos uma vez mais que as represas estão limitadas pela água que contêm - em 2007 a energia hidrelétrica supôs somente 10,7% do total da eletricidade gerada. A regulação da rede não tem por que forçar o desligamento das unidades de geração, mas sim demanda uma capacidade para poder fixar a quantidade de energia elétrica que se entrega em cada momento, ou seja, a potência, e com relação à potência máxima da instalação, o seu fator de carga. No dia de hoje, vistos os dados da Tabela 6 e da Figura 2, parece óbvio que os combustíveis são fundamentais para conseguir a regulação da rede elétrica, já que esta está fundamentalmente em mãos da geração termelétrica com carvão e gás natural.

A DEMANDA DE
ELETRICIDADE MAIS ALTA A
CADA ANO, POR UM LADO, E
O ESCASSO NÍVEL DE
INVESTIMENTOS NA
INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTE E
DISTRIBUIÇÃO, POR OUTRO,
COLOCAM O
FUNCIONAMENTO DA REDE
EM UM NÍVEL DE
COMPLEXIDADE
INSUPORTÁVEL.

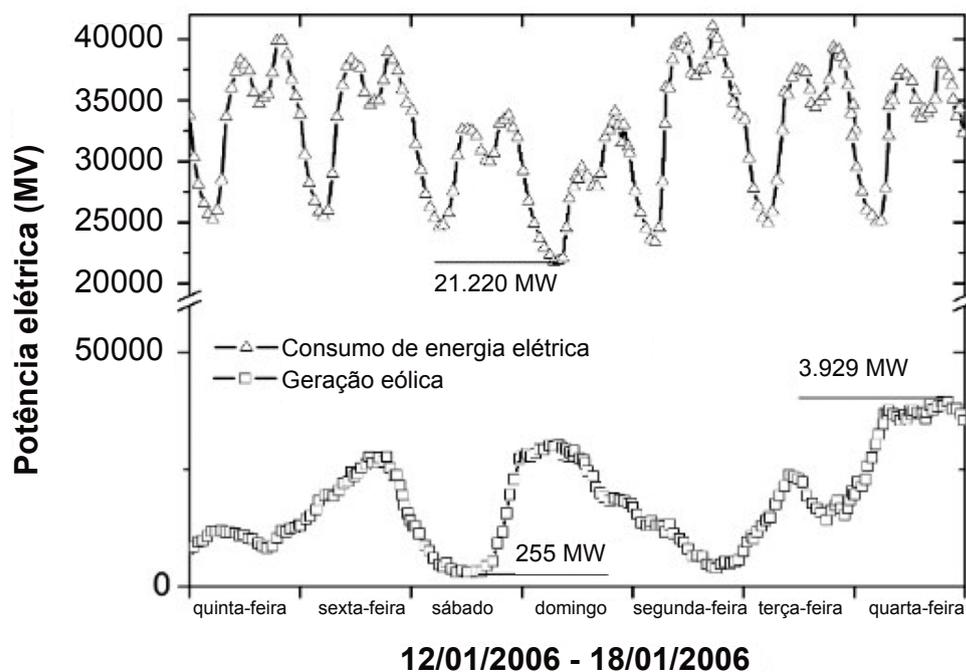
O máximo histórico de 44 GW, alcançado em janeiro de 2005, mesmo assim, se encontrava longe da soma total do parque de geração na Espanha, quase 70 GW no início de 2005²⁵. No entanto, naquele momento teria sido muito complicado chegar a fornecer através do sistema uma potência que ultrapassasse os 50 GW, já que é impossível colocar em funcionamento em qualquer momento toda a potência instalada. Algo assim aconteceu no verão daquele ano de 2005. Em 22 de junho, às 17h21min da tarde, houve um auge de demanda de 38,6 GW de potência no sistema elétrico peninsular; de fato, o recorde de demanda no verão até aquele momento. Apesar de estar longe da marca alcançada no inverno anterior, a companhia Red Eléctrica Española, última responsável pelo funcionamento de toda a rede de distribuição de energia elétrica no Estado, avisou abertamente sobre o risco de blecautes²⁶: por aqueles dias, as centrais nucleares de Vandellòs e Cofrentes estavam paradas, em geral havia pouco vento - naquele momento a geração eólica somava só 1,5 GW -; para piorar as coisas, a França se encontrava em greve, o que limitava em grande medida o fluxo de energia que podia ser importada do outro lado dos Pirineus. Recentemente, em 19 de novembro de 2007, conforme ia se aproximando das sete horas da tarde e da hora de máxima demanda diária de energia, a folga de geração se reduziu a pouco mais de 600 megawatts. Com pouco vento e as represas quase vazias, várias unidades nucleares paradas por recarga e - de forma suspeita - muitas centrais térmicas em revisão, a REE se viu obrigada a organizar a desconexão das 200 grandes empresas durante três horas para poder acomodar a demanda à capacidade de produção²⁷. Nos dias seguintes o blecaute seletivo gerou um duro cruzamento de acusações entre a administração e o agente regulador, por um lado, e as empresas elétricas, por outro²⁸.

E neste panorama, como podem contribuir as energias renováveis? As centrais hidrelétricas, assim como já indicamos, contribuem para a capacidade de regulação na rede para fazer frente à variabilidade da demanda de eletricidade; mesmo assim, a gestão dos recursos hídricos é realizada com grande cuidado, já que a energia que as grandes represas armazenam depende em última instância da pluviosidade, e não podemos esquecer, além disso, que estes devem cumprir com outras funções também fundamentais, que demandam por sua vez os seus próprios regimes de regulação.

No sistema elétrico da Espanha, a potência eólica supõe quase a sexta parte do total de geração. No entanto, a capacidade de regulação da energia eólica é muito limitada. Outros fluxos de energia renovável apresentam diferentes características, mas com uma capacidade de regulação também deficiente, quando não

nula²⁹. A Figura 3 mostra a geração eólica na parte peninsular da Espanha ao longo de toda uma semana do mês de janeiro de 2006. Na parte superior da figura aparece a evolução do consumo elétrico total. Observa-se claramente que a geração eólica não está em absoluto sincronizada com o consumo total. A geração eólica é muito mutável - observe-se a variação de geração na tarde de sábado; deve-se ressaltar, além disso, que a figura mostra a soma de gerações em toda a península, e não a de um parque isolado -, e o que é mais grave, a mencionada geração é em grande medida imprevisível, pelo menos se não é em um prazo muito curto³⁰.

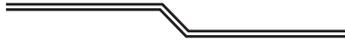
Figura 3. Geração eólica e consumo total na Espanha entre 12 e 18 de janeiro de 2006 (Fonte: REE).



Os blecautes sucedidos tanto na América do Norte quanto na Europa e na América nos últimos anos - no verão de 2003 aconteceram blecautes na Dinamarca, Itália e Reino Unido; em novembro de 2006 um blecaute originado na Alemanha deixou sem luz meia Europa; passou à história o blecaute de Nova York do verão de 2003, e na Catalunha o do verão de 2007 - deixam bem clara a complexidade da gestão do sistema elétrico. Na opinião de muitos especialistas, nos países desen-



volvidos, a rede elétrica se encontra em estado crítico, até o ponto de chegar a opinar que a sua atividade é quase incontrolável³¹. A demanda de eletricidade mais alta a cada ano, por um lado, e o escasso nível de investimentos na infraestrutura de transporte e distribuição, por outro, colocam o funcionamento da rede em um nível de complexidade insuportável. Nos EUA, estudos indicam que as probabilidades empíricas de que sucedam falhas na rede estão resultando ser mais altas do que o esperado em análises teóricas. Isto está obrigando alguns especialistas a utilizarem modelos que se afastam do usado até agora, entrando no terreno dos sistemas não lineares e na teoria do caos. O comportamento da rede está se complicando muito, e não parece que uma utilização massiva de fluxos de energia renovável melhore o panorama.



O PAPEL DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS COMO VETOR DE ENERGIA

Na atualidade, os combustíveis fósseis são imprescindíveis: 70% da energia elétrica provém dos combustíveis fósseis, gerada em todo o mundo em milhares de centrais termoelétricas. De fato, 80% da energia comercial primária no planeta é o petróleo, gás natural ou carvão: imprescindível na indústria, no transporte, na agricultura, na construção... os combustíveis fósseis são matéria prima indispensável em praticamente todos os setores da atividade econômica. O asfalto sobre o qual circulam os automóveis tem a sua origem no petróleo; o hidrogênio e a energia indispen-



sáveis para fabricar os adubos nitrogenados tão utilizados na agroindústria provêm do gás natural; os tecidos sintéticos que vestimos e em geral todos os plásticos são fabricados pelo setor petroquímico processando petróleo e gás natural; a contribuição de todos os combustíveis fósseis é fundamental no setor farmacêutico etc.

Mas os combustíveis fósseis têm outro papel muito importante, que com frequência esquecemos, e é muito simples ainda que absolutamente fundamental: servem para armazenar energia. Os combustíveis fósseis são um *vetor energético*, ou seja, um sistema ou uma substância que utilizamos para armazenar energia, ou para transportar energia de um lugar para outro. A função que cumprem os combustíveis – fundamentalmente os líquidos – como depósito de energia é imprescindível em muitos setores. No setor de transporte, por exemplo, os derivados do petróleo são os mais utilizados. E também na regulação da geração de energia elétrica os combustíveis fósseis são imprescindíveis, já que a eletricidade não pode ser armazenada.

A energia elétrica também é um vetor energético fundamental que apresenta muitas vantagens. É transportada com alta eficiência e baixo custo a longas distâncias. Tanto no sistema produtivo como em nossa atividade diária, estamos rodeados de máquinas e dispositivos alimentados diretamente pela rede elétrica. Na cadeia energética, os vínculos relacionados à eletricidade se situam entre os mais importantes. Mas no dia de hoje – e certamente assim continuará sendo por muito tempo – é impossível armazenar a energia elétrica em grande escala. A única solução que nos resta é converter a energia elétrica em outro tipo de energia que possa ser armazenada. Opções, *sim que existem*, mas certamente nenhuma tão confortável como um bom depósito de gasolina – enquanto a gasolina barata estiver acessível, claro.



NOTAS DE RODAPÉ

1. Publicado no *Energía y deuda ecológica. Transnacionales, cambio climático y alternativas*. Eds. Iñaki Barcena, Rosa Lago y Unai Villalva. Barcelona: Icaria, 2009. pág. 299-332, que é por sua vez uma reescritura, atualizada e em alguns aspectos ampliada, do capítulo *Energiaren gaineko argibide batzuk*, do livro *Energia urriko mundu baterako gida*, publicado pela Fundação Manu Robles-Arangiz Institutua, Bilbao, 2008.
2. E por isso calor, trabalho e energia são medidos com a mesma unidade.
3. Se a energia não se destrói, o ciclo energético deveria ser infinito. No entanto, como a energia útil vai-se reduzindo em cada etapa, podemos considerar que o ciclo se acaba quando a energia disponível se reduz ao mínimo.
4. *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization*, Office of Science, U.S. Department of Energy, abril de 2005, pág. ix.
5. Este é certamente o erro mais grave cometido na citação anterior. Se queremos comparar o consumo comercial de combustíveis fósseis com o fluxo solar, deveríamos responder a esta pergunta: quantas horas de sol foram necessárias em anteriores etapas geológicas do planeta para dar lugar à formação dos combustíveis fósseis que a humanidade consome a cada ano? Certamente não só horas, mas também anos, e inclusive séculos...
6. Vaclav Smil, *Energies. An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization*, 1998; Internacional Energy Agency, *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2006*; British Petroleum, *BP Statistical Review of World Energy June 2007*.
7. Vaclav Smil, *The Earth's Biosphere. Evolution, dynamics, and change*, 2003, pág. 181-197.
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *FAO Statistical Yearbook 2005-2006*.
9. Un detallado balance energético del flujo geotérmico terrestre puede consultarse en C. Clauser, *Energy Technologies. Subvolume C: Renewable Energy*, Capítulo 8, *Geothermal energy*, pág. 493-501.
10. A tonelada não é uma unidade de peso muito adequada, já que não é padrão. De fato, existem três diferentes: a tonelada britânica (1.016 kg), a tonelada americana (907 kg) e a geralmente utilizada tonelada métrica (1.000 kg).
11. Jeremy Rifkin, *A economia do hidrogênio*, 2002.



12. Um bom resumo do atual estado da arte da tecnologia do hidrogênio pode ser consultado em *Basic Research Needs for the Hydrogen Economy*, Office of Science, U.S. Department of Energy, maio de 2003; também de forma resumida em Gorka Bueno, *Energia urriko mundu baterako gida*, pág. 189-200.
13. De entrada, a simplicidade e a confiabilidade do armazenamento dos combustíveis líquidos a temperatura ambiente parece inigualável devido ao hidrogênio e à energia elétrica.
14. Energy Information Administration, <<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/electricitycapacity.html>>; Rede Elétrica da Espana, *Boletim mensal novembro 2007*.
15. Vaclav Smil. *Energies. An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization*, 1998, 79-92 or.
16. Pode ser consultada uma interessantíssima análise do desenvolvimento histórico que sofreu a utilização dos fluxos de energia por parte da humanidade ao longo da história, em Vaclav Smil, *Energy in World History*, 1994.
17. Vaclav Smil, *Energies. An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization*, 1998, pág. 120.
18. Esta história, a amistosa controvérsia de há um século entre Edison e Ford em torno a se havia que apostar pelo motor à gasolina ou no elétrico para fazer mover os automóveis, mostra claramente a complexidade da implementação real das diversas tecnologias energéticas. Ford, firme defensor do motor à gasolina, se viu obrigado a abandonar a empresa de Thomas Edison - era um de seus melhores engenheiros - já que este último apostava claramente pelo motor elétrico, muito mais eficiente. Os resultados são visíveis: hoje, os automóveis são da marca *Ford*, não *General Electric*.
19. *Como fazer mais com menos. Livro Verde sobre a eficiência energética*, Comissão Europeia, junho de 2005.
20. Para se submergir no fundamento da fotossíntese, consultar *Photosynthesis*, 1969, escrito há 40 anos por E. Rabinowitch y Govindjee, e acessível através da rede: <<http://www.life.uiuc.edu/govindjee/photosynBook.html>>, com um detalhado balanço energético do processo nos primeiros capítulos do livro.
21. Internacional Energy Agency, *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2006*.
22. Red Eléctrica de España, *Boletim mensal novembro 2007*.
23. Para uma visão geral do funcionamento desde diversos pontos de vista (técnico, econômico etc.) da rede elétrica, consultar Antonio Gómez Expósito (Ed.), *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*, Capítulo 1, *Los sistemas de energía eléctrica*, 2002, pág. 1-68.
24. As curvas de geração do parque elétrico peninsular estão disponíveis através da página eletrônica da Red Eléctrica de España. A curva da Figura 2, correspondente a 27 de janeiro de 2005, com mais informação, pode ser consultada em: <http://www.ree.es/operacion/detalle_curva_demanda.asp?grafico=demanda20050127&hoy=0>.
25. Até janeiro de 2008 o parque de geração aumentou desde o início de 2005 em quase 16 GW, desde 68,9 até 84,7 GW, fundamentalmente através da instalação de centrais de ciclo combinado



de gás natural (11,8 GW a mais) e novos parques eólicos (3,2 GW a mais).

26. *Relatório Mensal. Mercados da energia*, InfoPOWER, junho de 2005, pág. 127.

27. O recorte é perfeitamente discernível nas curvas de demanda prevista e geração, proporcionadas por REE em sua página: < http://www.ree.es/operacion/detalle_curva_demanda.asp?grafico=demanda20071119&hoy=0>.

28. *À beira do blecaute... uma vez mais*, El País, 23 de novembro de 2007.

29. O Real Decreto 661/2007 regulador do regime especial de produção de energia elétrica na Espanha qualifica de fontes de energia primária não administráveis a energia fotovoltaica, termelétrica, eólica, geotérmica, das ondas etc. Ao contrário do que possa parecer, esta consideração supõe em alguns aspectos uma discriminação positiva em seu tratamento, ao dar lugar a determinadas vantagens (de prioridade de venda de energia, por exemplo).

30. Os prazos temporários em que se movem as atuais técnicas e modelos de previsão de velocidade do vento se situam entre 1 e 3 horas: Thomas Ackermann, *Joined up thinking. Grid integration in Germany*, RENEWABLE ENERGY WORLD, julho-agosto de 2005, pág. 158-169.

31. *The Unruly Power Grid*, IEEE Spectrum, agosto de 2004, pág. 16-21



Produção: Espalhafato Comunicação
Capa/Fotografia e Edição: Stefano Figalo
Tradução: Luisa Lamas
Revisão: Rita Luppi
Impressão: Reproarte

