

*Energias Sustentáveis - Sem conversa fiada**

Versão 3.5.2. 3 de Novembro, 2008

Esta tradução é parte dos trabalhos do projeto de extensão

"Palestras sobre o livro Sustainable Energy - without the hot air"

coordenador pelo Prof. Dr. Rogério Gomes de Oliveira e com auxílio

do PROBOLSA/PROEX/UFSC à aluna do curso de graduação em

Engenharia de Energia Thaís Doll Luz.

A tradução do livro foi feita por Thaís Doll Luz e pelo Prof. Dr. Rogério Gomes de Oliveira.

Este arquivo apresenta apenas os capítulos I e II da tradução do livro "Sustainable Energy - without the hot air". O capítulo III estará disponível em breve.

* Nota do tradutor: "hot air" do título original, significa literalmente "ar quente". Porém, esta expressão pode estar relacionado a um discurso com palavras vazias ou informações inúteis.

Infelizmente para nós, tradutores, não existe uma expressão em Português que consiga expressar apropriadamente o duplo sentido do título original.

A busca por energia segura e sustentável representa um dos maiores desafios da atualidade. Mas quanta energia nós precisamos, e é possível que fontes renováveis possam supri-la? David MacKay se propõe a encontrar a resposta através de uma análise numérica cuidadosa do que nós consumimos e do que nós podemos produzir. Suas conclusões revelam as escolhas difíceis que devem ser urgentemente tomadas e os leitores interessados em como nós vamos poder fornecer energia para a nossa sociedade no futuro acharão neste livro uma leitura esclarecedora. Para qualquer um com influência na política energética, seja governamental, através de negócios ou grupos de campanhas, este livro deve ser uma leitura compulsória. Esta é uma conta tecnicamente precisa e legível dos desafios à frente. Ele será uma referência de núcleo na minha estante por muitos anos.

Tony Juniper

Ex-diretor Executivo, Amigos da Terra.

Escrito de forma engajada, cheio de informações úteis, e refrescantemente factual.

Peter Ainswort MP

**Secretário do Estado do Meio-Ambiente,
Alimentação, e Assuntos Rurais.**

David MacKay se dispõe a dissipar as meias verdades, distorções e informações sem sentido que fazem parte do muito que nos é dito sobre mudanças climáticas e nossas necessidades energéticas. Este livro é facilmente lido e acessível. Ele corta opiniões sem fundamentos e nos leva aos fatos e imagens, que falam por si mesmos. É um guia útil tanto para os leigos quanto para os experts. Eu recomendo de coração.

Graham Stuart, MP

Este livro notável, de um especialista no campo energético, indica com grande clareza e objetividade, os vários caminhos alternativos de baixo-carbono que estão abertos para nós. Os que trabalham com política energética, no setor de decisões de empresas privadas, pesquisadores e ONGs, todos terão benefícios destas palavras de sabedoria.

Sr. David King FRS

**Chefe Conselheiro Científico
do Governo do Reino Unido, 2000-08.**

Comecei a ler o seu livro ontem. Tirei o dia de folga do trabalho hoje para que eu continuasse a lê-lo. Ele é fabuloso, espirituoso, sem besteiras, uma peça de trabalho valiosa, e eu estou ocupado mandando-o para todo mundo que eu conheço.

Matthew Sullivan

Carbon Advice Group Plc.

Esta é realmente uma valiosa contribuição para a contínua discussão sobre política energética. O autor utiliza uma potente mistura de aritmética e senso comum para dissipar alguns mitos e acabar com algumas crenças populares. O livro é uma referência essencial para o trabalho de qualquer um com interesse em energia e que realmente queira entender os números.

Lord Oxburgh KBE FRS

Ex-Presidente, Royal Dutch Shell

Este é um livro brilhante que é tanto rapidamente lido quanto altamente informativo.

Prof David Newbery FBA

Muita retórica desinformada é feita sobre as mudanças climáticas e os sistemas energéticos e há uma necessidade urgente para um estudo oficial destacando apenas

o que pode e o que não pode ser feito para atingir energia sustentável. Este livro incrivelmente importante preenche este vazio de forma técnica e legível. Ele deveria ser uma “leitura obrigatória” não apenas em casa e na indústria, mas em cada mesa dos Ministros do Governo, e não apenas no Reino Unido.

Michael Micher MP

Ex-Ministro do Meio-Ambiente

O livro de David MacKay define os padrões para todos os futuros debates sobre política energética e mudanças climáticas. A sua dedicação para com os fatos através de argumentos racionais é admirável em um campo cheio de propagandas e pensamentos idealistas de ambos os lados, e mesmo que as suas conclusões eventualmente expirem, como acontece com todo o trabalho científico, sua metodologia viverá por um longo tempo.

David Howarth MP

As escolhas que fazemos (ou falhamos em fazer) nos próximos anos sobre energia sustentável determinarão o que as futuras gerações do mundo herdarão. Como nós chegaremos em decisões racionais? Neste livro, David MacKay não nos diz o que escolher, mas como escolher. Aritmética básica é tudo o necessário para distinguir entre estratégias viáveis e sonhadoras. Qualquer um que se sinta responsável pelo futuro da nossa sociedade deveria ler este livro.

Prof Daan Frenkel FRS

Totalmente prazeroso de se ler. Extraordinariamente claro e envolvente.

Chris Goodall

Autor de *Dez Tecnologias para Salvar o Planeta*.

O livro de David MacKay é uma contribuição intelectualmente satisfatória e refrescante para a compreensão completa dos complexos assuntos de fornecimento e uso energético. Ele desbanca a armadilha emocional que se passa por política energética e coloca números reais nas equações. Deveria ser lido por todos, especialmente políticos.

Prof Ian Fells CBE

Fundador Presidente da NaREC,

O Centro de Energias Novas e Renováveis.

Prevenir o caos climático requerirá escolhas sociais, econômicas e tecnológicas sofisticadas e bem informadas. ‘Leis’ econômicas e sociais não são imutáveis – políticos podem e devem remodelar a economia para fornecer energia renovável e levar à mudança cultural para economizar energia – mas MacKay nos lembra que mesmo eles “não podem mudar as leis da física”! O livro de MacKay, sozinho, não contém todas as respostas, mas fornece uma fundação sólida para nos auxiliar a fazer escolhas bem-informadas, como indivíduos e, mais importante, como sociedade.

Duncan McLaren

Chefe Executivo, Amigos da Terra Escócia.

MacKay traz uma bem-vinda dose de senso comum na discussão sobre fontes energéticas e uso. Ar fresco substituindo o ar quente.

Prof Mike Ashby FRS

Autor de *Materiais e o Meio Ambiente*

Ao focar nas métricas do consumo e produção energética, em adição com a aspiração que todos temos por energias renováveis, o livro de David MacKay fornece uma bem-vinda adição à literatura sobre energia. “Sustainable Energy – without the hot air” é um grande

empreendimento que fornece tanto um guia prático quanto um manual de referências. Talvez ironicamente para um livro sobre energia sustentável, os números nas contas de MacKay ilustram como será desafiadora a substituição dos combustíveis fósseis, e porque tanto a conservação das antigas e as novas tecnologias energéticas são necessárias.

Darran Messem

Vice Presidente do Desenvolvimento de Combustível, *Royal Dutch Shell*

Este é um livro obrigatório para qualquer um que queira ajudar a curar o nosso mundo.

Carol Atinkson

Chefe Executiva da BRE Global

Por fim um livro que revela de forma compreensível os fatos verdadeiros sobre energia sustentável de uma forma que é facilmente legível e divertida. Uma "leitura obrigatória" para todos aqueles que possuem um papel na resolução da nossa crise energética.

Robert Sansom

Diretor de Estratégia e Desenvolvimento sustentável, EDF Energy

Tanto já foi escrito sobre suprir as necessidades energéticas futuras que parece ser difícil adicionar algo útil a isso, mas David MacKay conseguiu. Seu novo livro é um prazer de ser lido e será atrativo principalmente para pessoas práticas que querem entender o que é importante em termos energéticos e o que não é. Como Lord Kelvin antes dele, o Professor MacKay percebe que em muitos campos, e principalmente no energético, a menos que você consiga quantificar algo você nunca será capaz de entendê-lo propriamente. Como resultado, seu livro fascinante é

também uma mina de informações quantitativas para aqueles que algumas vezes falam com seus amigos sobre como nós fornecemos e usamos a energia, agora e no futuro.

Dr Derek Pooley CBE

Ex-Cientista Chefe do Departamento de Energia, Chefe Executivo da Autoridade de Energia Atômica do Reino Unido e Membro do Grupo Conselheiro sobre Energia da União Europeia.

A necessidade de reduzir a nossa dependência nos combustíveis fósseis e de encontrar fontes sustentáveis de energia é desesperadora. Mas boa parte desta discussão não tem sido baseada em fatos sobre como a energia é consumida e sobre como ela é produzida. Este livro preenche esta necessidade de uma maneira acessível, e uma cópia dele deve estar presente em todas as casas.

Prof Robert Hinde CBE FRS FBA

Comitê Executivo, Pugwash UK

Que livro adorável... Eu me sinto melhor assim como um paciente de câncer deve se sentir após ler algo aprofundado sobre sua doença.

Richard Procter

Belamente claro e incrivelmente legível.

Prof Willy Brown CBE

Eu levei o livro para o banheiro e quase que não saí mais de lá.

Matthew Moss

Sustainable Energy – without the hot air

David JC MacKay

Para aqueles que não terão o benefício de dois milhões de anos de reservas energéticas acumuladas.

Prefácio

Sobre o que trata este livro?

Eu estou preocupado em cortar as emissões de disparates no Reino Unido – disparates sobre energias renováveis. Todo mundo diz que acabar com o uso de combustíveis fósseis é importante, e todos nós somos encorajados a “fazer a diferença”, mas muitas das coisas que supostamente fazem a diferença não acrescentam em nada.

As emissões de disparates estão em alta no momento porque as pessoas ficam emotivas (por exemplo, sobre usinas eólicas ou nucleares) e ninguém fala sobre números. Ou caso os números sejam mencionados, eles são escolhidos de forma a soarem grandiosos, para causar uma impressão, e para ganhar pontos nos argumentos usados, ao invés de auxiliar em discussões sensatas.

Este é um livro que fala diretamente sobre números. O objetivo é guiar o leitor para desviar das armadilhas sobre o assunto e chegar a atitudes que realmente façam a diferença e em políticas que somem em benefícios.

Este é um Livro Gratuito.

Eu não escrevi este livro para fazer dinheiro. Eu o escrevi porque energia sustentável é importante. Caso você queira obter o livro de graça para o seu próprio uso, por favor, sinta-se à vontade: ele está na internet no *site* www.withouthotair.com.

Este é um livro gratuito, ou “livre”, em um segundo sentido: você está livre para usar todo o material neste livro, com exceção das ilustrações e das fotos com um fotógrafo nomeado, sobre o Creative Commons Attribution-Non-Comercial-Share-Alike 2.0 UK: Englando & Wales License. (As ilustrações e fotos são exceção pois os seus autores me deram permissão apenas para incluir no seu trabalho, e não para dividi-lo sobre a licença Creative Common.) Você está especialmente liberado para utilizar o meu material para fins educacionais. O meu *site* inclui arquivos de alta qualidade separados para cada uma das figuras deste livro.

Como utilizar este livro?

Alguns capítulos começam com uma citação. Por favor, não assuma que o fato de eu citar alguém significa que eu concorde com essa pessoa; pense nessas citações como provocações, como hipóteses a serem criticadas se necessário.



Muitos dos primeiros capítulos (numerados 1, 2, 3...) possuem capítulos técnicos mais longos (A, B, C,...) associados a eles. Estes capítulos técnicos começam na página 326.

No final de cada capítulo estão ainda mais notas e apontamentos para fontes e referências. Eu acho que notas de rodapé distraem se elas estiverem juntas ao texto principal do livro, então este livro não possui notas de rodapé. Se você ama notas de rodapé, você pode adicioná-las – praticamente todas as afirmações substantivas neste texto terão uma nota associada a elas no final do seu capítulo dando fontes para mais informações.

O texto também contém apontamentos para fontes na web. Quando um "link" para fontes da web for monstruosamente longo, eu utilizei o serviço Tiny URL, e coloquei os pequenos códigos no texto, desta forma – [yh8xse] – e o apontamento inteiro no fim do livro, na página 436. yh8xse é uma abreviação para um tiny URL, neste caso: <http://tinyurl.com/yh8xse>.

Eu aceito comentários e correções. Eu estou ciente de que algumas vezes eu faço besteira, e nas primeiras versões deste livro alguns dos números apresentados estavam errados por um fator de dois. Enquanto eu espero que os erros que persistem sejam menores do que isso, eu pretendo no futuro atualizar alguns dos números apresentados neste livro, conforme eu for aprendendo mais sobre energia sustentável.

Como citar este livro:

David JC MacKay. *Sustainable Energy – without the hot air.*

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Disponível gratuitamente no *site* www.withouthotair.com.

Sumário

Números, não adjetivos	1
1 Motivações	2
2 O balanço.....	26
3 Carros	35
4. Vento	39
5 Aviões	43
6 Solar.....	47
7. Aquecimento e Refrigeração	62
8 Hidroeletricidade	68
9 Iluminação	71
10 Vento do mar.....	75
11. Eletrônicos	85
12 Ondas	91
13 Alimentos e Agricultura	95
14 Marés	102
15. Objetos	111
16 Geotérmica	122
17 Serviços Públicos.....	127
18 Nós podemos viver com renováveis?	131
Fazendo a Diferença	143
19 Todo MUITO ajuda	144
20 Melhor Transporte.....	149
21 Aquecimento Inteligente	180
22 Uso Eficiente da Eletricidade.....	199
23 Combustíveis Fósseis Sustentáveis?	201
24 Nuclear?	206
25 Usar as renováveis de outros países?.....	229
26 Flutuações e armazenamento	240
27 Cinco planos energéticos para a Grã-Bretanha	263
28 Colocando os planos em perspectiva	277
29 O que fazer agora.....	286
30 Planos energéticos para a Europa, América, e o Mundo	298
31 A última coisa sobre a qual precisamos falar.....	309

32 <i>Dizendo sim</i>	322
Agradecimentos	323

Parte I,

Números, não adjetivos



1 Motivações

Nós vivemos em um período em que emoções e sentimentos contam mais do que a verdade, e existe um vasto desconhecimento de ciência.

James Lovelock

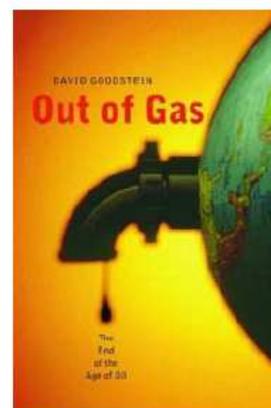
Recentemente eu li dois livros, um escrito por um físico e outro por um economista. Em *Sem Gás*¹ o físico da Caltech, David Goodstein, descreve uma iminente crise energética originada pelo Fim da Era do Petróleo. Esta crise acontecerá em breve, ele prevê: a crise nos atingirá não quando a última gota de petróleo for extraída, mas quando a extração de petróleo não puder suprir a demanda - talvez tão breve como 2015 ou 2025. Entretanto, mesmo que nós mudássemos toda a nossa matriz energética para a energia nuclear imediatamente, Goodstein afirma, a crise do petróleo seria apenas substituída pela crise *nuclear* em apenas vinte anos, mais ou menos, uma vez que as reservas de urânio também iriam se esgotar.

Em *O Ambientalista Cético*², Bjorn Lomborg pinta uma imagem completamente diferente. “Tudo está bem”. De fato, “tudo está melhorando”. Além disso, “nós não estamos nos direcionando para uma grande crise energética”, e “existe muita energia “.

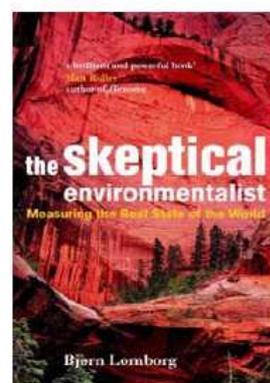
Como é possível que duas pessoas inteligentes tenham chegado a conclusões tão diferentes? Eu tinha que averiguar isso a fundo.

Energia entrou nas notícias na Grã-Bretanha em 2006. Ascendeu devido a grandes mudanças climáticas e pela triplicação no aumento do preço do gás natural em apenas seis anos, o calor da discussão está quente. Como a Grã-Bretanha deve lidar com as suas necessidades energéticas? E como o mundo deve lidar com isso?

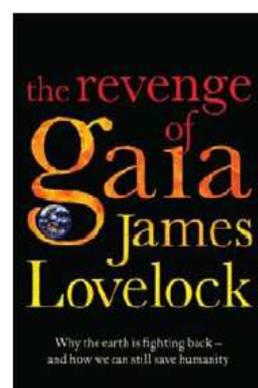
“Eólica ou nuclear”, por exemplo. Maior polarização de opiniões entre pessoas inteligentes é difícil de imaginar. Durante uma discussão sobre uma proposta de expansão da energia nuclear, Michael Meacher, ex-ministro do meio-ambiente, disse “se nós vamos cortar os gases de efeito estufa em 60% por volta de 2050 não haverá outro modo possível de fazer isso a não ser através do uso de renováveis;” Sir



Sem Gás (2004) de David Goodstein.



O Ambientalista Cético (2001) de Bjorn Lomborg.



A Vingança de Gaia: Por que a Terra está revidando - e como nós ainda podemos salvar a humanidade. James Lovelock (2006). ©Allen Lane.

¹ Título original: *Out of Gas*.

² Título original: *The Skeptical Environmentalist*.

Bernard Ingham, ex-funcionário público, argumentando a favor da expansão nuclear, disse “qualquer um que esteja dependendo das energias renováveis para preencher o buraco energético está vivendo em um mundo de sonhos e é, no meu ponto de vista, um inimigo das pessoas.”

Desacordo similar pode ser ouvido dentro do movimento ecológico. Todos concordam que *algo* deve ser feito com urgência, mas *o quê?* Jonathan Porritt, presidente das Comissões de Desenvolvimento Sustentável, escreve: “não existe justificativas para seguir adiante com planos para um novo programa para energia nuclear neste momento, e ... qualquer proposta deste tipo será incompatível com as estratégias de desenvolvimento energético [do Governo];” e “uma estratégia não nuclear pode e deve ser suficiente para fornecer todas as economias de carbono que nós precisamos para 2050 e além, e para assegurar acesso a fontes seguras de energia.” Em contraste, o ambientalista James Lovelock escreve em seu livro *A Vingança de Gaia*³: “Agora é muito tarde para estabelecer desenvolvimento sustentável.” No seu ponto de vista, energia da fissão nuclear, mesmo que não recomendada como uma panaceia de longo termo para o nosso planeta doente, é “a única medicina eficiente que temos agora.” Até porque as turbinas eólicas são “meramente ... um gesto de provar as credenciais ambientais [dos nossos líderes]”.

Este debate caloroso é fundamentalmente sobre números. Quanto de energia cada fonte poderia fornecer, a que custos econômicos e sociais, e com que riscos? Mas números reais são raramente mencionados. Em debates públicos, as pessoas apenas dizem “A energia nuclear é um poço de dinheiro” ou “Nós temos uma *grande* quantidade de ondas e ventos”. O problema com este tipo de linguagem é que não é o suficiente saber que algo é grandioso: nós precisamos saber como o “grande” se compara com outro “grande”, a saber sobre o nosso *grande consumo energético*. Para fazer esta comparação, nós precisamos de números, não adjetivos.

Quando os números são usados, seu significado é geralmente ofuscado pela enormidade. Números são escolhidos para impressionar, para ganhar pontos em uma argumentação, ao invés de para informar. “Os residentes de Los Angeles dirigem 142 milhões de milhas – a distância entre a Terra e Marte – todo santo dia.” “A cada ano, 10 milhões de hectares da floresta tropical são destruídos.” “6,350 bilhões de quilogramas de lixo são despejadas no mar todo ano.” “Os britânicos jogam fora 2,6 bilhões de fatias de pão por ano” “O papel desperdiçado a cada ano no Reino Unido poderia preencher 103 448 de ônibus de dois andares”.

³Título Original: *The Revenge of Gaia*.

Se todas as ideias ineficazes para resolver a crise energética fossem colocadas juntas, elas alcançariam a lua e voltariam . . . eu divago.

O resultado desta falta de números e fatos significativos? Nós somos atacados por uma inundação de inúmeras besteiras loucas. A BBC distribui conselhos sobre como nós podemos fazer nossa pequena parte para salvar o planeta – por exemplo “desligar o carregador do seu celular quando não estiver sendo usado;” se qualquer um se opor afirmando que carregadores de celulares não são *na verdade* nosso consumidor de energia número um, o mantra “toda pequena atitude ajuda” é gritado. Será que toda pequena atitude ajuda? Um mantra mais realístico é:

*Se todo mundo fizer um pouco, nós alcançaremos
apenas um pouco.*

As companhias também contribuem para a besteira diária quando eles nos dizem quão maravilhosos eles são, ou como eles podem nos ajudar a “fazer a nossa parte”. O *site* da BP, por exemplo, celebra as reduções de poluição por dióxido de carbono (CO₂) que eles atingem ao mudar o tipo de tinta usado para pintar os barcos da BP. Todo mundo cai nessa? Com certeza as pessoas devem notar que não é a pintura exterior, mas o que está *dentro* do tanque que merece atenção, para que as emissões de CO₂ na sociedade sejam significativamente cortadas? BP também criou um serviço na internet de absolvição de carbono, “targetneutral.com”, que clama que eles podem “neutralizar” todas as suas emissões de carbono, e que isto “não custa o mundo” – que na verdade a sua poluição de CO₂ pode ser limpa por apenas US\$65 por ano. Como isto pode ajudar? – se os custos verdadeiros para resolver o problema das mudanças climáticas fossem apenas US\$65 por pessoa então o governo poderia resolvê-lo com as moedinhas do bolso do ministro!

Ainda mais repreensíveis são companhias que exploram a atual preocupação pelo meio-ambiente oferecendo “baterias a base de água”, “celulares biodegradáveis”, “turbinas eólicas portáteis e fáceis de montar” e outras geringonças inúteis.

Ativistas também enganam. Pessoas que querem promover renováveis no lugar de energia nuclear, por exemplo, dizem “a energia eólica pode alimentar todas as residências no Reino Unido;” então eles dizem “novas estações de energia nuclear farão pouco para combater as alterações climáticas” porque 10 novas estações nucleares “reduzirão as emissões em apenas 4%”. Este argumento é enganador porque

o campo é alterado na metade do jogo, do “número de residências alimentadas” para a “redução nas emissões”. A verdade é que a quantidade de energia elétrica gerada pelas fantásticas turbinas eólicas que poderiam “alimentar todas as residências no Reino Unido” é *exatamente a mesma* quantidade gerada por 10 usinas nucleares! “Alimentar todas as residências no Reino Unido” contabiliza por apenas 4% das emissões da UK.

Talvez os maiores infratores no reino do besteiro sejam as pessoas que realmente deveriam saber mais do que isto – os publicadores de besteiras da mídia – por exemplo, *New Scientists* com o seu artigo sobre o “carro movido à água”.

Em um clima onde as pessoas não compreendem os números, jornais, ativistas, companhias, e políticos podem se safar até com homicídio.

Nós precisamos de números simples, e nós precisamos que os números sejam compreensíveis, comparáveis e lembráveis.

Com os números no lugar certo, nós estaremos melhores colocados para responder perguntas como:

1. Pode um país como a Grã-Bretanha viver por conta própria com as fontes renováveis?
2. Se todo mundo ligar seus termostatos um grau mais próximo da temperatura externa, dirigir carros menores, e desligar os carregadores de celular quando não estiverem em uso, uma crise energética será evitada?
3. A taxa para combustíveis de transporte deveria ser significativamente aumentada? Os limites de velocidade nas estradas deveriam cair pela metade?
4. Uma pessoa que escolhe turbinas eólicas ao invés de usinas nucleares é uma “inimiga das pessoas”?
5. Se as mudanças climáticas são “maiores do que o terrorismo”, os governos deveriam criminalizar “a glorificação de viajar” e escrever leis contra “advogar atos de consumo”?
6. Irá um interruptor para “tecnologias avançadas” nos permitir eliminar poluição de dióxido de carbono sem alterar o nosso estilo de vida?
7. As pessoas deveriam ser encorajadas a comer mais comida vegetariana?



Figura 1.1 Este panfleto do Greenpeace chegou com os meu lixo eletrônico em maio de 2006. Será que as adoráveis turbinas eólicas possuem a capacidade de substituir as odiadas torres de resfriamento?

8. A população da Terra é seis vezes maior do que o ideal?

Por que nós estamos discutindo políticas energéticas?

Três motivações diferentes governam as discussões sobre políticas energéticas atuais.

Em primeiro lugar, combustíveis fósseis são um recurso finito. Parece possível que petróleo barato (do qual nossos carros e caminhões se abastecem) e gás barato (com o qual nós aquecemos muitas das nossas edificações) acabem em um momento em que ainda estejamos vivos. Então nós buscamos alternativas de fontes energéticas. De fato, partindo do ponto que combustíveis fósseis são um recurso valioso, usados na manufatura de plásticos e outros tipos de coisas criativas, talvez nós devêssemos economizá-los para usos melhores do que o de apenas queimá-los.

Segundo, nós estamos interessados na segurança do fornecimento de energia. Mesmo que os combustíveis fósseis ainda estejam disponíveis em algum lugar no mundo, talvez nós não queiramos depender deste local se isto for deixar a nossa economia vulnerável aos caprichos de estrangeiros não confiáveis. (Eu espero que você possa ouvir a minha língua na minha bochecha.) Observando a Figura 1.2, certamente parece que os “nossos” combustíveis fósseis atingiram um pico. O Reino Unido tem particularmente um problema iminente com a segurança de fornecimento, conhecido como “deficiência energética”. Um número substancial de estações de carvão e nucleares estarão fechando na próxima década (figura 1.3), de modo que existe um risco que a demanda de eletricidade irá algumas vezes exceder o fornecimento de eletricidade, se planejamentos adequados não forem implementados.

Terceiro, é bastante provável que a utilização de combustíveis fósseis altere o clima. A culpa da mudança climática é colocada em diversas atividades humanas, mas o maior contribuinte para as alterações climáticas é o aumento de gases de efeito estufa produzidos pelo dióxido de carbono (CO_2). A maioria das emissões de dióxido de carbono vem da queima de combustíveis fósseis. E a maior razão para queimarmos combustíveis fósseis é para produzir energia. Então para consertar as mudanças climáticas, nós precisamos descobrir uma nova forma de conseguir energia. O problema climático é em sua maior parte um problema energético.

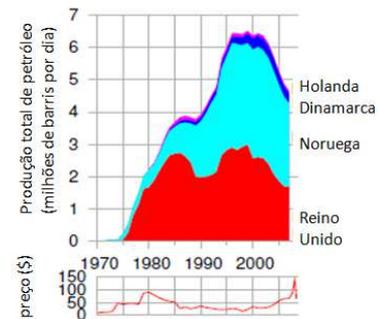


Figura 1.2. Os “nossos” combustíveis fósseis estão acabando? A produção de petróleo totalmente cru no Mar Norte, e o preço do petróleo em 2006, dólares por barril.

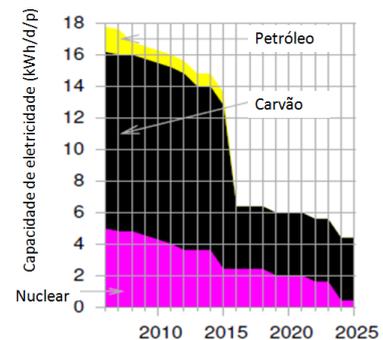


Figura 1.3. O buraco de energia criado pelos fechamentos de usinas do Reino Unido, como projetado pela companhia de energia EdF. Este gráfico mostra a prevista capacidade das estações de energia nuclear, carvão e petróleo por dia por pessoa. A capacidade é o máximo de energia fornecida por uma fonte.

A motivação de mudança climática

A motivação de mudança climática é discutida em três passos: um: a queima de combustíveis fósseis realizada pelos humanos faz com que a concentração de dióxido de carbono aumente; dois: o dióxido de carbono é um gás de efeito estufa; três: o aumento dos gases de efeito estufa aumenta a temperatura média global (e possui muitos outros efeitos).

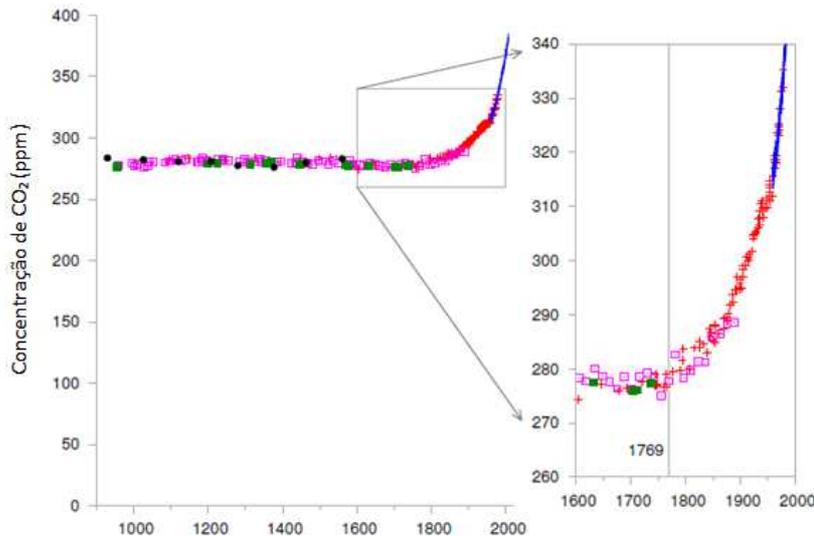


Figura 1.4. Concentrações de dióxido de carbono (CO₂) (em partes por milhão) nos últimos 1100 anos, medidos pelo ar preso em camadas de gelo (até 1977) e diretamente no Hawaii (de 1958 em diante).

Eu acho que algo pode ter acontecido ente 1800 d.C. e 2000 d.C. Eu marquei o ano 1769, no qual James Watt patenteou sua máquina a vapor. (A primeira máquina a vapor utilizável foi inventada 70 anos antes, em 1698, mas a de Watt era muito mais eficiente.)

Nós começamos com o fato de que as concentrações de dióxido de carbono estão aumentando. A Figura 1.4 mostra medidas das concentrações de CO₂ no ar do ano 1000 d.C. ao presente. Alguns “céticos” afirmaram que o aumento recente nas concentrações de CO₂ é um fenômeno natural. Será que “cético” significa “uma pessoa que nem sequer deu uma olhada nas datas?” Você não acha que, apenas possivelmente, *algo* pode ter acontecido entre 1800 d.C. e 2000 d.C.? Algo que não era parte dos processos naturais presentes nesses mil anos precedentes?

Alguma coisa de fato aconteceu, e ela foi chamada de Revolução Industrial. Eu marquei no gráfico o ano de 1769, no qual James Watt patenteou sua máquina a vapor. Enquanto a primeira máquina a vapor foi inventada em 1698, a máquina a vapor mais eficiente de Watt deu continuidade à Revolução Industrial. Uma das principais aplicações da máquina a vapor era o bombeamento de água para fora das minas de carvão. A Figura 1.5 mostra o que aconteceu com a produção de carvão na Grã-Bretanha a partir de 1769. A figura mostra a produção de carvão em unidades de bilhões de toneladas de CO₂ liberadas quando o carvão era queimado. Em 1800, o carvão

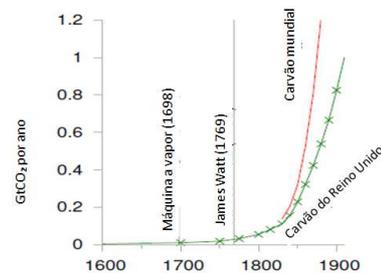
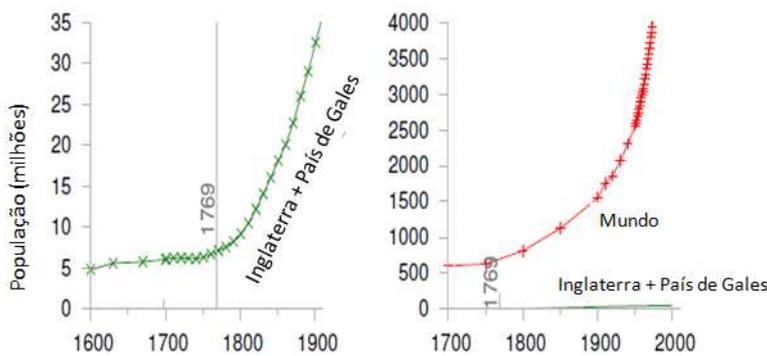


Figura 1.5. A história da produção de carvão no Reino Unido de 1600 a 1910. As taxas de produção são mostradas em bilhões de toneladas de CO₂ - uma unidade incompreensível, sim, mas não se preocupe: nós vamos personaliza-la brevemente.

era usado para fazer ferro, para construir navios, para aquecer edificações, para alimentar locomotivas e outras maquinarias, e é claro para alimentar as bombas que possibilitavam que ainda mais carvão fosse retirado para a superfície das colinas da Inglaterra de Gales. A Grã-Bretanha estava terrivelmente bem-dotada de carvão: quando a Revolução começou, a quantidade de carvão acumulada abaixo da Grã-Bretanha era praticamente a mesma quantidade de petróleo acumulado abaixo da Arábia Saudita.

Nos 30 anos entre 1769 e 1800, a produção anual de carvão da Grã-Bretanha duplicou. Após 30 anos (1830), ela duplicou novamente. A próxima duplicação da taxa de produção aconteceu em 20 anos (1850) e outra duplicação aconteceu em mais 20 anos, (1870). Este carvão permitiu que a Grã-Bretanha tornasse o mundo rosa. A prosperidade que veio para a Inglaterra e País de Gales foi refletida em um século de aumento populacional sem precedentes.



Eventualmente outros países começaram a agir no que a Revolução foi se espalhando. A Figura 1.6 mostra a produção de carvão na Grã-Bretanha e a produção de carvão no mundo na mesma escala que a figura 1.5, escorregando pela janela da

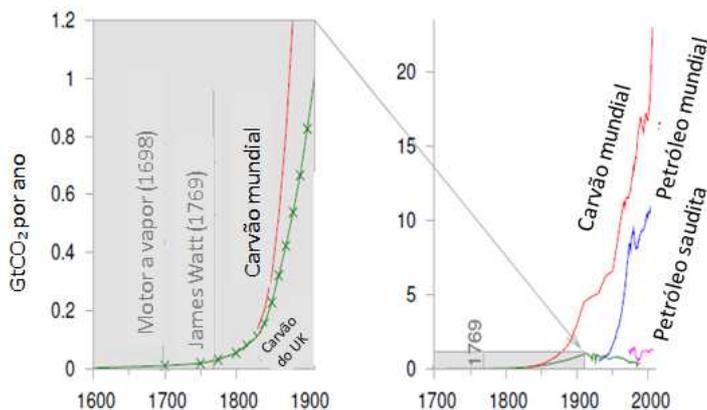
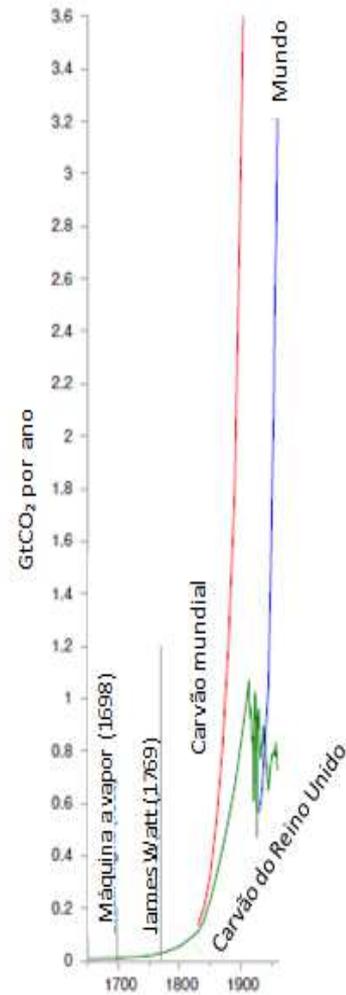


Figura 1.6. O que aconteceu a seguir. A história da produção de carvão no Reino Unido e da produção de carvão mundial de 1650 a 1960, na mesma escala que a figura 1.5.

história 50 anos depois. O pico da produção de carvão na Grã-Bretanha foi em 1910, mas enquanto isso a produção de carvão no mundo continuou a dobrar a cada 20 anos. É difícil mostrar a história da produção de carvão em um único gráfico. Para mostrar o que aconteceu nos *próximos* 50 anos na mesma escala, o livro precisaria ter um metro de altura! Para auxiliar com esta dificuldade, podemos fazer uma escala menor dos eixos verticais: ou nós podemos espremer os eixos verticais de uma maneira não uniforme, de forma que tanto as pequenas quanto as grandes quantidades possam ser vistas ao mesmo tempo no gráfico. Um bom modo de espremer os eixos é chamado escala logarítmica, e isto é o que eu usei nos dois gráficos da figura 1.7 (p12). Em uma escala logarítmica, todos os aumentos na base de dez (de 1 a 10, de 10 a 100, de 100 a 1000) são representados por distâncias iguais na página. Em uma escala logarítmica, a quantidade que aumenta em uma porcentagem constante por ano (que é chamado de “crescimento exponencial”) parece uma linha reta. Os gráficos logarítmicos são ótimos para compreender crescimento. Enquanto os gráficos comuns nas páginas 7 e 8 passam as mensagens de que a produção de carvão no mundo e na Grã-Bretanha cresceram de forma notável, e que a população da Grã-Bretanha e do mundo cresceram notavelmente, as taxas de crescimento relativo não são evidentes nestes gráficos. Os gráficos logarítmicos nos permitem comparar taxas de crescimento. Observando as encostas das curvas populacionais, por exemplo, podemos ver que a taxa de crescimento populacional mundial nos últimos 50 anos foi um pouco maior do que a taxa de crescimento da Inglaterra e Gales em 1800.

De 1769 a 2006, a produção anual de carvão no mundo aumentou 800 vezes. A produção de carvão ainda está aumentando hoje. Outros combustíveis fósseis também estão sendo extraídos – o gráfico do meio da figura 1.7 mostra a produção de petróleo, por exemplo – mas em termos de emissões de CO₂ o carvão ainda é rei.

A queima de combustíveis fósseis é o principal motivo do aumento das concentrações de CO₂. Isto é um fato, mas, espere: eu ouço um zumbido persistente vindo de um bando de "inativistas" das mudanças climáticas. O que eles estão dizendo? Aqui está Dominic Lawson, um colunista do *Independent*:

“A queima de combustíveis fósseis emite cerca de **sete gigatoneladas** de CO₂ por ano para a atmosfera, o que

parece muito. Ainda assim, a biosfera e os oceanos emitem cerca de 1900 gigatonelatas e 36 000 gigatoneladas de CO₂ por ano para a atmosfera - . . . uma razão de porque alguns de nós somos céticos sobre a ênfase colocada no papel do homem com a queima de combustíveis fósseis no efeito aos gases de efeito estufa. Reduzir as emissões de CO₂ feitas pelo homem é megalomaniaco, exagerando a significância do homem. Os políticos não podem mudar o clima”.

Agora eu tenho muito tempo de ceticismo, e nem tudo o que os céticos dizem é uma lata de esterco – mas o jornalismo irresponsável como o de Dominic Lawson merece ser jogado na privada.

O problema com o argumento de Lawson é que todos os três números que ele forneceu (sete, 1900 e 3600) estão errados! Os números corretos são 24, 440 e 330. Deixando esses erros de lado, vamos nos referir ao ponto principal de Lawson, as relativamente pequenas emissões feitas pelo homem.

Sim, as liberações naturais de CO₂ são maiores do que as liberações adicionais que nós acrescentamos há 200 anos quando começamos a queimar combustíveis fósseis a sério. Mas é terrivelmente enganoso quantificar apenas a grande liberação natural *na* atmosfera, esquecendo-se de mencionar a quantidade exata que é *extraída da* atmosfera de volta para a biosfera e oceanos. O ponto é que estes fluxos *naturais* que entram e saem da atmosfera tem estado quase em balanço por um milênio. Então é irrelevante se todos esses fluxos naturais são maiores do que as emissões humanas. Os fluxos naturais *se cancelam*. Então os fluxos naturais, por maiores que sejam deixam a concentração de CO₂ na atmosfera e oceanos *constante*, pelo menos nos últimos mil anos. A queima de combustíveis fósseis, em contrapartida, cria um *novo* fluxo de carbono que, mesmo que pequeno, não é *cancelado*. Aqui está uma pequena analogia, definida no controle de passaportes na área de chegada de um aeroporto. Mil passageiros chegam por hora e há exatamente o número de oficiais trabalhando o suficiente para processar mil passageiros. Há uma pequena fila, mas graças à equivalência entre a taxa de chegada com a taxa de serviço, a fila não está aumentando. Agora imagine que, devido à neblina, uma carga extra de vôos seja desviada para cá de um aeroporto menor. Esta carga extra adiciona 50 passageiros por hora ao hall de entrada do aeroporto – uma pequena adição se comparada com a taxa original de chegadas

de mil por hora. Instantaneamente, pelo menos, as autoridades não aumentam o número de oficiais que devem processar a taxa de chegada de apenas mil passageiros por hora. Então o que acontece? Lentamente, mas definitivamente, *a fila aumenta*. A queima de combustíveis fósseis está indiscutivelmente aumentando a concentração de CO₂ na atmosfera e na superfície dos oceanos. Nenhum cientista climático repudia este fato. Quando se trata de CO₂, o homem é significativo.

OK. A queima de combustíveis fósseis aumenta as concentrações de CO₂ significativamente. Mas isto é importante? “Carbono é natureza!”, os produtores de petróleo nos lembram, “Carbono é vida!” Se o CO₂ não possuísse efeitos prejudiciais, então, de fato, as emissões de carbono não importariam. Contudo, o dióxido de carbono é um gás de efeito estufa. Não o gás de efeito estufa mais poderoso, mas ainda assim um gás significativo. Coloque mais dele na atmosfera e ele faz o que um gás de efeito estufa faz: ele absorve radiação infravermelha (calor) que está saindo da terra e o reemite em uma direção aleatória; o efeito desse redirecionamento aleatório do tráfego de calor atmosférico é impedir a saída de calor do planeta, da mesma forma que uma colcha. Então o dióxido de carbono possui um efeito de aquecimento. Este fato não é baseado em complexos registros históricos das temperaturas globais mas nas simples propriedades físicas das moléculas de CO₂. Os gases de efeito estufa são uma colcha de retalhos, e o CO₂ é um destes retalhos.

Então, se a humanidade conseguir dobrar ou triplicar as concentrações de CO₂ (que é para onde nós certamente estamos nos direcionando), o que acontece? Aqui existem muitas incertezas. A ciência climática é difícil. O clima é uma fera complexa e traiçoeira, e exatamente quanto de aquecimento dobrar o CO₂ produzirá é incerto. O consenso entre os melhores modelos climáticos parece ser que dobrar as concentrações de CO₂ teria o mesmo efeito que o de aumentar a intensidade do sol em 2%, e aumentaria a temperatura média global em 3°C. Isto seria o que historiadores chamariam de uma Coisa Ruim. Eu não vou citar toda a ladainha de prováveis efeitos drásticos, pois eu tenho certeza que você já os ouviu antes. A ladainha começa “a calota de gelo da Groenlândia gradualmente derreteria e, em um período de uns 100 anos, o nível do mar aumentaria cerca de 7 metros”. O peso das ladainhas cai nas futuras gerações. Tais temperaturas não foram vistas na Terra por pelo menos 100 000 anos, e é

concebível que o ecossistema estaria tão significativamente alterado que a Terra pararia de fornecer alguns bens e serviços que nós atualmente temos como garantidos.

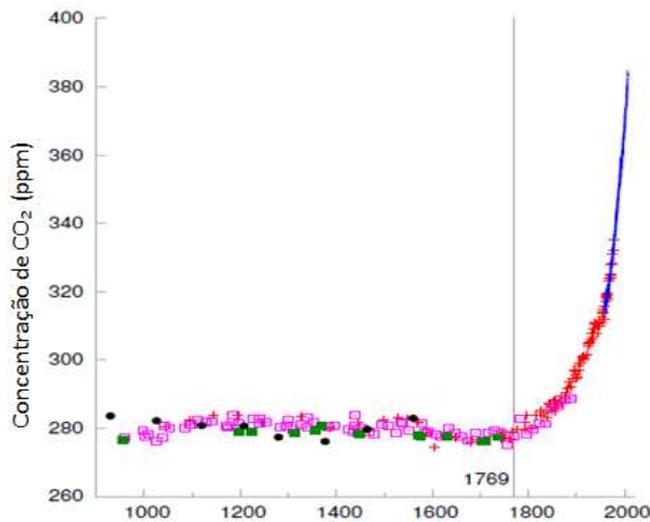
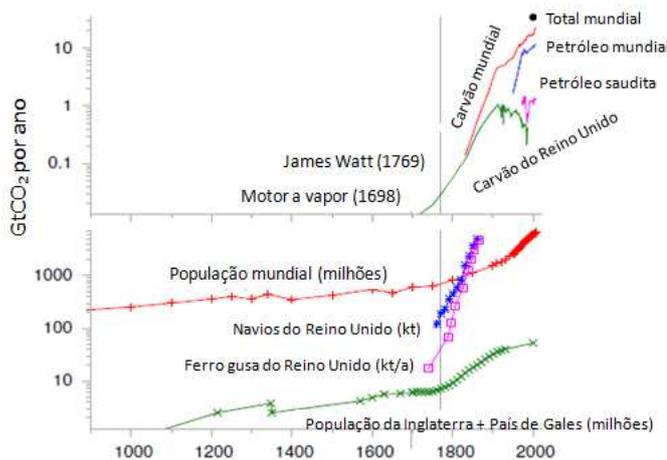


Figura 1.7. O gráfico de cima mostra as concentrações de dióxido de carbono (em partes por milhão) para os últimos 1100 anos – a mesma data mostrada na figura 1.4.

Aqui está um retrato de James Watt e sua máquina a vapor de 1769.



O gráfico de baixo mostra (em uma escala logarítmica) algumas consequências da Revolução Industrial: forte aumento na população da Inglaterra, e, ao longo do tempo, do mundo; e um aumento notável na produção de ferro-gusa britânica (em milhares de toneladas por ano); e aumento na tonelagem de navios britânicos (em milhares de toneladas).

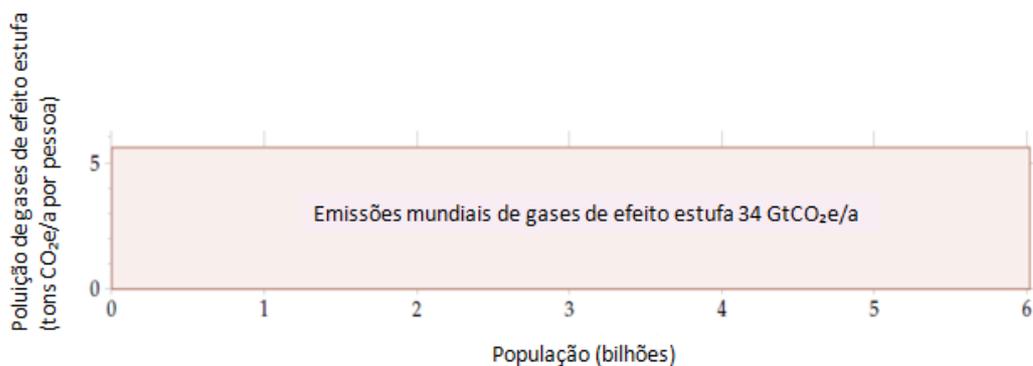
Em contraste com os gráficos normais nas páginas anteriores, a escala logarítmica nos permite mostrar tanto a população da Inglaterra e a população do mundo em um único diagrama, e para ver as características interessantes em ambos.

A modelagem climática é difícil e é cheia de incertezas. Mas a incerteza de como exatamente o clima reagirá ao extra de gases de efeito estufa não é justificativa para a inação. Se você estivesse dirigindo uma motocicleta rapidamente na neblina perto de um penhasco, e você não tivesse um mapa bom deste penhasco, a falta na qualidade do mapa justificaria *não* reduzir a velocidade da motocicleta?

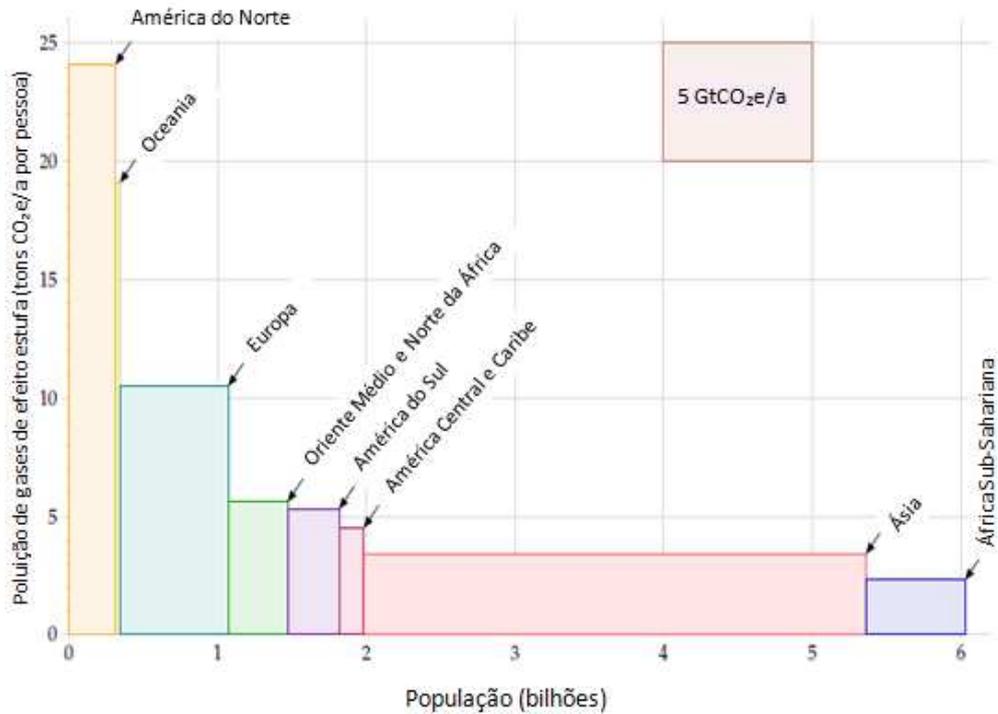
Então, quem deve reduzir a velocidade da motocicleta? Quem deve limpar as emissões de carbono? Quem é responsável pelas mudanças climáticas? Esta é uma questão de caráter ético, é claro, não científico, mas discussões éticas devem ser fundadas em fatos. Vamos agora explorar os fatos sobre as emissões de gases de efeito estufa. Primeiramente, uma palavra sobre as unidades nas quais eles são medidos. Gases de efeito estufa incluem dióxido de carbono, metano, e

óxido nitroso; cada gás possui diferentes propriedades físicas; convencionalmente se expressa todas as emissões de gases no “equivalente em quantidade de dióxido de carbono”, onde “equivalente” significa “ter o mesmo efeito de aquecimento em um período de 100 anos”. O equivalente a uma tonelada de dióxido de carbono pode ser abreviado como “1tCO₂e”, e um bilhão de toneladas (mil milhões de toneladas) como “1GtCO₂” (uma gigatonelada). Neste livro 1t significa uma tonelada métrica (1000kg). Eu não distinguirei toneladas imperiais, porque elas diferem por menos de 10% da tonelada métrica.

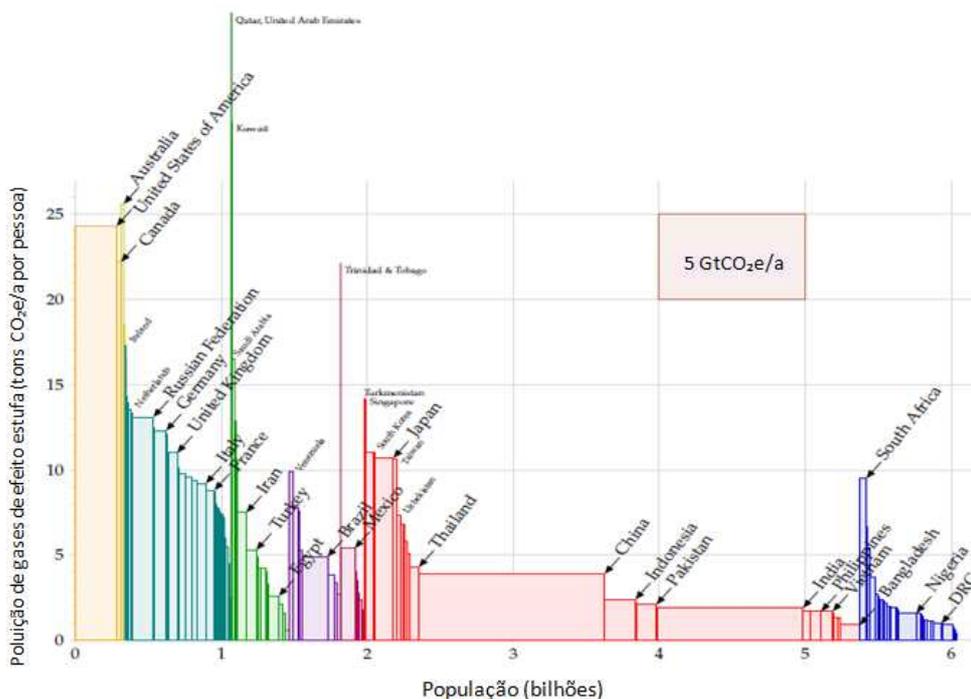
No ano 2000, as emissões de gases de efeito estufa no mundo foram cerca de 34 bilhões de toneladas equivalentes de CO₂ por ano. Um número incompreensível. Mas nós podemos torná-lo mais compreensível e mais pessoal dividindo-o pelo número de pessoas no planeta, 6 bilhões, de modo a obter a poluição de gases de efeito estufa *por pessoa*, o que é cerca de 5½ toneladas de CO₂ por ano por pessoa. Nós também podemos representar as emissões mundiais através de um retângulo cuja largura é a população (6 bilhões) e cuja altura são as emissões per capita.



Agora, todas as pessoas estão representadas de forma igual, mas nem todos nós emitimos 5½ toneladas de CO₂ por ano. Nós podemos quebrar as emissões do ano 2000, mostrando como o retângulo de 34 milhões de toneladas é dividido entre as regiões do mundo:



Esta imagem, que está na mesma escala que a última, divide o mundo em oito regiões. Cada área do retângulo representa os gases de efeito estufa de uma região. A largura do retângulo é a população da região, e a altura é a média per capita de emissões naquela região. No ano 2000, as emissões de gases de efeito estufa per capita da Europa foram duas vezes maior do que a média mundial. Nós podemos continuar subdividindo, separando cada uma das regiões em países. E é aqui que isto fica realmente interessante:

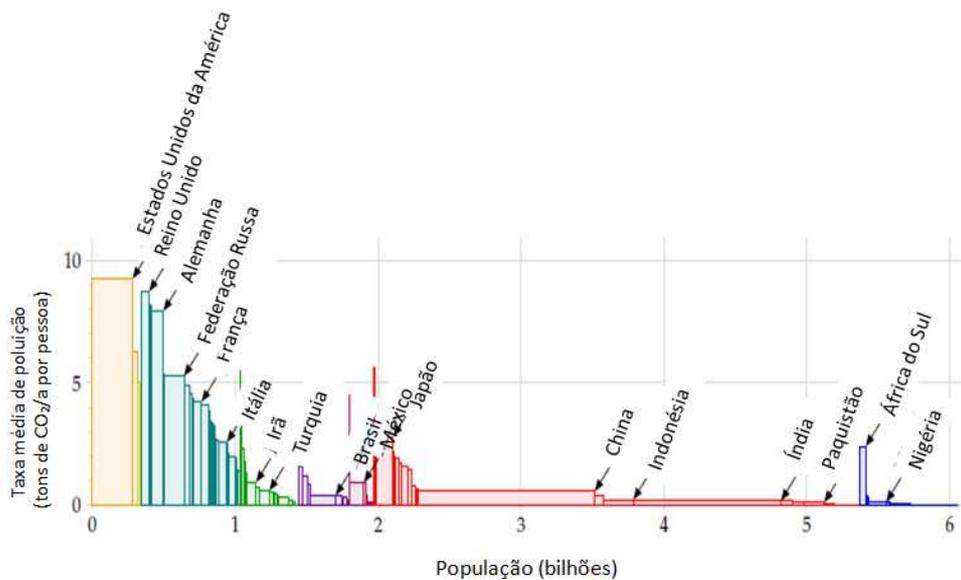


Os principais países com as maiores emissões per capita são Austrália, EUA, e Canadá. Os países Europeus, Japão, e África do Sul são notáveis competidores também. Entre os países Europeus, o Reino Unido está decididamente na média. E a China, aquele país desobediente e “fora de controle”? Sim, a área do retângulo da China é quase a mesma da dos Estados Unidos, mas o fato é que todas as suas emissões per capita estão *abaixo* da média mundial. As emissões per capita da Índia são menores do que a *metade* da média mundial. Além disso, é válido manter em mente que muitas dessas emissões industriais da China e da Índia estão associadas com a manufatura de *coisas para os países ricos*.

Então, assumindo que “algo deva ser feito” para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, quem tem a responsabilidade especial para fazer algo? Como eu disse, esta é uma questão ética. Mas eu acho difícil negar qualquer sistema ético que negue que a responsabilidade caia especialmente nos países do lado esquerdo deste diagrama – aqueles países cujas emissões são duas, três ou quatro vezes maiores do que a média mundial. Países que estão mais aptos a pagar. Países como Inglaterra e EUA, por exemplo.

Responsabilidade histórica pelo impacto climático

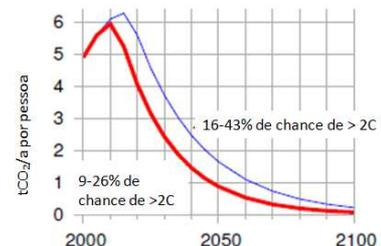
Se nós assumirmos que o clima foi danificado por atividades humanas, e que alguém precisa consertar isso, quem deveria pagar? Algumas pessoas dizem “os poluidores devem pagar”. As próximas imagens mostram quem está poluindo atualmente. Mas não é a *taxa* de CO₂ o que importa, é o *total* de emissões acumuladas; muito do dióxido de carbono emitido (cerca de um terço do total) permanecerá na atmosfera por pelo menos 50 ou 100 anos. Se nós aceitarmos a ideia ética de que “os poluidores devem pagar” então nós devemos nos perguntar quão grande é a pegada de carbono histórica de cada país. A próxima imagem mostra as emissões cumulativas de CO₂, expressas como uma taxa de emissão média ao longo do período entre 1880-2004.



Parabéns, Inglaterra! O Reino Unido chegou ao pódio dos vencedores. Nós podemos ser apenas um país na média na Europa hoje em dia, mas na tabela dos emissores históricos, per capita, nós perdemos apenas para os EUA.

Ok, chega de ética. O que os cientistas reconhecem que deve ser feito, para evitar o risco de dar à Terra um aumento de temperatura de 2°C (2°C sendo o aumento no qual eles preveem várias consequências ruins)? O consenso é claro. Nós precisamos acabar com o nosso hábito de combustíveis fósseis, e nós precisamos fazer isso rapidamente. Alguns países, incluindo a Inglaterra, se comprometeram a cortar 60% das suas emissões de gases de efeito estufa até 2050, mas devemos enfatizar que o corte de 60%, por mais radical que seja, é improvável que resolva o problema. Se as emissões mundiais forem gradualmente reduzidas em 60% até 2050, os cientistas climáticos reconhecem que é mais provável que as temperaturas globais aumentem mais do que 2°C. O tipo de cortes que nós precisamos nos focar são mostrados na figura 1.8. Esta imagem mostra dois possíveis cenários seguros apresentados por Baer e Mastrandrea (2006) em um boletim do Instituto de Pesquisa de Políticas Públicas. A curva inferior assume que o declínio nas emissões começaram em 2007, com as emissões totais mundiais caindo grosseiramente 5% por ano. As curvas superiores assumem um breve atraso no início do declínio, e uma queda de 4% por ano nas emissões globais. Ambos os cenários acreditam oferecer uma chance modesta de evitar o aumento de 2°C na temperatura da Terra acima do nível pré-industrial. No cenário inferior, a chance que o aumento de temperatura excederá 2°C é estimada para ser entre 9-26%. No cenário superior a chance de exceder 2°C é estimada a ser entre 16-43%. Essas trajetórias

Figura 1.8. As emissões globais consideradas para dois cenários por Baer e Mastrandrea, expresso em toneladas de CO₂ por ano por pessoa, usando uma



possivelmente seguras de emissões, por sinal, envolvem reduções nas emissões significativamente mais fortes do que qualquer um dos cenários apresentados pelo Painel de Mudança Climática Intragovernamental (IPCC), ou pelo Relatório Stern⁴ (2007).

Essas trajetórias possivelmente seguras requerem que as emissões globais caiam entre 70% a 85% até o início de 2050. O que isto significaria para um país como a Inglaterra? Se nos apoiarmos a ideia de “contração e convergência”, o que significa que todos os países focam em, eventualmente, ter as mesmas emissões per capita, então a Inglaterra precisa mirar em cortes que sejam maiores do que 85%: deveria diminuir das suas atuais 11 toneladas de CO₂ por ano por pessoa para apenas **1 tonelada por ano por pessoa** até 2050. Este é um corte tão profundo que eu sugiro *chega de combustíveis fósseis*.

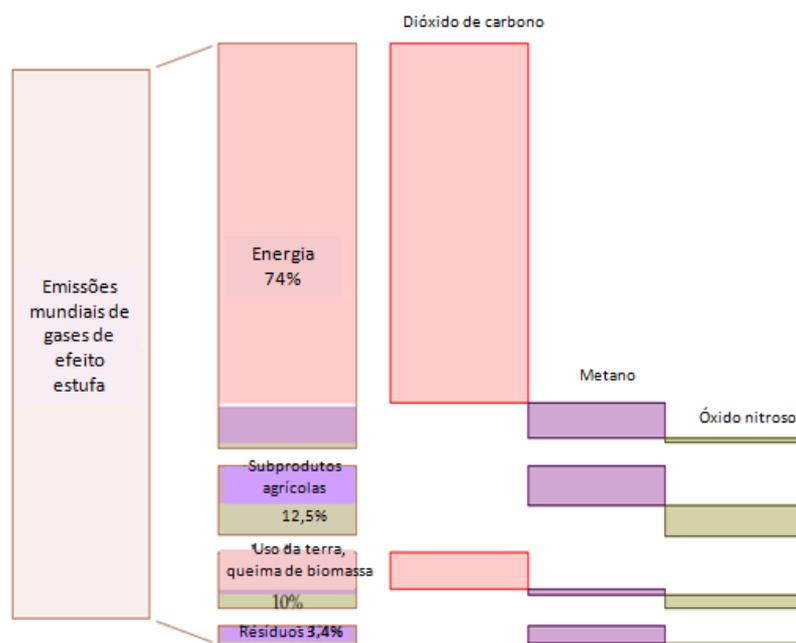


Figura 1.9. Colapso mundial das emissões de gases de efeito estufa (2000) por tipo de emissor e por tipo de gás. “Energia” inclui estações de potência, processos industriais, transporte, processamento de combustíveis fósseis e consumo energético em edificações. “Uso da terra, queima de biomassa” significa mudanças no uso da terra, desmatamento, e a queima de biomassa não renovada como a turfa. “Resíduos” inclui a eliminação de resíduos e tratamento. Os tamanhos indicam o potencial de aquecimento global em 100 anos para cada fonte. Fonte: Banco de dados de Emissão para Pesquisa Atmosférica Global.

Um último comentário sobre a motivação de mudanças climáticas: enquanto uma gama de atividades humanas causa a emissão de gases de efeito estufa, a maior causa, de longe, é **a produção de energia**. Algumas pessoas justificam não fazer nada com relação ao seu consumo energético com desculpas como “o metano do arrotado das vacas causa maior aquecimento do que uma viagem de jato”. Sim, subprodutos agrícolas contribuíram em um oitavo nas emissões de gases de efeito estufa no ano 2000. Mas as

⁴ No original, **Stern Review on the Economics of Climate Change**, é um documento lançado para o governo Britânico em 2006 pelo economista Nicholas Stern.

emissões relacionadas com o uso de energia contribuíram com três quartos (figura 1.9). O problema de mudanças climáticas é principalmente um problema energético.

Avisos ao leitor

Ok, chega de mudanças climáticas. Eu assumirei que nós estamos motivados a parar de consumir combustíveis fósseis. Qualquer que seja a sua motivação, o objetivo deste livro é ajuda-lo a descobrir os números e fazer a aritmética de modo que você possa avaliar as políticas; e para estabelecer os fundamentos factuais, de modo que você consiga ver *que propostas você pode fazer*. Eu não estou dizendo que a aritmética e números neste livro são novos; os livros que eu mencionei de Goodstein, Lomborg e Lovelock, por exemplo, estão cheios de números interessantes e cálculos, e há muitas outras fontes úteis na internet também (veja as notas no final de cada capítulo).

O meu objetivo com este livro é fazer com que estes números sejam simples e lembráveis; mostrar como você pode descobrir os números você mesmo; e deixar a situação clara de forma que qualquer leitor pensante esteja apto a tirar conclusões surpreendentes. Eu não quero alimentá-lo com as minhas próprias conclusões. Convicções são mais fortes se elas forem desenvolvidas pessoalmente, ao invés de ensinadas. O entendimento é um processo criativo. Quando você tiver lido este livro, eu espero que você tenha reforçado a confiança de que você pode descobrir tudo.

Eu gostaria de enfatizar que os cálculos que nós faremos são deliberadamente imprecisos. Simplificação é a chave do entendimento. Primeiro, ao arredondar os números, nós podemos torna-los mais fáceis de serem lembrados. Segundo, números arredondados permitem cálculos mais rápidos. Por exemplo, neste livro, a população do Reino Unido é 60 milhões, e a população do mundo é 6 bilhões. Eu sou perfeitamente capaz de procurar por dados mais precisos, mas a precisão ficaria no caminho do pensamento fluido. Por exemplo, se nós aprendermos que as emissões de gases de efeito estufa mundiais em 2000 foram 34 bilhões de toneladas equivalentes de CO₂ por ano, então nós podemos instantaneamente notar, sem uma calculadora, que a média de emissões por pessoa é 5 ou 6 toneladas equivalentes de CO₂ por ano. Este resultado áspero não é exato, mas é preciso o suficiente para suportar conversações interessantes. Por exemplo, se você descobre que uma viagem de ida e volta



Figura 1.10. Reproduzida com a permissão generosa do PRIVATE EYE / Peter Dredge www.private-eye.co.uk

intercontinental emite aproximadamente duas toneladas de CO₂ por passageiro, então saber as emissões médias (5 e uns quebrados de toneladas por ano por pessoa) ajuda você a perceber que apenas uma viagem destas de avião corresponde a mais de um terço da média de emissão de carbono de uma pessoa.

Eu gosto de basear os meus cálculos no senso comum ao invés de vasculhar estatísticas nacionais impessoais. Por exemplo, se eu quiser estimar a velocidade típica do vento em Cambridge, eu pergunto “a velocidade com que eu ando de bicicleta é geralmente mais rápida do que o vento?” A resposta é sim. Então eu posso deduzir que a velocidade do vento em Cambridge é raramente mais rápida do que a minha velocidade típica ao andar de bicicleta, que é 20 km/h. Eu reforço essas estimativas diárias com os cálculos de outras pessoas e com estatísticas oficiais (por favor procure por estas informações no final de cada capítulo). Este livro não tem a intenção de ser um armazenamento definitivo de números muito precisos. Ao invés disto, tem a intenção de ilustrar como usar números próximos dos reais como uma parte construtiva de discussões consensuais.

Nos cálculos, eu utilizarei principalmente o Reino Unido e, ocasionalmente, a Europa, América, ou o mundo todo, mas você deva achar fácil refazer os cálculos para qualquer país ou região que tenha interesse.

Deixe-me terminar este capítulo com mais alguns avisos ao leitor. Nós não apenas teremos o hábito de fazer aproximações com os números que calcularmos; nós também negligenciaremos todos os tipos de detalhes de investidores, administradores e economistas devem usar, pobres coitados. Se você está tentando lançar uma tecnologia renovável, apenas um aumento de 5% nos custos pode fazer toda a diferença entre sucesso e fracasso, de modo que nos negócios todos os detalhes devem ser considerados. Mas 5% é muito pequeno para o radar deste livro. Este é um livro sobre fatores de 2 e fatores de 10. É sobre os limites físicos da energia sustentável, não atual viabilidade econômica. Enquanto a economia está sempre mudando, os limites fundamentais nunca desaparecerão. Nós precisamos entender estes limites.

Debates sobre políticas energéticas são frequentemente confusas e emocionais porque as pessoas misturam afirmações *factuais* e afirmações *éticas*.

Exemplos de afirmações factuais são “a queima global de combustíveis fósseis emite 34 bilhões de toneladas equivalentes de CO₂ por ano”; e “se as concentrações de CO₂

forem duplicadas então as temperaturas médias crescerão entre 1.5-5.8°C nos próximos 100 anos”; e “um aumento de 2°C na temperatura faria com que o manto de gelo da Groelândia derretesse em 500”; e “o derretimento completo do manto de gelo da Groelândia causaria um aumento de 7 metros no nível do mar”.

Uma afirmação factual ou é verdadeira ou é falsa; descobrir *qual* pode ser difícil; esta é uma questão científica. Por exemplo, as afirmações que eu acabei de fazer ou são verdadeiras ou falsas. Mas nós não sabemos se elas são todas verdadeiras. Algumas delas estão sendo julgadas como “muito prováveis”. A dificuldade em decidir quais afirmações factuais são verdades levam a debates na comunidade científica. Mas dado experimentação e discussão científica o suficiente, a verdade ou falsidade da maioria das afirmações factuais pode eventualmente ser descoberta, pelo menos “além de dúvida razoável”.

Exemplos de afirmações éticas são “é errado explorar os recursos globais de modo que imponha custos significativos para as futuras gerações”; e “poluir não deveria ser permitido”; e “nós deveríamos tomar atitudes para garantir que as concentrações de CO₂ dupliquem”; e “políticos deveriam concordar em cortar as emissões de CO₂”; e “países com as maiores emissões de CO₂ no último século têm o dever de liderar a ação contra as mudanças climáticas”; e “é justo dividir os direitos de emissões de CO₂ igualmente pela população ao redor do mundo”. Tais afirmações não são nem verdadeiras nem falsas. Se nós concordamos com elas depende dos nossos julgamentos éticos, dos nossos valores. Afirmações éticas podem ser incompatíveis umas com as outras; por exemplo, o governante Tony Blair declarou uma política radical com as emissões de CO₂: “o Reino Unido deve reduzir suas emissões de CO₂ em 60% até 2050”; ao mesmo tempo Gordon Brown, na época chanceler naquele governo, repetidamente instigava países produtores de petróleo a *aumentarem* a produção de petróleo.

Este livro é enfaticamente intencionado a ser sobre os fatos, não ética. Eu quero que os fatos estejam claros, de modo que as pessoas tenham um debate significativo sobre as decisões éticas. Eu quero que todos entendam como os fatos constroem as opções que estão abertas para nós. Como um bom cientista, eu tentarei manter a minha opinião sobre questões éticas fora do caminho, ainda que, ocasionalmente, eu acabe vomitando alguma dessas opiniões – por favor me desculpe por isso.

Se é *justo* que a Europa e a América do Norte assumam o problema energético é uma questão ética; eu estou aqui para lembrá-lo do *fato* de que nós não podemos ignorar isto também; para ajudá-lo a extirpar propostas energéticas ineficazes e sem sentido; e para ajuda-lo a identificar políticas energéticas que sejam compatíveis com os seus valores pessoais.

Nós precisamos de um plano que faça a diferença!



"Okay - está decidido; nós anunciamos - 'fazer nada não é uma opção!' então nós esperamos para ver como as coisas vão se desenrolar..."

Observações e leitura complementar

No final de cada capítulo eu anoto detalhes das ideias daquele capítulo, fontes de dados e citações, e indicações para mais informações.

Figura 1.11. Reproduzida com a generosa permissão do PRIVATE EYE / Paul Lowe www.private-eye.co.uk.

N pg.

- 2 "...não haverá outro modo possível de fazer isso a não ser através do uso de renováveis"; "qualquer um que esteja dependendo das energias renováveis para preencher o déficit energético está vivendo em um mundo de sonhos e é, no meu ponto de vista, um inimigo das pessoas." Estas citações são do *Any Questions?*, 27 de janeiro de 2006, BBC Radio 4 [ydoobr]. Michael Meacher foi um ministro do meio ambiente do Reino Unido de 1997 à 2003. Sir Bernanrd Ingham era um assessor de Margaret Thatcher quando ela era primeira ministra, e era Chefe do Serviço de Informação Governamental. Ele é secretário do Apoiadores da Energia Nuclear (*Supporters of Nuclear Energy*).
- Jonathan Porritt (Março de 2006) *A nuclear é a resposta?* Seção 3. Conselho de Ministros. www.sd-comission.org.uk.
- 3 "A energia nuclear é um poço de dinheiro", "Nós temos uma grande quantidade de ondas e ventos". Ann Leslie, jornalista. Falando em *Any Questions?*, Rádio 4, 10 de Fevereiro de 2006.
- Os residentes de Los Angeles dirigem ... da Terra a Marte – (The Earthworks Group, 1989, página 34)
- targetneutral.com taxas de apenas £4 por tonelada de CO₂ para a sua "neutralização" (Um preço significativamente menor do que qualquer outra "compensação" de companhias que eu tenho visto). A este preço, um britânico típico poderia ter suas 11 toneladas por ano "neutralizadas" por apenas £44 por ano! A evidência é que os esquemas de "neutralização" da BP não somam realmente o fato de que os seus projetos não atingiram o Padrão Dourado www.cdmgoldstandard.or (Michael Schulp, comunicação pessoal). Muitos projetos de "compensação" de carbono foram expostos como inúteis por Fiona Harvey do *Financial Times* [2jhve6].
- 4 Pessoas que querem promover renováveis no lugar de energia nuclear, por exemplo, dizem "a energia eólica pode alimentar todas as residências no Reino Unido." No final de 2007, o governo do Reino Unido anunciou que permitiria que as edificações possuíssem turbinas eólicas, "que podem alimentar todas as residências do Reino Unido". O ativista da *Friends of the Earth*, Nick Rau, disse que o grupo parabenizou o anúncio do governo. "O potencial de energia que poderia ser produzida por essa indústria é enorme", ele disse [25e59w]. Do *Guardian* [5º7mxk]: John Sauven, o diretor executivo do Greenpeace, disse que os planos se acumularam em uma "revolução da energia eólica" "E Labour precisa perder sua obsessão com a energia nuclear, que poderia reduzir as emissões em apenas 4% em algum tempo num futuro

distante”. Nick Rau disse: “Nós estamos muito felizes que o governo está levando a sério o potencial da energia eólica, que poderia gerar 25% da eletricidade do Reino Unido em 2020.” Algumas semanas depois, o governo anunciou que permitiria a construção de novas usinas nucleares. “A decisão de hoje de dar sinal verde para uma nova geração de usinas nucleares ... fará pouco para enfrentar as mudanças climáticas”, aviso do *Friends of the Earth* [5c4o1c].

De fato, as duas expansões propostas – de energia eólica e nuclear – forneceriam a mesma quantidade de eletricidade por ano. O total permitido de potência eólica de 33 GW entregaria na média 10 GW, o que é 4 kWh por dia por pessoa; e a substituição de todas as usinas nucleares aposentadas forneceria 10 GW, que é 4 kWh por dia por pessoa. Ainda assim, os ativistas anti-nuclear dizem que a opção nuclear “faria pouco”, enquanto a energia eólica iria “alimentar todas as residências do Reino Unido”. O fato é que “alimentar todas as residências do Reino Unido” e “reduzir as emissões em apenas 4%” são a mesma coisa.

- 5 “carro movido à água” *New Scientist*, 29 de Julho de 2006, p.35. Este artigo intitulado “Carros movidos à água podem estar disponíveis por volta de 2009” (*Water powered cars might be available by 2009*), iniciou com:

“Esqueça de carros abastecidos com álcool e óleo vegetal. Antes do que se imagina, você estará apto a dirigir o seu carro com nada mais do que água no seu tanque de combustível. Este seria o veículo ultimate-zero-emissões.”

“Enquanto a água não é, a primeira vista, uma fonte de potência óbvia, ela possui uma virtude chave: é uma fonte abundante de hidrogênio, o elemento amplamente apregoado como o combustível verde do futuro.”

O trabalho que a *New Scientist* estava descrevendo não é ridículo – ele era na verdade sobre um carro utilizando boro como combustível, com uma reação boro/água como um dos primeiros passos químicos. Por que a *New Scientist* sentiu a necessidade de transformar isto em uma história sugerindo que a água era o combustível? Água não é um combustível. Nunca foi, e nunca será. Ela já está queimada! A primeira lei da termodinâmica diz que você não pode tirar energia de nada; você pode apenas converter energia de uma forma para outra. A energia em qualquer motor deve vir de algum lugar. A *Fox News* vendeu uma história ainda mais absurda [2fztd3].

- **Mudanças climáticas são uma ameaça muito maior ao mundo do que terrorismo internacional.** Sir David King, Chefe Conselheiro Científico do governo do Reino Unido, Janeiro de 2004. [26e8z]
- **a glorificação de viajar** – uma alusão à ofensa da “glorificação” definida no Ato de Terrorismo do Reino Unido que entrou em vigor em 13 de abril, 2006. [ykhayj]

- 6 **Figura 1.2.** Esta imagem mostra a produção de petróleo cru incluindo condensado, gás natural, líquido de plantas e outros líquidos e os ganhos no processo de refinaria. Fontes: EIA, e revisão estatística da energia mundial da BP.

- 7 “A primeira máquina a vapor utilizável foi inventada em 1698”. De fato, Hero da Alexandria descreveu uma máquina a vapor, mas dado que a máquina a vapor de Hero não foi concretizada nos próximos 1600 anos, eu considero a invenção de Savery em 1698 como a primeira máquina a vapor utilizável.

- **Figuras 1.4 e 1.7: Gráficos da concentração de dióxido de carbono.** Os dados são coletados do Keeling e Whorf (2005) (medidas entre 1958-2004); Neftel et al. (1994) (1734-1983); Etheridge et al. (1998) (1000-1978); Siegenthaler et al. (2005) (950-1888 dC); e Indermuhle et al. (1999) (de 11 000 a 450 anos do presente). Este gráfico, por sinal, não deve ser confundido com “hockey stick graph”, que mostram a história das *temperaturas* globais. Leitores atentos terão percebido que o argumento da mudança climática que eu apresentei não faz menção ao *histórico* de temperaturas.

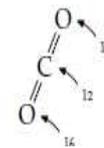
Figuras 1.5-1.7: Produção de Carvão. Números são de Jevons (1866), Malanima (2006), *Netherlands Environmental Assessment Agency* (2006), *National Bureau of Economics Research* (2001), Hatcher (1993), Flinn e Stoker (1984), Church et al. (1986), Supple (1987), Ashworth e Pegg (1986). Jevons foi o primeiro autor a falar sobre “Pico de Óleo”. Em 1865, ele estimou as facilmente acessíveis reservas de carvão da Grã-Bretanha, deu uma olhada no histórico exponencial de crescimento de consumo, e previu o fim do crescimento exponencial e o fim do domínio industrial mundial da Grã-Bretanha. “Nós não podemos manter por muito tempo a nossa taxa de crescimento de consumo. ...a conta pelo nosso progresso será perceptível em cerca de um século do tempo presente. ...a conclusão é inevitável, que as nossas felizes condições de progresso são de duração limitada.” Jevons estava certo. Ao longo de um século a produção de carvão realmente cresceu, e houveram duas guerras mundiais.

9 **Dominic Lawson, colunista do *the Independent*.** A minha citação é adaptada da coluna de Dominic Lawson no *the Independent*, 8 de Junho, 2007.

Ela não é uma citação direta: eu editei suas palavras para torna-las mais breves, mas tomei cuidado para não corrigir nenhum de seus erros. *Todos os três números que ele mencionou estão incorretos.* Aqui está o que ele errou. Primeiro, ele fala em dióxido de carbono mas fornece números do carbono: a queima de combustíveis fósseis enviam 26 giga toneladas de CO₂ por ano na atmosfera (não 7 giga toneladas). Um erro comum. Segundo, ele afirma que os oceanos enviam 36 000 giga toneladas de carbono por ano para a atmosfera. Este é um erro muito pior: 36 000 giga toneladas é a quantidade total de carbono nos oceanos! O fluxo anual é muito menor – cerca de 90 giga toneladas de carbono por ano (330 GtCO₂/a), segundo os diagramas padrões do ciclo do carbono [16y5g] (eu acredito que estas 90 GtC/a é uma taxa de fluxo estimada, onde a atmosfera subitamente tem suas concentrações de CO₂ reduzidas a zero). Similarmente seu fluxo de “1900 giga toneladas” da biosfera para a atmosfera está errado. O valor correto, segundo o diagrama padrão é de cerca de 120 giga toneladas de carbono por ano (440 GtCO₂/a).

Incidentalmente, o aumento observado nas concentrações de CO₂ está alinhado com o que você esperaria, assumindo que a maioria das emissões humanas de carbono permanecesse na atmosfera. De 1715 a 2004, numa aproximação grosseira, 1160 GtCO₂ foram liberadas na atmosfera através do consumo de combustíveis fósseis e produção de cimento (Marland et al.2007). Se *todo* este CO₂ tivesse ficado na atmosfera, as concentrações teriam aumentado cerca de 160 ppm (de 280 a 440 ppm). O aumento atual tem sido cerca de 100 ppm (de 275 a 377 ppm). Então grosseiramente 60% do que foi emitido está atualmente na atmosfera.

11 **O dióxido de carbono possui um efeito de aquecimento.** O super emotivo debate sobre este tópico está ficando bastante cansativo, não? “A ciência agora concluiu isso!” “Não, não concluiu!” “Sim, concluiu sim!” Eu acho que a coisa mais útil que eu posso fazer aqui é direcionar qualquer um que queira uma folga desta gritaria para um breve relatório escrito por Charney et al. (1979). As conclusões desse relatório carregam um certo peso porque a Academia Nacional de Ciências (o equivalente à *Royal Society* dos EUA) encomendou o relatório e selecionou os seus autores com base nas suas áreas de atuação, “e com consideração para um balanço apropriado”. O grupo de estudo foi convocado “sobre os auspícios do Comitê de Pesquisa Climática do Conselho Nacional de Pesquisa para avaliar as bases científicas para projeções de futuras mudanças climáticas resultantes de lançamentos humanos de dióxido de



O peso de um átomo de carbono e uma molécula de CO₂ tem uma razão de 12 para 44, porque o átomo de carbono pesa 12 unidades e cada átomo de oxigênio pesa 16. 12+16+16 = 44.

carbono na atmosfera”. Especialmente, eles foram solicitados a “identificar as premissas principais nas quais o nosso entendimento atual da questão é baseado, para avaliar quantitativamente a adequação e incerteza do nosso conhecimento sobre estes fatores e processos, e para sumarizar em termos concisos e objetivos o nosso melhor entendimento do dióxido de carbono / questões climáticas para o benefício dos que trabalham com essas políticas”.

O relatório contém apenas 33 páginas, é livre para download [5qfkaw], e eu o recomendo. Ele deixa claro quais pedaços científicos já estavam claros em 1979, e quais ainda são incertos.

Aqui estão os pontos principais que eu peguei deste relatório. Primeiro, dobrar as concentrações de CO₂ da atmosfera alteraria a rede de aquecimento da troposfera, oceanos e terra por uma média de potência por unidade de área grosseiramente de 4 W/m², se todas as outras propriedades da atmosfera permanecessem imutáveis. Este efeito de aquecimento pode ser comparado com a média de potência absorvida pela atmosfera, terra, e oceanos, que é 238 W/m². Então duplicar as concentrações de CO₂ teria um efeito de aquecimento equivalente a aumentar a intensidade do sol em $4/238 = 1,7\%$. Segundo, as consequências deste aquecimento induzido por este CO₂ são difíceis de prever, por causa da complexidade do sistema atmosfera/oceano, mas os autores previram um aquecimento da superfície global entre 2°C e 3,5°C, com maiores aquecimentos em latitudes maiores. Finalmente, os autores sumarizam: “nós tentamos mas fomos incapazes de encontrar qualquer efeito física negligenciado ou subestimado que poderia reduzir as atuais estimativas de aquecimento global devido à duplicação do CO₂ na atmosfera para proporções insignificantes ou revertê-las completamente.” Eles avisam que, graças ao oceano, “o grande e pesado volante do sistema climático global,” é bastante possível que o aquecimento ocorreria de forma suficientemente sugestiva de modo que seria difícil detectá-lo nas próximas décadas. Ainda assim, “o aquecimento ocorrerá eventualmente, e as mudanças climáticas regionais associadas a eles ... podem ser bem significativas”.

O prefácio pelo presidente do Comitê de Pesquisa Climática, Verner E. Suomi, resume as conclusões com uma cascata famosa de duplas negativas. “Se o dióxido de carbono continuar a aumentar, o grupo de estudo não encontra razão para duvidar que as mudanças climáticas resultarão disto e não há nenhuma razão para acreditar que estas mudanças serão desprezíveis”.

- 11 **A ladainha dos prováveis efeitos drásticos da mudança climática – eu tenho certeza que você já ouviu antes.** Veja [2z2xg7].
- 17 **Colapso mundial das emissões de gases de efeito estufa por região e por país.** Fonte de informações: *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Versão 4.0* (Washington, DC: *World Resources Institute*, 200). As primeiras três figuras mostram os totais nacionais de todos os seis gases de maior efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆), excluindo as contribuições para uso da terra e silvicultura. A figura na pX mostram apenas emissões acumulativas de CO₂.
- 16 **Parabéns, Inglaterra! ... na tabela das emissões históricas, per capita, nós perdemos apenas para os EUA.** Desculpas sinceras aqui para Luxemburgo, cujas emissões per capita histórica na verdade excedem aquelas da América do Norte e da Inglaterra; mas eu achei que o pódio dos vencedores deveria estar realmente reservado para aqueles países que possuem tanto grandes emissões per capita quanto grandes emissões totais. Em termos totais os maiores emissores são, em ordem, EUA (322 GtCO₂), Federação da Rússia (90 GtCO₂), China (89 GtCO₂), Alemanha (78 GtCO₂), Reino Unido (62 GtCO₂), Japão (43 GtCO₂), França (30GtCO₂), Índia (25 GtCO₂), e Canada (24 GtCO₂). A ordem per capita é Luxemburgo, EUA, Reino Unido, República Checa, Bélgica, Alemanha, Estónia, Catar, e Canada.
- **Alguns países, incluindo a Inglaterra, se comprometeram a reduzir pelo menos 60% suas emissões de gases de efeito estufa até 2050.** De fato, como eu escrevi, o comprometimento da Grã-Bretanha está sendo aumentado para uma redução relativa a 80% dos níveis de 1990.

- 16 **Figura 1.8.** No cenário de baixo, a chance de que o aumento de temperatura excederá 2°C é estimada para ser entre 9-26%; as emissões acumulativas de carbono de 2007 para frente são 309 GtC; as concentrações de CO₂ atingem um pico de 410 ppm, CO₂ e concentrações de pico a 421 ppm, e em 2100 as concentrações as concentrações de CO₂ caem para os 355 ppm. No cenário de cima, a chance de exceder um aumento de temperatura de 2°C é estimado para ser entre 16-43%; as emissões cumulativas de carbono de 2007 em diante são 415 GtC; as concentrações de CO₂ atingem um pic de de 425 ppm, e pico de concentração de CO₂ em 435 ppm, e em 2100 as concentrações de CO₂cairão para 380 ppm. Veja também em hdr.undp.org/em/reports/global/hdr2007-2008/.
- 18 **Há muitas outras fontes úteis na internet.** Eu recomendo, por exemplo: *BP's Statistical Review of World Energy* [yyxq2m], o *Sustainable Development Comission* www.sd-comission.org.uk, o *Danish Wind Industry Association* www.windpower.org, *Environmentalists for Nuclear Energy* www.ecolo.org, *Wind Energy Departament, Riso University* www.risoe.dk/vea, DEFRA www.defra.gov.uk/environment/statistics, especialmente o livro *Avoiding Dangerous Climate Change* [dzcq], o *Pembina Institute* www.pembina.org/publications.asp, e o DTI (agora conhecido como BERR) www.dti.gov.uk/publications/.
- 19 **Afirmações factuais e afirmações éticas.** Afirmações éticas também são conhecidas como “reivindicações normais” ou “juízo de valor”, e afirmações factuais são conhecidas como “reivindicações positivas”. Afirmações éticas contém verbos como “deveria” e “precisa”, ou adjetivos como “justo”, “certo”, e “errado”. Para mais leitura sobre isso, veja Dessler e Parson (2006).
- 20 **Gordon Brown.** Em 10 de setembro de 2005, Gordon Brown afirmou que o alto preço do combustível posou um risco significativo para a economia europeia e para o crescimento global, e instou que a OPEC aumentasse a produção de petróleo. Novamente, seis meses depois, ele disse “nós precisamos ... mais produção, mais perfurações, mais investimentos, mais investimento petroquímico.” (22 de abril, 2006) [y98ys5]. Deixe-me temperar este criticismo de Gordon Brown louvando uma de suas mais recentes iniciativas, ou seja, a promoção de veículos elétricos e plug-ins híbridos. Como você verá mais tarde, uma das conclusões de seu livro é que a eletrificação da maioria dos transportes é uma boa parte de um plano para acabar com combustíveis fósseis.

2 O balanço

A Natureza não pode ser enganada.

Richard Feynman

Vamos falar sobre o consumo e a produção de energia. No momento, a maior parte da energia que o mundo desenvolvido consome é produzida através de combustíveis fósseis; isto não é sustentável. Exatamente por quanto tempo nós conseguiríamos continuar vivendo através de combustíveis fósseis é uma questão interessante, mas não é a questão que nós queremos responder neste livro. Eu quero pensar em sobreviver *sem os combustíveis fósseis*.

Nós faremos duas pilhas. Na pilha da esquerda, a vermelha, nós adicionaremos o consumo de energia, e na pilha da direita, a verde, nós adicionaremos a produção de energia sustentável. Nós montaremos as duas pilhas gradualmente, adicionando itens em cada uma no que fomos discutindo eles.

Na pilha da esquerda, a vermelha, nós estimaremos o consumo de uma típica “pessoa próspera”; eu aconselho você a fazer uma estimativa do seu próprio consumo, criando a sua própria e personalizada pilha da esquerda. Mais tarde nós também descobriremos o consumo *médio* atual dos europeus e norte-americanos.



CONSUMO PRODUÇÃO

Algumas formas de consumo chave para a pilha da esquerda serão :

- Transporte
-carros, aviões, frete
- Aquecimento e refrigeração;
- Iluminação
- Sistemas de informação e outros acessórios
- Alimentação
- Manufatura

Na pilha de produção sustentável da direita, nossas principais categorias serão:

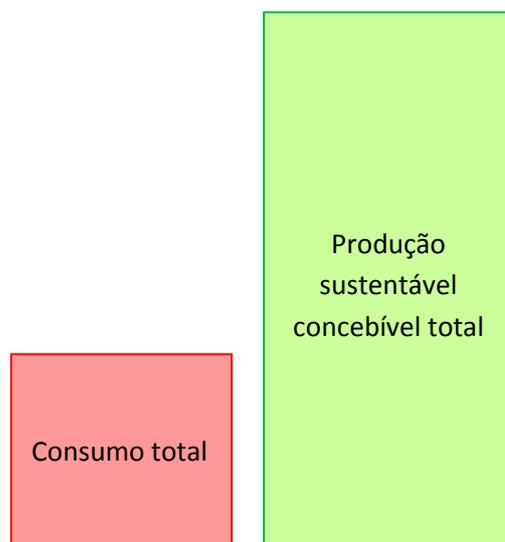
- Eólica
- Solar
-fotovoltaica, térmica, biomassa
- Hidroelétrica
- Ondas
- Marés
- Geotérmica
- Nuclear ? (com um ponto de interrogação, pois não está claro se a nuclear conta como uma fonte de energia sustentável ou não.)

No que nós estimarmos o nosso consumo de energia para o aquecimento, transporte, manufatura, e as demais, o

objetivo não é apenas computar um número para a pilha da esquerda do nosso balanço, mas também compreender do que cada número depende, e quão susceptíveis a modificações o número final pode ser.

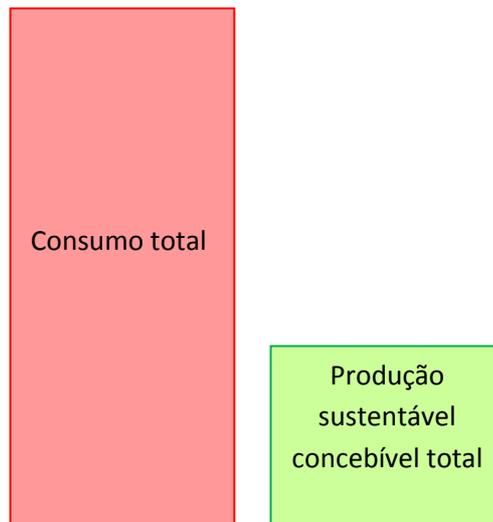
Se as fontes de energias sustentáveis que nós colocamos na pilha da direita são *economicamente* viáveis é uma questão importante, mas deixemos essa questão de lado, e trabalhar apenas com as duas pilhas, por enquanto. Algumas vezes as pessoas se focam muito na viabilidade econômica e perdem a imagem maior, como um todo. Por exemplo, as pessoas discutem “eólica é mais barata do que nuclear?” e esquecem de perguntar “quanto vento temos disponível” ou “quando de urânio ainda resta?”

O resultado quando nós somarmos tudo pode parecer assim:



Se nós descobrirmos que o consumo é muito menor do que a produção sustentável concebível de energia, então nós podemos dizer “bom, *talvez* nós possamos viver de maneira sustentável; vamos olhar para os custos econômicos, sociais, e ambientais das alternativas sustentáveis, e descobrir qual delas merece maior pesquisa e desenvolvimento; se nós fizermos um bom trabalho, *talvez* não haja uma crise energética.”

Por outro lado, o resultado da nossa soma pode parecer com isto:



Uma imagem muito pior. Esta imagem diz “não importa o custo da potência energética sustentável: simplesmente não há potência energética sustentável *o suficiente* para suportar nosso estilo de vida atual; mudanças massivas devem ser feitas”.

Energia e Potência

A maioria das discussões sobre consumo e produção de energia é confusa por causa da proliferação de *unidades* nas quais cada energia e potência são medidas, de “toneladas equivalentes de petróleo” a “terawatt-horas” (TWh) e “exajoules” (EJ). Ninguém que não seja um especialista tem noção do que “um barril de petróleo” ou “um milhão de BTUs” significam em termos humanos. Neste livro, nós expressaremos tudo em um único conjunto de unidades pessoais com as quais todos podem se relacionar.

A unidade de energia que eu escolhi é o quilowatt-hora (kWh). Esta quantidade é chamada “uma unidade” nas contas de energia elétrica, e custa ao usuário doméstico cerca de 10p no Reino Unido em 2008⁵. Como nós veremos, a maioria das escolhas diárias envolvem quantidades de energia iguais a pequenos números de quilowatt-hora.

Quando nós discutimos **potências** (taxas nas quais se usa ou se produz energia), a energia principal será o quilowatt-hora por dia (kWh/d). Nós também, ocasionalmente, utilizaremos o watt (40 W ~1kWh/d) e em quilowatts (1kW = 1000 W = 24 kWh/d), como eu explicarei a seguir. O quilowatt-hora por dia é uma ótima unidade de tamanho humano: a maioria das atividades pessoais que envolve consumo de



Figura 2.1. Distinção entre energia e potência. Cada uma destas lâmpadas de 60W possuem uma *potência* de 60W quando ligadas; isto não significa que elas possuem uma “energia” de 60W. O bulbo da lâmpada utiliza 60W de *potência* elétrica quando está ligado; ele emite 60W de *potência* na forma de luz e calor (principalmente no último).

⁵ Valor do dólar em janeiro de 2008: R\$ 1,77

energia consomem a uma taxa de pequenos números de quilowatts-hora por dia. Por exemplo, o bulbo de uma lâmpada de 40W, mantida acesa o tempo todo, consome um quilowatt-hora por dia. Algumas companhias de eletricidade incluem gráficos nas suas contas de eletricidade, mostrando o consumo em quilowatts-hora por dia. Eu utilizarei a mesma unidade para todas as formas de potência, não apenas eletricidade. Consumo de petróleo, de gás, de carvão: eu medirei todas estas potências em quilowatts-hora por dia. Deixe-me deixar isto claro: para algumas pessoas, a palavra “potência” significa apenas o consumo de energia *elétrica*. Mas este livro aborda todas as formas de consumo e produção de energia, e eu usarei a palavra “potência” para todos eles.

Um quilowatt-hora é grosseiramente a potência que você conseguiria obter de um empregado humano. O número de quilowatts-hora por dia que você usa é, portanto, o número efetivo de empregados que você tem trabalhando para você.

As pessoas usam os dois termos de energia e potência, sem diferenciá-los, nas conversas cotidianas, mas neste livro nós devemos nos manter rigorosos aos seus significados científicos. *Potência é a taxa na qual algo consome energia.*

Talvez uma boa maneira de explicar energia e potência seja através de uma analogia com a água e com a vazão de água⁶. Se você quer beber água, você quer um volume de água – um litro, talvez (se você estiver com sede). Quando você abre uma torneira, você cria uma vazão de água. Um litro por minuto, digamos, se a torneira produzir apenas um filete; ou 10 litros por minuto, para uma torneira mais generosa. Você pode conseguir o mesmo volume (um litro) tanto com o filete por um minuto, ou através da torneira generosa por um décimo de minuto. O volume fornecido em um tempo em particular, é igual à vazão multiplicado pelo tempo:

$$\text{Volume} = \text{vazão} \times \text{tempo}$$

Nós dizemos que a vazão é a taxa na qual o volume é entregue. Se você sabe que o volume é fornecido em um determinado tempo, você consegue descobrir a vazão dividindo o volume pelo tempo: $\text{vazão} = \text{volume} / \text{tempo}$ está a conexão com energia e potência.

Energia é tipo o volume de água: *potência* é como a vazão de água. Por

Nota do tradutor: o autor fala em vazão volumétrica, porém a vazão também pode ser mássica.

exemplo, sempre que uma torradeira for ligada, ela começa a consumir *potência* a uma taxa de um quilowatt. Ela continua a consumir um quilowatt até que seja desligada. Para colocar de outra forma, a torradeira (se ficar ligada permanentemente) consome um quilowatt-hora (kWh) de energia por hora; ela também consome 24 quilowatts-hora por dia.

Quanto mais tempo a torradeira ficar ligada, mais *energia* ela usará. Você pode descobrir a energia consumida por uma atividade em particular multiplicando a potência pela duração:

$$\text{energia} = \text{potência} \times \text{tempo}$$

O joule é a unidade padrão internacional de energia, mas infelizmente é pequena demais para trabalharmos com ela. O quilowatt-hora é equivalente a 3,6 milhões de joules (3,6 megajoules).

Potências são úteis e importantes, elas possuem algo que a vazão de água não possui: elas têm suas próprias unidades especiais. Quando nós falamos sobre uma vazão, nós podemos medi-la em “litros por minuto”, “galões por hora”, ou “metros cúbicos por segundo”; os nomes destas unidades deixam claro que a vazão é “volume por unidade de tempo”. A potência de *um joule por segundo* é chamada de *watt*. 1000 joules por segundo é chamado de um quilowatt. Vamos utilizar a terminologia correta: a torradeira utiliza um quilowatt. Ela não utiliza “um quilowatt por segundo”. O “por segundo” já está incluso da definição de quilowatt: um quilowatt significa “um quilo-joule por segundo”. Similarmente nós dizemos “uma estação de potência nuclear gera um gigawatt”. Um giga-watt, por sinal, é um bilhão de watts, um milhão de quilowatts ou 1000 megawatts. Então um gigawatt é um milhão de torradeiras. E enquanto eu estou digitando aqui no teclado, nós só escrevemos o “g” e o “w” de giga-watt quando estivermos escrevendo sua abreviação “GW”.

Por favor, nunca diga “um quilowatt por segundo”, “um quilowatt por hora”, ou “um quilowatt por dia”; nenhuma destas é uma medida válida de potência. A necessidade que as pessoas têm de dizer “por alguma coisa” quando falam sobre as suas torradeiras é uma das razões pelas quais eu decidi usar o “quilowatt-hora por dia” como minha unidade de potência. Eu peço desculpas se ela é um pouco redundante para ler e escrever.

Aqui vai uma última coisa para deixar claro: se eu disser “alguém usou um gigawatt-hora de energia”, eu estou

Potência é medida em kWh por dia
Ou KW
Ou W (watts)
Ou MW (megawatts)
Ou GW (gigawatts)
Ou TW (terawatts)

Energia é medida em kWh ou MJ.

simplesmente dizendo *o quanto* de energia aquela pessoa usou, não *em quanto tempo* ela usou. Falar sobre gigawatt-hora não implica que a energia foi utilizada em *uma hora*. Você poderia utilizar um gigawatt-hora ao ligar um milhão de torradeiras por uma hora, ou ligando 1000 torradeiras por 1000 horas.

Como eu disse, eu geralmente citarei potência como kWh/d *por pessoa*. Uma razão para conectar estas unidades pessoais é que elas deixam muito mais fácil mover a conversa sobre as pessoas do Reino Unido para falar sobre outros países ou regiões. Por exemplo, imagine que nós estamos discutindo sobre incineração de resíduos e nós descobrimos que a incineração de resíduos do Reino Unido fornece uma potência de 7TWh por ano e que a incineração de resíduos da Dinamarca fornece 10TWh por ano. Isto nos ajuda a dizer se a Dinamarca incinera “mais” resíduos do que o Reino Unido? Enquanto a potência total produzida pelos resíduos em cada país pode ser interessante, eu acho que o que nós realmente queremos saber é a incineração de resíduos *por pessoa*. (Por sinal, elas são: Dinamarca, 5 kWh/d por pessoa; Reino Unido, 0,3kWh/d por pessoa. Então a Dinamarca incinera cerca de 13 vezes o que o Reino Unido incinera.) Para salvar papel, eu algumas vezes abreviarei o “por pessoa” por “/p”. Ao discutir tudo por pessoa desde o início, nós ficamos com um livro mais transportável, um que, esperamos, seja usado para discussões sobre energias sustentáveis por todo o mundo.

Detalhes Exigentes

A energia não é conservada? Nós falamos sobre “usar” energia, mas uma das leis da natureza não fala que a energia não pode ser criada ou destruída?

Sim, eu estou sendo impreciso. Este é um livro sobre *entropia*, uma coisa complicada de se explicar. Quando nós “usamos” um quilojoule de energia, o que nós estamos realmente fazendo é tirando um quilojoule de energia de uma forma que tinha *baixa entropia* (por exemplo, eletricidade) e *convertendo-a* para exatamente a mesma quantidade de energia em outra forma, geralmente uma forma que tenha uma entropia muito maior (por exemplo, ar quente ou água quente). Quando nós “usamos” a energia, ela continua lá; mas nós geralmente não podemos ficar “usando” essa energia continuamente, porque apenas processos de baixa entropia são “úteis” para nós. Algumas vezes essas grades diferentes de

energia são distinguidas com a adição de uma etiqueta nas unidades: um kWh(e) é um quilowatt-hora de energia elétrica – o maior grau de energia. Um kWh(th) é um quilowatt-hora de energia térmica – por exemplo a energia contida em dez litros de água fervente. A energia disponível nas coisas em altas temperaturas é mais útil (menor entropia) do que a energia em coisas mornas. Um terceiro grau de energia é a energia química. A energia química é uma energia de alto grau como a elétrica.

É um atalho conveniente, mas desleixado, falar sobre energia ao invés de entropia, e isto é o que nós faremos a maior parte do tempo neste livro. Ocasionalmente, nós teremos que deixar o desleixo um pouco de lado; por exemplo, quando nós discutirmos refrigeração, estações de potência, bombas de calor, ou potência geotérmica.

Você está comparando maçãs e laranjas? É válido comparar formas diferentes de energia como a energia química que é usada para alimentar um carro movido a óleo e a energia elétrica de uma turbina?

Ao comparar energia consumida com a energia concebível de ser produzida, eu não tenho a intenção de afirmar que todas as formas de energia são equivalentes e mutáveis entre elas. A energia elétrica produzida por uma turbina eólica não tem utilidade em um motor a óleo; e o petróleo é inútil se você quiser ligar uma televisão. Em princípio, a energia pode ser convertida de uma à outra, mas as conversões acarretam em perdas. Estações de potência de combustíveis fósseis, por exemplo, consomem *energia química* e produzem *eletricidade* (com uma eficiência de 40%, mais ou menos). E fábricas de alumínio consomem *energia elétrica* para criar um produto com alta *energia química* – alumínio (com uma eficiência de 30%, aproximadamente).

Em alguns resumos de produção e consumo de energia, todas as formas diferentes de energia são colocadas sobre as mesmas unidades, mas multiplicadores são introduzidos, taxando a energia elétrica de hidroelétricas, por exemplo, como valendo 2,5 vezes mais do que a energia química do petróleo. Esta colisão de valores de energia elétrica efetiva pode ser justificada ao se dizer “bem, 1 kWh de eletricidade é equivalente a 2,5 kWh de petróleo, porque se nós colocarmos esta quantidade de petróleo em uma estação de potência padrão ela forneceria 40% dos 2,5 kWh, o que é 1 kWh de eletricidade.” Neste livro, contudo, eu geralmente

utilizarei uma taxa de conversão de um para um, ao comparar as diferentes formas de energia. Não é o caso de que 2,5 kWh de petróleo é inescapavelmente equivalente a 1kWh de eletricidade; isto apenas acontece para ser a taxa de troca percebida em uma visão mundial onde o petróleo é usado para produzir eletricidade. Sim, conversão de energia química para energia elétrica é feita com particular ineficiência na taxa de conversão. Mas energia elétrica também pode ser convertida em energia química. Em um mundo alternativo (talvez não tão distante) com relativamente muita eletricidade e pouco petróleo, as pessoas talvez utilizem eletricidade para produzir combustíveis líquidos; neste mundo, nós provavelmente não usaríamos a mesma taxa de conversão – cada kWh de gasolina custaria então algo como 3kWh de eletricidade! Eu acho que um modo atemporal e científico de resumir e comparar as energias é trabalhar com 1 kWh de energia química equivalente a 1 kWh de eletricidade. A minha escolha em usar essa taxa de conversão um a um significa que alguma das minhas somas parecerá um pouco diferente das de outras pessoas. (Por exemplo, as taxas de *BP's Statistical Review of World Energy* consideram 1 kWh de eletricidade equivalente a 100/38, aproximadamente 2,6 kWh de petróleo; por outro lado, o *Digest of UK Energy Statistics* do governo do Reino Unido usa a mesma conversão de um para um que eu.) E eu enfatizo novamente, esta escolha não significa que você poderia converter qualquer forma de energia diretamente em outra. Converter energia química em energia elétrica sempre acarretará em alguma perda de energia, da mesma forma que a conversão de energia elétrica em química.

Equações Físicas

Ao longo do livro, o meu objetivo não é apenas trabalhar nos números indicando o nosso consumo atual de energia e a produção concebível de energia sustentável, mas também esclarecer *do que esses números dependem*. Compreender do que estes números dependem é essencial caso queiramos escolher políticas sensíveis para modificar qualquer um dos números. Apenas se nós entendermos a física por trás do consumo de energia e da produção dela é que nós podemos avaliar afirmações como “carros desperdiçam 99% da energia que consomem; nós poderíamos redesenhar os carros de modo que eles desperdiçassem 100 vezes menos energia”. Esta afirmação é verdadeira? Para explicar a resposta, eu precisarei utilizar equações como:

$$\text{energia cinética} = \frac{mv^2}{2}$$

Contudo, eu reconheço que para muitos leitores este tipo de formulação é como uma língua estrangeira. Então aqui vai a minha promessa: *eu mantereí toda esta linguagem estrangeira nos capítulos técnicos no final do livro*. Qualquer leitor com qualificações de matemática, química e física do ensino médio pode aproveitar esses capítulos técnicos. A linha de raciocínio do livro (da página 2 até a página 322) é intencionada a estar acessível a qualquer pessoa que consiga somar, multiplicar e dividir. É especialmente focado aos nossos representantes eleitos e não eleitos, os Membros do Parlamento.

Um último ponto, antes de seguirmos com o livro: eu não sei tudo sobre energia. Eu não tenho todas as respostas, e os números que eu ofereço estão abertos para revisão e correção. (Por sinal, eu espero receber correções e as publicarei no *site* do livro.) A única coisa que eu *tenho certeza* é que as respostas para as nossas questões sobre energia sustentável envolverão *números*; qualquer discussão *sã* sobre energia sustentável requer números. Este livro os possui, e mostra como lidar com eles. Eu espero que você goste!

Observações e leitura complementar

N pg

- 30 O “por segundo” já está incluso da definição de quilowatt. Outros exemplos de unidades que, como o watt, já tem um “por tempo” no seu nó – “a velocidade do nosso yate é de dez nós!” (um nó é uma milha náutica *por hora*); o hertz – “eu conseguia ouvir uma buzina a 50 hertz” (um hertz é a frequência de um ciclo *por segundo*); o ampere – “o fusível queima quando a corrente estiver superior a 13 amperes” (*não* 13 amperes por segundo); e o cavalo de vapor – “aquele maldito motor fornece 50 cavalos de vapor!” (*não* cavalos de vapor por segundo, nem 50 cavalos de vapor por hora, nem 50 cavalos de vapor por dia, apenas cavalos de vapor).
- Por favor, nunca, jamais diga “um quilowatt por segundo”. Existem específicas e raras exceções para esta regra. Caso se fale sobre um aumento em demanda de potência, nós talvez digamos “a demanda da Inglaterra está crescendo a 1 gigawatt por ano”. No capítulo 26, quando eu discutir flutuação na potência eólica, eu direi “numa manhã a potência fornecida pelos moinhos irlandeses caíram a uma taxa de 85 MW por hora.” Por favor, tome cuidado! Apenas uma sílaba accidental pode levar à confusão: por exemplo, a leitura do seu medidor de eletricidade está em quilowatts-hora (kWh), *não* em ‘quilowatts-por-hora’.

Eu providenciei um mapa na página 449 para ajuda-lo a converter entre kWh por dia e as outras unidades nas quais potência é discutida.

3 Carros

Para o nosso primeiro capítulo sobre consumo, vamos estudar o ícone da civilização moderna: o carro com uma só pessoa dentro dele.

Quanta potência um usuário normal de carro consome? Uma vez que nós sabemos as taxas de conversão, é uma aritmética simples:

$$\text{energia usada por dia} = \frac{\text{distância viajada por dia}}{\text{distância por unidade de combustível}} \times \text{energia por unidade de combustível}$$

Para a **distância viajada por dia**, usemos 50 km (30 milhas).

Para a **distância por unidade de combustível**, também conhecido como o consumo do carro, usaremos 33 milhas por galão (tirado de uma propaganda para um carro familiar no Reino Unido):

$$33 \text{ milhas por galão imperial} \sim 12 \text{ km por litro}$$

(O símbolo “ \approx ” significa “é aproximadamente igual a”)

E sobre a **energia por unidade de combustível** (também conhecida como **poder calorífico** ou **densidade energética**)? Ao invés de procurar pelo valor, é divertido estimar este tipo de quantidade com um pouco de pensamento paralelo. Combustíveis automotivos (seja a diesel ou petróleo) são todos hidrocarbonetos; e hidrocarbonetos também podem ser encontrados na nossa mesa de café, com o poder calorífico convenientemente escrito ao lado: grosseiramente 8 kWh por kg (figura 3.2). Uma vez que nós estimamos a economia do carro em milhas por unidade de *volume* de combustível, nós precisamos expressar o poder calorífico como energia por unidade de *volume*. Para transformar os nossos “8 kWh por kg” (uma unidade de energia por massa) em energia por volume, nós precisamos conhecer a densidade do combustível. Qual a densidade da manteiga? Bem, a manteiga flutua na água, assim como as gotas de combustível, de modo que a sua densidade deve ser um pouco menor do que a da água. Se nós chutarmos uma densidade de 0.8 kg por litro, nós obtemos um poder calorífico de:

$$8 \text{ kWh por kg} \times 0.8 \text{ kg por litro} \sim 7 \text{ kWh por litro.}$$



Figura 3.1. Carros. Uma BMW vermelha tolhida por uma espaçonave do planeta Dorkon.



Figura 3.2. Quer saber a energia no combustível do seu carro? Veja o rótulo de uma embalagem de manteiga ou margarina. O poder calorífico é 3000 kJ por 100g, ou cerca de 8 kWh por kg.

Ao invés de uma estimativa intencionalmente imprecisa que perpetua essa imprecisão, vamos mudar para o valor real, por gasolina, de 10 kWh por litro.

$$\text{energia usada por dia} = \frac{\text{distância viajada por dia}}{\text{distância por unidade de combustível}} \times \text{energia por unidade de combustível}$$

$$= \frac{50 \text{ km por dia}}{12 \text{ km por litro}} \times 10 \text{ kWh por litro}$$

~ 40 kWh por dia

Parabéns! Nós fizemos a nossa primeira estimativa de consumo. Eu exibi esta estimativa na pilha da esquerda na figura 3.3. A caixa vermelha representa os 40 kWh por dia por pessoa.

Esta é a estimativa para um motorista de carro típico dirigindo um carro típico atualmente. Os próximos capítulos discutirão *a média* de consumo para todas as pessoas na Grã-Bretanha, levando em conta o fato de que nem todo mundo dirige. Nós também discutiremos na Parte II o que o consumo *poderia ser*, com a ajuda de outras tecnologias, como os carros elétricos.

Por que o carro faz 33 milhas por galão? Para onde vai essa energia? Nós poderíamos produzir carros que fizessem 3300 milhas por galão? Se nós estamos interessados em reduzir o consumo dos carros, nós precisamos compreender a física por trás do consumo do carro. Estas questões são respondidas no capítulo técnico A (p336), que fornece uma teoria sobre o consumo dos carros. Eu encorajo você a ler os capítulos técnicos se fórmulas como $\frac{1}{2} mv^2$ não lhe causa problemas médicos.

Conclusão do capítulo 3: um motorista típico de carros usa cerca de 40 kWh por dia. Agora nós precisamos trabalhar um pouco na pilha das energias renováveis, de modo que tenhamos algo com o que comparar isso.

CONSUMO PRODUÇÃO

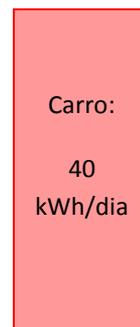


Figura 3.3. Conclusão do Capítulo 3: um motorista de carro típico consome cerca de 40 kWh por dia.

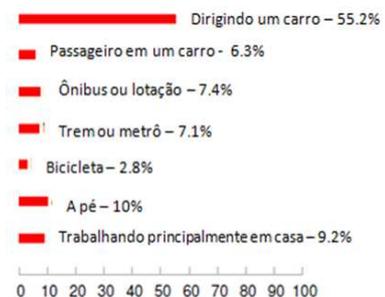


Figura 3.4. Como os ingleses vão para o trabalho, segundo o senso de 2001.

Consultas:

E o custo energético da produção do combustível do carro?

Ótimo ponto. Quando eu estimar a energia consumida por uma atividade particular, eu tendo a escolher uma fronteira relativamente pequena ao redor da atividade. Esta

escolha faz com que a estimativa seja mais fácil, mas eu concordo que é uma boa ideia tentar estimar o impacto energético total de uma atividade. Foi estimado que para produzir cada unidade de petróleo, é necessária uma entrada de 1.4 unidades de óleo e outros combustíveis primários (Treloar et al., 2004).

Observações e Leitura Complementar

N pg.

35 Para a **distância viajada por dia**, usemos 50 km. Isto corresponde a 18 000 km (11 000 milhas) por ano. Aproximadamente metade da população na Grã-Bretanha dirige para o trabalho. A quantidade total de carros dirigidos no Reino Unido é de 686 bilhões de passageiros-km por ano, o que corresponde a uma “distância média viajada por carro por pessoa inglesa” de 30 km por dia. Fonte: Departamento de Transporte [5647rh]. Como eu disse na P26, meu objetivo é estimar o consumo de uma “típica pessoa próspera” – o consumo que muitas pessoas aspiram ter. Algumas pessoas não dirigem muito. Neste capítulo, eu quero estimar a energia consumida por alguém que opte por dirigir, ao invés de despersonalizar a resposta reportando a média do Reino Unido, que mistura os motoristas e os não-motoristas. Se eu disse que “a média de consumo de energia por carro dirigido no Reino Unido é 24 kWh por pessoa”, eu aposto que algumas pessoas entenderam errado e disseram: “Eu sou um motorista de carro, então eu consumo 24 kWh/d”.

35 ... usemos 33 milhas por galão. Na linguagem europeia, isto significa 8,6 litros por 100 km. 33 milhas por galão é a média para os carros no Reino Unido em 2005 [27jdc5]. Carros a gasolina possuem uma média de consumo de 13,18 km/l; carros a diesel uma média de 16,6 km/l; novos carros a gasolina (com idade menor de dois anos), 13,6 km/l (Departamento de Transporte, 2007). Honda, “a companhia mais eficiente em combustíveis na América”, registra que a sua frota de carros novos vendidos em 2005 possui uma média de nível top de economia de 14,88 quilômetros por litro no Reino Unido [28abpm].

35 Vamos chutar uma densidade de 0.8 kg por litro. A densidade da gasolina é 0,737. A do diesel é 0,820 – 0,950 [nmn41].

36 o valor real de 10 kWh por litro. ORNL [2hcgdh] fornece os seguintes poderes caloríficos: diesel: 10,7 kWh/l; combustível de avião: 10,4 kWh/l; gasolina: 9,7 kWh/l. Quando procuramos pelos poderes caloríficos, você encontrará o “poder calorífico bruto” e o “poder calorífico inferior” listados (também conhecidos como “alto poder

Poderes caloríficos	
Gasolina	10 kWh por litro
Diesel	11 kWh por litro



calorífico” e “baixo poder calorífico”). Eles diferem por apenas 6% para combustíveis de motores, então não é crucial distingui-los aqui, mas deixe-me explicá-los de qualquer forma. O poder calorífico bruto é a real energia química liberada quando o combustível é queimado. Um dos produtos da combustão é água, e na maioria das máquinas e estações de potência, parte da energia se perde em vaporizar essa água. O poder calorífico inferior mede quanto da energia sobra assumindo que essa energia de vaporização seja descartada ou perdida.

Quando nós perguntamos “quanta energia o meu estilo de vida consome?” o poder calorífico bruto é a quantidade certa a ser usada. O poder calorífico inferior, por outro lado, é de interesse para engenheiros de uma estação de potência, que necessitam decidir qual combustível queimar na sua estação. Ao longo deste livro, eu tentei usar valores de poderes caloríficos brutos.

Uma observação final para os pedantes de plantão que dizem “manteiga não é um hidrocarboneto”: Ok, manteiga não é um hidrocarboneto *puro*; mas é uma aproximação boa dizer que o componente principal da manteiga são longas cadeiras de hidrocarbonetos, assim como na gasolina. A prova disso é, esta aproximação nos deixou a 30% da resposta correta. Bem-vindo à física dos guerrilheiros.

4. Vento

O Reino Unido possui os melhores recursos eólicos da Europa.

Comissão de Desenvolvimento Sustentável

Parques eólicos devastarão inutilmente a zona rural.

James Lovelock

Quanto de potência eólica nós poderíamos realmente gerar?

Nós podemos fazer uma estimativa do potencial do vento na costa (base terrestre) no Reino Unido multiplicando a potência média por unidade de terra de um parque eólico por área por pessoa no Reino Unido:

potência por pessoa = **potência eólica por unidade** de área x área por pessoa

O capítulo B (p349) explica como estimar a potência por unidade de área de um parque eólico no Reino Unido. Se a velocidade média do vento é 6 m/s (13 milhas por hora, ou 22 km por hora), a potência por unidade de área do parque eólico é cerca de **2 W/m²**.

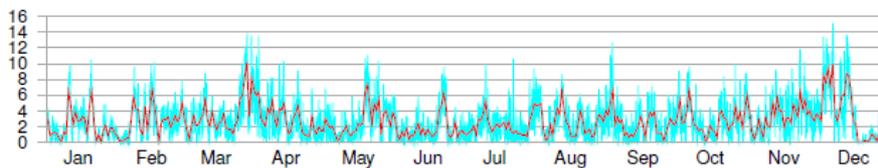


Figura 4.1. Velocidade média de vento em Cambridge em metros por segundo, diária (linha vermelha), e a cada meia hora (linha azul) no ano de 2006. Veja também a Figura 4.6.

Esta imagem de 6 m/s é provavelmente uma estimativa superestimada para muitas localizações na Grã-Bretanha. Por exemplo, a figura 4.1 mostra as velocidades médias de vento diárias em Cambridge durante 2006. A velocidade média diária atingiu 6 m/s em apenas 30 dias do ano – Veja a figura 4.6 para o histograma. Mas alguns pontos possuem velocidade de vento acima de 6 m/s – por exemplo a região de Cairn gorn na Escócia (Figura 4.2).

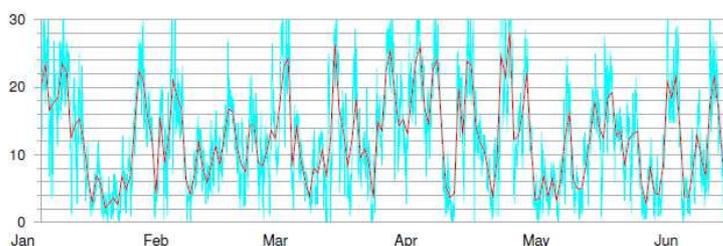


Figura 4.2. Média de vento em Cairgorn em metros por segundo, durante seis meses de 2006.

Conectando-se com a densidade populacional da Grã-Bretanha: 250 pessoas por quilometro quadrado, ou 4000 metros quadrados por pessoa, nós conseguimos ver que a energia eólica poderia gerar

$$2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 4000 \frac{\text{m}^2}{\text{pessoa}} = 8000\text{W por pessoa,}$$

se as turbinas eólicas fossem instaladas ao redor de *todo* o país, e assumindo 2 W/m² é a potência correta por unidade de área. Convertendo para a nossa unidade preferida de potência, isto é 200 kWh por pessoa.

Sejamos realísticos. Qual fração do país nós podemos realmente imaginar cobrir com turbinas eólicas? Talvez 10%? Então nós concluímos: se nós os 10% do país com mais vento com turbinas eólicas (fornecendo 2 W/m²), nós conseguiríamos gerar **20 kWh/d por pessoa**, o que é *metade* da potência usada para dirigir um carro comum movido a combustíveis fósseis que percorra 50 km por dia.

A fonte de energia eólica da Grã-Bretanha pode ser “enorme”, mas é óbvio que não é tão enorme quanto o nosso enorme consumo. Nós falaremos sobre a energia dos ventos marítimos mais tarde.

Eu deveria enfatizar quão generosa é a suposição que eu estou fazendo. Vamos comparar esta estimativa do potencial eólico da Grã-Bretanha com a potência eólica atualmente instalada mundialmente. As turbinas eólicas necessárias para fornecer os 20 kWh/d por pessoa no Reino Unido somam 50 vezes todo o maquinário eólico da Dinamarca; 7 vezes todos os parques eólicos da Alemanha; e o dobro de toda a frota eólica do mundo.

Por favor, não me entenda mal. Eu estou afirmando que nós não deveríamos nos incomodar em construir parques eólicos? De modo algum. Eu estou simplesmente tentando transmitir um fato útil, mostrando que se nós quisermos que as turbinas eólicas realmente façam alguma diferença, os parques eólicos deveriam cobrir uma vasta área.

Esta conclusão – que a contribuição máxima dos ventos, apesar de ser “enorme”, é muito menos do que o nosso consumo – é importante, então chequemos a imagem chave, a potência assumida por unidade de área de parques eólicos (2 W/m²), contra um parque eólico real no Reino Unido.

O parque eólico de Whitelee sendo construído próximo de Glasgow na Escócia possui 140 turbinas com uma

CONSUMO PRODUÇÃO

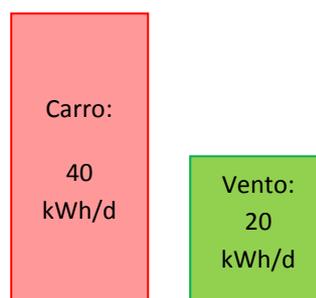


Figura 4.3. Conclusão do capítulo 4: a produção máxima plausível através das turbinas eólicas no Reino Unido é de 20 kWh por dia por pessoa.

POTÊNCIA POR UNIDADE DE ÁREA

Parque eólico **2 W/m²**
(velocidade de 6 m/s)

Tabela 4.4. Fatos que valem a pena ser lembrados: parques eólicos.

DENSIDADE POPULACIONAL DA GRÃ-BRETANHA

250 por km² ↔ 4000 m² por pessoa

Tabela 4.5. Fatos que valem a pena serem lembrados: densidade populacional. Veja a página 440 para mais densidades populacionais.

capacidade de *pico* combinada de 322 MW em uma área de 55 km². Isto é um *pico* de 6 W/m². A média de potência produzida é menor porque as turbinas não trabalham no seu pico o tempo todo. A taxa da potência média para a potência de pico é chamada “fator de carga” ou “fator de capacidade”, e varia de lugar para lugar e com a escolha do maquinário alocado em determinado local; um fator típico para uma boa localidade com as turbinas modernas é 30%. Se nós assumirmos que Whitelee possui um fator de carga de 33% então a produção média de potência por unidade de área de terra é 2 W/m² - exatamente o mesmo que a densidade de potência que nós pressupomos acima.

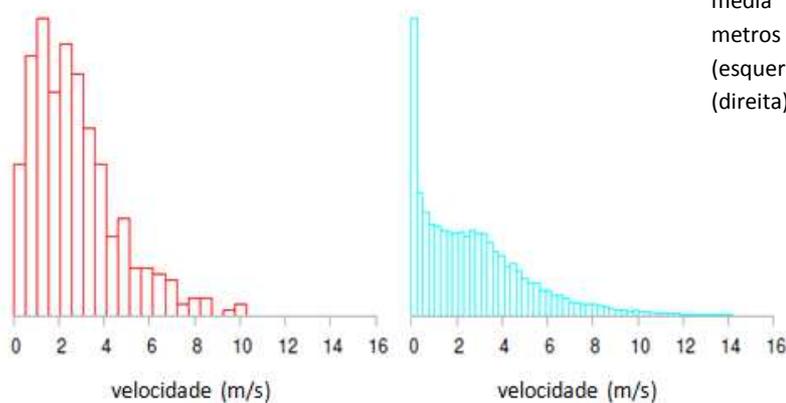


Figura 4.6. Histograma da velocidade média de vento de Cambridge em metros por segundo: médias diárias (esquerda), e médias a cada meia-hora (direita).

Consultas:

As turbinas eólicas estão ficando cada vez maiores. Turbinas eólicas maiores mudam a resposta deste capítulo?

O Capítulo B explica. Turbinas eólicas maiores proporcionam economias financeiras de escala, mas elas não aumentam a potência total por unidade de área de terra, porque turbinas maiores devem ter um maior espaçamento entre elas. Um parque eólico que seja duas vezes mais alto fornecerá grosseiramente 30% mais potência.

A potência eólica oscila o tempo todo. Isto com certeza faz com que o vento seja menos útil?

Talvez. Nós voltaremos a este assunto no capítulo 26, onde nós observaremos a intermitência do vento e discutiremos várias possíveis soluções para este problema, incluindo o gerenciamento do armazenamento e da demanda de energia.

Observações e Leitura Complementar

N° da página

- 39 **Figura 4.1 e Figura 4.6.** Os arquivos de vento de Cambridge são do *Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge* [vxhhj]. A estação climática fica no telhado do prédio Gates, a aproximadamente 10 metros de altura. As velocidades de vento a 50 metros de altura são geralmente cerca de 25% maiores. Os arquivos de Cairngorn (figura 4.2) são *Heriot-Watt University Physics Department* [tdvml].
- 40 **As turbinas eólicas necessárias para fornecer os 20 kWh/d por pessoa no Reino Unido somam 50 vezes todo o maquinário eólico da Dinamarca.** Assumindo um fator de carga de 33%, uma potência média de 20 kWh/d por pessoa requer uma capacidade instalada de 150 GW. No final de 2006, Denmark tinha uma capacidade instalada de 3.1 GW; a Alemanha de 20,6 GW. A total mundial instalada era 74 GW (www.indea.org). Incidentalmente, o fator de carga da frota eólica de Danish foi de 22% em 2006, e a potência média fornecida por ela era de 3 kWh/d por pessoa.

5 Aviões

Imagine que você faça uma viagem intercontinental por ano de avião. Quanta energia isso custa?

Um Boeing 747-400 com 240 000 litros de combustível carrega 416 passageiros por cerca de 8 800 milhas (14 200 km). E o poder calorífico do combustível é 10 kWh por litro (nós aprendemos isso no capítulo 3). Então o custo energético de uma viagem em um avião destes, caso dividido igualmente entre os passageiros, é

$$\frac{2 \times 240\,000 \text{ litros}}{416 \text{ passageiros}} \times 10 \frac{\text{kWh}}{\text{litro}} \sim 12\,000 \text{ kWh por passageiro.}$$

Se você fizer uma viagem destas por ano, então a sua média de consumo energético por dia é

$$\frac{12\,000 \text{ kWh}}{365 \text{ dias}} \sim 33 \text{ kWh por dia.}$$

14 200 km é um pouco mais longe do que a distância entre Londres e a Cidade do Cabo (10 000 km) e Londres e Los Angeles (9000 km), então eu acredito que nós superestimamos levemente a distância de uma viagem de longo percurso intercontinental; mas nós também superestimamos a plenitude do avião, e o custo energético por pessoa é maior caso o avião não esteja lotado. Diminuindo o dimensionamento por 10 000 km/ 14 200 km para conseguir uma estimativa para a Cidade do Cabo, depois subindo novamente para 100/80 para permitir que a capacidade do avião esteja apenas 80% completa, nós chegamos nos 29 kWh por dia. Para facilitar a memorização, eu vou arredondar este resultado para **30 kWh por dia**.

Vamos esclarecer o significado disto. Viajar de avião uma vez por ano tem um custo energético levemente maior do que deixar 1 kW de fogo elétrico ligado, sem desliga-lo, por 24 horas por dia, o ano todo.

Assim como no Capítulo 3, no qual nós estimamos o consumo pelos carros, que foi acompanhado pelo Capítulo A, oferecendo um modelo de onde a energia é usada nos carros, o parceiro técnico deste capítulo (Capítulo C, p356) discute onde a energia é usada e perdida nos aviões. O Capítulo C nos permite responder questões como “a viagem aérea consumiria

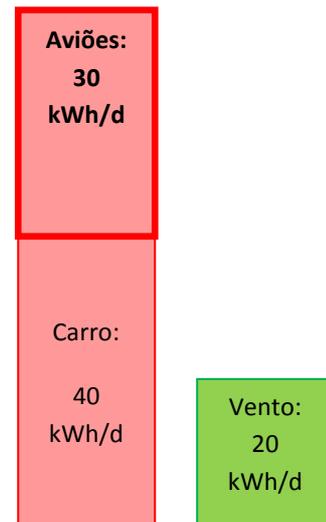


Figura 5.1. Ter uma viagem intercontinental por ano consome cerca de 30 kWh/dia.

significativamente menos energia se nós viajássemos em aviões mais devagares?” A resposta é **não**: em contraste aos veículos sobre rodas, que *podem* ficar mais eficientes se forem mais devagares, os aviões já são quase tão eficientes quanto é possível que sejam. Aviões inevitavelmente tem que utilizar energia por duas razões: eles tem que jogar ar para baixo para ficarem “por cima”, e eles precisam energia para vencer a resistência do ar. Nenhum redesign de avião melhorará radicalmente a sua eficiência. Uma melhora de 10%? Sim, possível. Uma duplicação da eficiência? Eu comeria as minhas meias.



Figura 5.2. Bombardier Q400 NextGen www.q400.com.

Consultas:

Os aviões a turboprop não são muito mais eficientes?

Não. O “confortavelmente mais verde” Bombardier Q400 NextGen, o “avião a turboprop mais avançado tecnologicamente do mundo”, de acordo com os seus fabricantes [www.q400.com], utiliza 3,81 litros por 100 passageiros-km (a uma velocidade de 667 km/h), o que significa um custo energético **38 kWh por 100 p-km**. O 747 tem um custo energético total de **42 kWh por 100 p-km**. Então ambos os aviões são duas vezes mais eficientes em termos de combustível do que um carro sendo usado por uma pessoa só. (No carro eu estou considerando aqui o carro médio europeu, discutido no Capítulo 3.)

Voar é muito ruim para o clima de alguma forma?

Sim, isto é o que o ponto de vista dos experts, apesar de haver certa incerteza sobre este tópico ainda [3fbufz]. Voar cria outros gases de efeito estufa além do CO₂, como água e ozônio, e gases de efeito estufa indireto, como óxidos de nitrogênio. Se você quer estimar a sua pegada de carbono em toneladas equivalentes de CO₂, então você deveria pegar as reais emissões de CO₂ dos seus vôos e dobrá-las ou triplicá-las. O diagrama deste livro não inclui este multiplicador porque aqui nós estamos nos focando no balanço *energético*.

A melhor coisa que nós podemos fazer com os ambientalistas é atirar neles.

Michael O’Leary, CEO do Ryanair [3asmgy]

	energia por distância (kWh por 100 p-km)
Carro (4 ocupantes)	20
Aviões da Ryanair, ano 2007	37
Bombardier Q400, lotado	38
747, lotado	42
747, 80% cheio	53
Aviões da Ryanair, ano 2000	73
Carro (1 ocupante)	80

Figura 5.3. Eficiência de transporte de passageiro, expresso como a energia necessária por 100 passageiros-km.

Observações e Leitura Complementar

N pg

43 Boeing 747-400.

Os aviões hoje não estão completamente lotados. As linhas aéreas estão orgulhosas da sua média de lotação de 80%. Aviões easyjet estão, na média, 85% cheios. (Fonte: thelondonpaper Terça-feira, 16 de Janeiro, 2007.) Um 747 com 80% da sua capacidade de lotação utilizada consome cerca de 53 kWh por 100 passageiros-km.

E vôos de curta distância? Em 2007, Ryanair, “a linha aérea mais verde da Europa”, fornece transporte a um custo de **37 kWh por 100 p-km** [3exmgv]. Isto significa que voar pela Europa com a Ryanair tem o mesmo custo energético do que ter todos os seus passageiros dirigindo em carros para os seus destinos, estando dois por carro. (Para uma indicação do que as outras linhas aéreas podem estar fornecendo, a taxa de queima da Ryanair em 2000, antes dos seus investimentos amigáveis ao meio ambiente, era acima de **73 kWh por 100 p-km**.) De Londres a Roma são 1430 km; Londres para Malaga são 1735 km. Então uma viagem de ida e volta a Roma com a linha aérea mais verde tem um custo energético de 11050 kWh, e uma viagem de ida e volta para Malaga custa 1270 kWh. Se você dá um pulo por ano a Roma e a Malaga, a sua potência média consumida é 6,3 kWh/d com a linha mais verde, e talvez 12 kWh/d com uma menos verde.

E aqueles que voam com frequência? Para conseguir um cartão prateado de voador frequente em uma companhia aérea intercontinental, parece que a pessoa deve voar cerca de 25 000 milhas por ano na classe econômica. Isto é cerca de 60 kWh por dia, se nós escalarmos os números do início deste capítulo e assumirmos que os aviões estão com 80% da sua capacidade.

Aqui estão alguns imagens adicionais do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas [yrnmum]: um 747 completamente cheio viajando 10 000 km com baixa densidade de assentos (262 assentos) tem um consumo energético de **50 kWh por pessoa por 100 p-km**. Em uma configuração com alta densidade de assentos (568 assentos) e viajando 4000 km, o mesmo avião apresenta um consumo energético de **22 kWh por 100 p-km**. Um pequeno Tupolev-154 viajando 2235 km com 70% dos seus 164 assentos ocupados consome **80 kWh por 100 p-km**.

44 Nenhum redesign de avião melhorará radicalmente a sua eficiência. Na verdade o alvo da *Advisory Council for Aerospace Research in Europe* (ACARE) é de uma redução global de 50% no combustível queimado por passageiro-km até 2020 (relativo a uma linha de 2000), com 15-10% de



Figura 5.4. Ryanair Boeing 737-800. Fotografia de Adrian Pingstone.

Viagens curtas: **6 kWh/d**

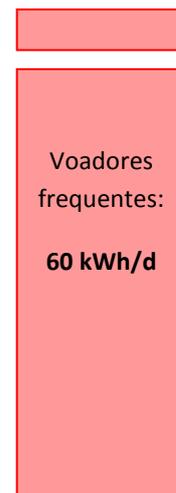


Figura 5.5. Duas viagens curtas na linha aérea de curtas distâncias mais verde: 6.3 kWh/d. Viajar o suficiente para ser qualificado com status e o cartão prateado de voador frequente: 60 kWh/d.

melhorias esperadas na eficiência da maquinaria. Em 2006, Rolls Royce está na metade do caminho para o objetivo para a sua maquinaria [36w5gz]. Dennis Bushnell, cientista chefe do Centro de Pesquisa Langley da NASA, parece concordar com as minhas avaliações globais sobre o melhorias na eficiência na aviação. A indústria da aviação é madura. “Não há muito ainda a ganhar além do crescimento glacial de um por cento aqui e lá através de longos períodos de tempo”. (*New Scientist*, 24 Fevereiro de 2007, página 33).

O radicalmente reformulado “Silent Aircraft” [silentaircraft.org/sax40], se ele fosse construído, tem uma previsão de ser 16% mais eficiente do que o avião modelado convencionalmente (Nickol, 2008).

Se o objetivo da ACARE for atingido, isto provavelmente acontecerá graças principalmente a ter aviões mais ocupados e melhor administração do tráfego aéreo.

6 Solar

Nós estamos estimando como o nosso consumo se empilha contra a produção de energia sustentável. Nos últimos três capítulos nós descobrimos que dirigir carros e viajar de avião consome mais energia do que a plausível produção de potência eólica do Reino Unido. Será que a potência solar poderia colocar a produção de volta na liderança?

A potência crua dos raios solares ao meio-dia em um dia nublado é 1000 W por metro quadrado. Isto é 1000 W por m^2 de área orientada em direção ao sol, não por m^2 de área de terra. Para conseguir a potência por m^2 de *área de terra* na Grã-Bretanha nós teríamos que fazer várias **correções**. Nós precisamos compensar pela inclinação existente entre o sol e a terra, o que reduz a intensidade do sol ao meio-dia em cerca de **60%** do seu valor no equador (figura 6.1). Nós também perdemos um pouco já que não é meio-dia o dia inteiro. Em um dia de céu limpo, sem nuvens, em março ou setembro, a razão da intensidade *média* com a intensidade do meio-dia é de **32%**. Por fim, também perdemos potência pela cobertura de nuvens no céu. Em uma localidade típica do Reino Unido o sol brilha por apenas **34%** das horas do dia.

O efeito combinado destes três fatores com a complicação adicional da oscilação das estações é que a potência média bruta da luz do sol por metro quadrado de telhados orientados para o sul na Grã-Bretanha é aproximadamente 110 W/m^2 , e a potência média bruta da luz solar por metro quadrado de terreno plano é aproximadamente 100 W/m^2 .

Nós podemos transformar essa potência bruta em potência útil de quatro maneiras:

1. Solar térmica: utilizar a luz do sol para aquecimento direto de edificações ou água.
2. Solar fotovoltaica: geração de eletricidade.
3. Biomassa solar: usar árvores, bactérias, algas, milho, soja, ou oleaginosas para produzir combustíveis, químicos, ou materiais de edificações.
4. Alimentos: O mesmo que a biomassa solar, com exceção de que nós usamos as plantas em humanos ou outros animais.

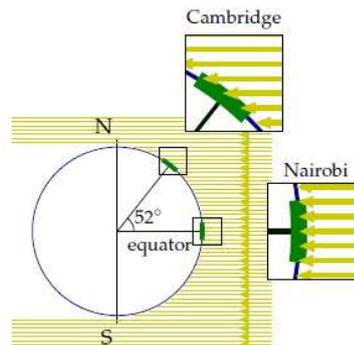


Figura 6.1. Os raios de sol atingindo a terra ao meio dia em um dia de primavera ou outono. A densidade de luz solar por unidade de área de terra em Cambridge (latitude 52°) é cerca de 60% daquela no equador.

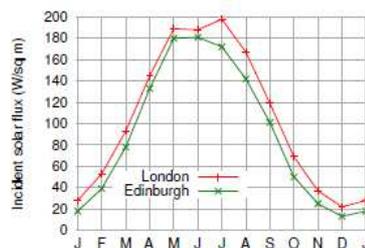


Figura 6.2. Intensidade média do sol em Londres e em Edimburgo como função do tempo no ano. A intensidade média por unidade de área de terra, é 100 W/m^2 .

(Em um capítulo posterior nós também veremos algumas outras técnicas de potência solar apropriadas para desertos.)

Vamos fazer estimativas rápidas e aproximadas da potência máxima plausível que cada um destes itens pode fornecer. Nós negligenciaremos seus custos econômicos, e os custos energéticos de manufatura e manutenção das instalações de energia.

Solar térmica

A tecnologia de potência solar mais simples é um painel para fazer água quente. Vamos imaginar que nós cubramos todos os telhados orientados para o sul com painéis

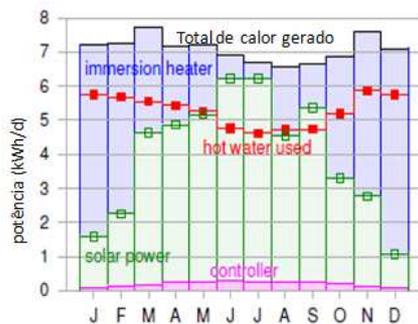


Figura 6.3. Potência solar gerada por um painel de água quente de 3 m² (verde), e calor suplementar necessário (azul) para fazer água quente na casa de teste de Viridian Solar. (A fotografia mostra uma casa com o mesmo modelo de painel no seu telhado.) A potência solar média dos 3 m² foi 3,8 kWh/d. O experimento simulou o consumo de água quente de uma média das residências europeias – 100 litros de água quente (60°C) por dia. O buraco de 1,5-2 kWh/d entre o calor total gerado (linha preta, em cima) e a água quente usada (linha vermelha) é causado pela perda de calor. A linha magenta mostra a potência elétrica necessária para executar o sistema solar. A potência média por unidade de área desses painéis solares é 53 W/m².

de energia solar térmica – isto seria cerca de 10 m² de painéis por pessoa – e vamos assumir que estes tenham uma eficiência de 50% na transformação dos 110 W/m² da luz do sol em água quente (figura 6.3).

Multiplicando

$$50\% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

Encontramos que o aquecimento solar pode fornecer

$$13 \text{ kWh por dia por pessoa}$$

Eu colori esta caixa de produção de branco na figura 6.4 para indicar que ele descreve a produção de energia de baixo-nível – água quente não é tão valiosa quanto a energia elétrica de alto-nível que as turbinas eólicas produzem. Calor não pode ser exportado pela rede elétrica. Se você não precisa dele, então ele é perdido. Nós devemos ter em mente que muito deste calor capturado não estaria no lugar certo. Em cidades, onde muitas pessoas vivem, acomodações residenciais

possuem menos área por pessoa do que a média nacional. Além disso, esta potência seria fornecida de forma não uniforme ao longo do ano.

Solar fotovoltaica

Painéis fotovoltaicos (FV) convertem a luz do sol em eletricidade. Típicos painéis solares possuem uma eficiência de 10%; os painéis mais caros trabalham a 20%. (Leis fundamentais da física limitam a eficiência de sistemas fotovoltaicos para no máximo 60% com espelhos ou lentes de concentração perfeitos, e 45% sem concentração. Um dispositivo de produção em massa com eficiência acima de 30% seria sensacional.) A potência média fornecida por painéis fotovoltaicos com 20% de eficiência voltados para o sul na Grã Bretanha seria

$$20\% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2$$

A figura 6.5 mostra dados para confirmarem este número. Vamos dar a cada pessoa 10 m² de painéis solares caros (20% de eficiência) e cobrir todos os telhados voltados para o sul. Isto fornecerá

5 kWh por dia por pessoa.

Uma vez que a área de todos os telhados voltados para o sul é de 10 m² por pessoa, com certeza não existe espaço nos nossos telhados para estes painéis e para os painéis térmicos da seção anterior. Então nós teremos que escolher se nós teremos contribuição fotovoltaica ou a contribuição da água quente aquecida pelo sol. Bom, eu apenas adicionarei ambos na pilha da produção, de qualquer forma. Incidentalmente, o atual custo de instalação de painéis fotovoltaicos é cerca de quatro vezes o custo de instalação dos painéis térmicos, mas eles fornecem apenas metade da energia, ainda que seja energia de alto-nível. Então eu aconselharia para uma família considerando investir na energia solar a investigar a opção da energia solar térmica primeiro. A solução mais inteligente, pelo menos em países ensolarados, é fazer sistemas combinados que forneçam, em uma única instalação tanto eletricidade quanto água quente. Esta é a abordagem pioneira da Heliodynamics, que reduz o custo global de seus sistemas cercando pequenas unidades de fotovoltaicas de arseniato de gálio de alta qualidade com matrizes de espelhos planos que se

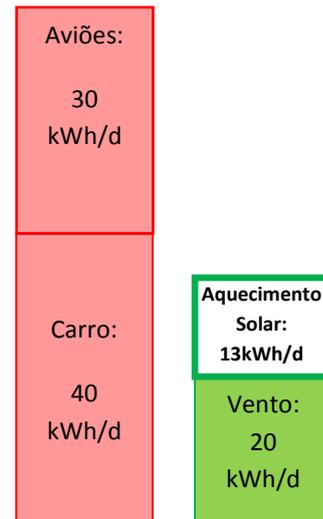


Figura 6.4. Solar térmica: uma ordem de 10 m² de painéis pode fornecer (em média) cerca de 13 kWh por dia de energia térmica.

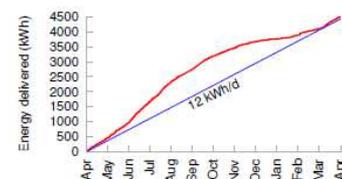


Figura 6.5. Solar fotovoltaica: dados das matrizes de 25 m² em Cambridgeshire em 2006. A potência de pico fornecida por essa matriz é cerca de 4 kW. A média, anual, é de 12 kWh por dia. Isto é 20 W por metro quadrado de painel.

movem vagarosamente; os espelhos focam a luz do sol nas unidades fotovoltaicas que fornecem eletricidade e água quente; a água quente é gerada através do bombeamento da água por detrás das unidades fotovoltaicas.

A conclusão até agora: cobrir os seus telhados voltados para o sul com placas fotovoltaicas pode fornecer energia o suficiente para cobrir uma boa parte do seu consumo médio pessoal de eletricidade; mas telhados não são grandes o suficiente para cobrir nosso consumo *total* de energia. Para fazer mais com FV, nós precisamos descer para terra firme. Os guerreiros do sol da figura 6.6 mostram como.



Figura 6.6. Dois guerreiros do sol aproveitando o seu sistema fotovoltaico, que alimenta seus carros elétricos e residência. A matriz de 120 painéis (300 W cada, 2,2 m² cada) possui uma área de 269 m², uma saída de pico (permitindo por perdas de conversão DC-AC) de 30,5 kW, e uma saída média – na Califórnia, perto de Santa Cruz – de 5 kW (19 W/m²). Foto amavelmente fornecida por Kenneth Adelman. www.solarwarrior.com

Hora de sonhar: parques solares

Se um grande avanço ou descoberta na tecnologia solar acontece e o custo dos painéis fotovoltaicos diminui o suficiente de modo que nós pudéssemos usar estes painéis por todo o país, qual é a produção máxima plausível? Bem, se nós cobríssemos 5% de todo o Reino Unido com painéis de 10% de eficiência, nós teríamos

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ por pessoa}$$

$$\sim 50 \text{ kWh por dia por pessoa}$$

Eu assumi apenas painéis 10% eficiente, por sinal, porque eu imagino que os painéis solares seriam produzidos em massa e produção em tamanha escala aconteceria apenas se eles fossem muito baratos, e são os painéis com menor eficiência que ficariam baratos primeiro.



Figura 6.7. Um parque solar fotovoltaico: o Solarpark de 6,3 MW (pico) em Mühlhausen, Bavaria. Sua potência média por unidade de área é esperada para ser cerca de 5 W/m². Foto de SunPower.

A densidade de potência (potência por unidade de área) de tal parque solar seria de

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2.$$

Esta densidade de potência é duas vezes aquela do Bavaria Solarpark (figura 6.7).

Poderia esta inundação de painéis solares coexistir com as turbinas eólicas imaginadas no capítulo 4? Sim, sem problemas: as turbinas eólicas fazem pouca sombra, e painéis solares no nível do chão possuem efeito desprezível no vento. Quão audacioso é este plano? A capacidade de potência solar necessária para fornecer estes 50 kWh por dia por pessoa no Reino Unido é mais do que 100 vezes todos os painéis fotovoltaicos no mundo. Então, eu deveria incluir os parques FV na minha pilha de produção? Eu estou dividido. No começo deste livro eu disse que eu queria explorar o que as leis da física dizem sobre os limites da energia sustentável, assumindo que o dinheiro não seja problema. Por este lado, eu deveria certamente seguir em frente, industrializar a zona rural, e empurrar os parques FV na pilha de produção. Ao mesmo tempo, eu quero ajudar as pessoas a descobrirem o que nós deveríamos estar fazendo *agora* e em 2050. Por agora, a eletricidade dos parques solares seria quatro vezes mais caro do que o valor de mercado. Então eu me sinto um pouco irresponsável por incluir esta estimativa na pilha da produção sustentável na figura 6.9 – pavimentar 5% de todo o Reino Unido com painéis solares parece além dos limites do plausível em diversas maneiras. Se nós seriamente considerarmos fazer tal coisa, seria provavelmente melhor colocar os painéis em um país mais ensolarado e mandar a energia para casa por linhas de transmissão. Nós voltaremos a esta ideia no Capítulo 25.

Mitos

Manufaturar um painel solar consome mais energia do que ele jamais fornecerá.

Falso. A **razão de energética** (a razão de energia fornecida por um sistema ao longo de sua vida útil, pela energia necessária para construí-lo) de um telhado montado, ligado à rede com sistema solar na Europa do Norte é **4**, para um sistema com vida-útil de 20 anos (Richards e Watt, 2007); e maior do que **7** em localidades mais ensolaradas como a Austrália. (Uma razão de energia maior do que um significa

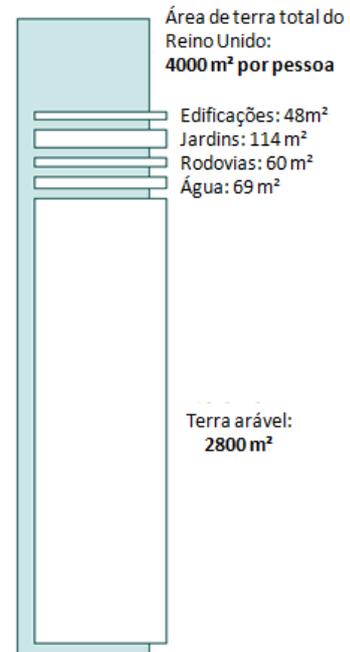


Figura 6.8. Áreas de terra por pessoa na Grã-Bretanha.

Turbinas eólicas com uma vida-útil de 20 anos possuem uma razão energética de 80.

Os painéis fotovoltaicos não ficarão cada vez mais eficientes no que a tecnologia for sendo melhorada?

Eu tenho certeza que os painéis fotovoltaicos ficarão ainda mais *baratos*; eu também tenho certeza que os painéis solares consumirão menos energia para *serem fabricados*, de modo que a sua razão energética melhorará. Mas as estimativas fotovoltaicas deste capítulo não foram constrangidas pelo custo econômico dos painéis, nem pelo custo energético de sua fabricação. Este capítulo se preocupou com a potência máxima plausível de ser fornecida. Painéis fotovoltaicos com 20% de eficiência já estão próximos do seu limite teórico (veja as notas finais deste capítulo). Eu ficarei surpreso se a estimativa de máximo esperado pela fotovoltaica feita neste capítulo algum dia precisar de uma revisão significativa.

Biomassa solar

De repente, você sabe, nós podemos estar comercializando energia apenas por cultivar grama no nosso sítio! E então tê-la colhida e convertida em energia. Isto é o que está quase para acontecer.

George W. Bush, Fevereiro de 2007.

Todas as soluções de bioenergia disponíveis envolvem, em primeiro lugar, o cultivo de coisas verdes, e depois em fazer algo com estas coisas verdes. Quão grande é a energia coletada pelas coisas verdes? Existem quatro caminhos principais para conseguir energia de sistemas biológicos alimentados pelo sol:

1. Nós podemos cultivar plantas especialmente escolhidas e queimá-las em uma estação de potência que produza eletricidade ou calor ou ambos. Nós chamaremos isto de “substituição do carvão”.
2. Nós podemos cultivar plantas especialmente escolhidas (colza, cana de açúcar, ou milho, mamona) e transformá-las em metanol ou biodiesel, e utilizar isto em carros, trens, aviões, ou outros locais onde tais produtos químicos sejam úteis. Ou nós talvez possamos cultivar bactérias

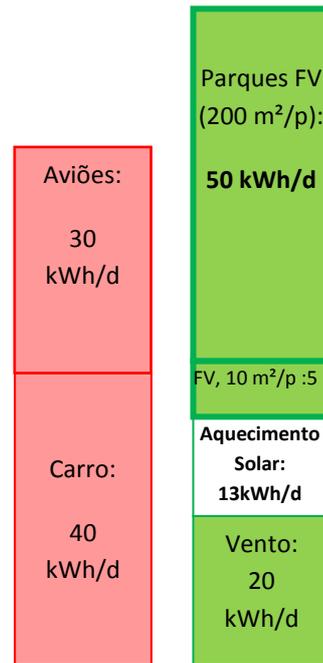


Figura 6.9. Solar Fotovoltaica: painéis da ordem de 10 m² montados em edificações voltadas para o sul com eficiência de 20% pode fornecer cerca de 5 kWh por dia de energia elétrica. Se 5% do país fosse equipado com painéis de 10% de eficiência (200 m² de painéis por pessoa) eles forneceriam 50 kWh/ dia/ pessoa.

geneticamente modificadas, cianobactérias, ou algas que produzam hidrogênio, etanol, ou butanol diretamente, ou até eletricidade. Nós chamaremos tais abordagens de “substituição do petróleo”.

3. Nós podemos pegar os subprodutos da agricultura e queimá-los em uma estação de potência. Os subprodutos podem variar de palha (um subproduto dos cereais integrais) a cocô de galinha (um subproduto de *nuggets* de frango). Queimar subprodutos é substituição de carvão novamente, mas utilizando apenas plantas normais, não as melhores plantas em termos energéticos. Uma estação de potência que queime subprodutos agrícolas não fornecerá tanta potência por unidade de área de fazenda quanto uma estação otimizada de cultivo de biomassa, mas ela tem a vantagem de que não monopoliza a terra. Queimar gás metano de aterros é uma forma similar de obter energia, mas ela apenas é sustentável desde que tenhamos fontes sustentáveis de lixo para continuar colocando nos aterros. (A maior parte do metano vem de comida desperdiçada; as pessoas na Grã-Bretanha jogam fora 300 g de comida por dia por pessoa.) Incinerar desperdícios domésticos é outra forma menos rodada de conseguir potência pela biomassa solar.
4. Nós podemos cultivar plantas e usá-las para alimentar diretamente humanos ou outros animais.

Para todos esses processos, o primeiro ponto de parada da energia é uma molécula como um hidrocarboneto de uma planta verde. Nós podemos então estimar a potencial alcançável de qualquer um e de todos estes processos ao estimar quanta potência poderia passar pelo primeiro ponto de parada. Todos os passos subsequentes envolvendo tratores, animais, indústrias químicas, aterros, ou estações de potência podem apenas consumir energia. Então a potência no primeiro posto de parada é o limite superior da potência disponível de todas as soluções de potência baseadas em plantas.

Então, vamos simplesmente estimar a potência no primeiro ponto de parada. (No Capítulo D, nós entraremos em mais detalhes, estimando a contribuição máxima de cada processo.) A potência média solar para cultivo agrícola, na Grã-Bretanha, é 100 W/m^2 . As plantas mais eficientes, na Europa, possuem uma eficiência de 2% ao transformar a energia do sol



Figura 6.10. Um pouco de grama *Miscanthus* aproveitando a companhia da Dra Emily Heaton, que mede 5'4" (163 cm) de altura. Na Grã-Bretanha, *Miscanthus* atinge uma potência por unidade de área de $0,75 \text{ W/m}^2$. Foto fornecida pela Universidade de Illinois.

em carboidratos, o que sugeriria que as plantas fornecem uma potência de 2 W/m^2 ; contudo, a eficiência delas cai a níveis maiores, e o melhor desempenho das colheitas na Europa é aproximadamente $0,5 \text{ W/m}^2$. Vamos cobrir 75% do país com matéria verde de qualidade. Isto são 3000 m^2 por pessoa dedicado a bioenergia. Isto é o mesmo do que a área de terra da Grã-Bretanha atualmente dedicada à agricultura.

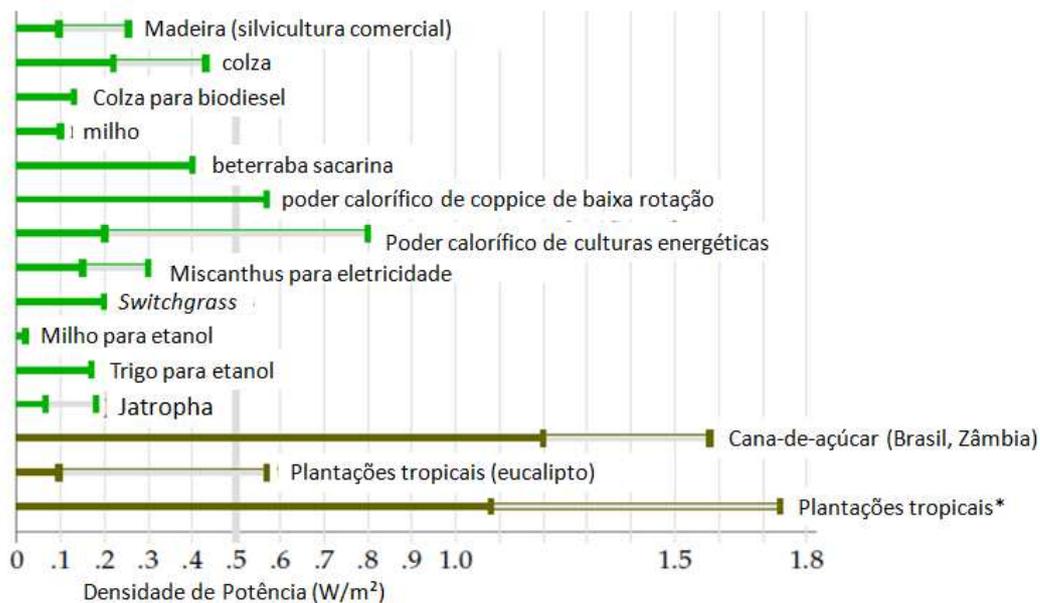


Figura 6.11. Produção de potência, por unidade de área, fornecida por várias plantas. Para fontes, veja as notas no final do capítulo. Estas densidades de potência variam dependendo da irrigação e fertilização; as ordens são indicadas para algumas culturas, por exemplo madeira possui uma ordem de $0,095\text{-}0,254 \text{ W/m}^2$. As últimas três densidades de potência são para culturas que crescem em localidades tropicais. A última densidade de potência (plantações tropicais*) assume modificação genética, aplicação de fertilizantes, e irrigação. No texto, eu utilizo $0,5 \text{ W/m}^2$ como uma forma de resumo para as melhores culturas em termos energéticos no noroeste Europeu.

Então, a maior potência disponível, ignorando todos os custos adicionais de cultivo, colheita, e processamento da matéria verde, é

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ por pessoa} = 36 \text{ kWh/d por pessoa.}$$

Uau! Isto não é muito, considerando a escandalosamente generosa pressuposição que nós acabamos de fazer, para tentar conseguir um número maior. Se você queria conseguir biocombustíveis para carros e aviões da matéria verde, todos os outros passos na cadeia entre a fazenda e a tomada da sua casa seriam inevitavelmente ineficientes. Eu acredito que seria otimista esperar que todas as perdas na cadeia de processos seja menor do que 33%. Até a queima de madeira seca em uma boa caldeira de madeira

perde 20% do calor pela chaminé. Então com certeza o potencial verdadeiro de potência da biomassa e biocombustíveis não pode ser maior do que **24 kWh/d por pessoa**. E não se esqueça, nós queremos usar parte da matéria verde para fazer comida para nós e para os animais.

A engenharia genética conseguiria produzir plantas que convertessem a energia solar em produtos químicos de forma mais eficiente? É possível; mas eu ainda não encontrei nenhuma publicação científica prevendo que as plantas na Europa consigam atingir potência líquida de produção acima de 1 W/m^2 .

Eu adicionarei 24 kWh/d por pessoa na pilha verde, enfatizando que eu acho que este número é superestimado – eu acredito que o verdadeiro máximo de potência que nós conseguiríamos obter com a biomassa seria menor por causa das perdas nas plantações e processamento.

Acredito que uma conclusão seja clara: *biocombustíveis não ajudam muito* – pelo menos, não em países como a Grã-Bretanha, e não como forma de substituir todos os combustíveis para transporte. Mesmo deixando de lado os principais defeitos dos biocombustíveis – que a sua produção compete com alimentação, e que as entradas adicionais requerem que a agricultura e processamento cancelem com frequência a maioria da energia fornecida (figura 6.14) – biocombustíveis feitos de plantas, em um país Europeu como a Grã-Bretanha, podem fornecer tão pouca potência, que eu acho que nem vale à pena falar neles.

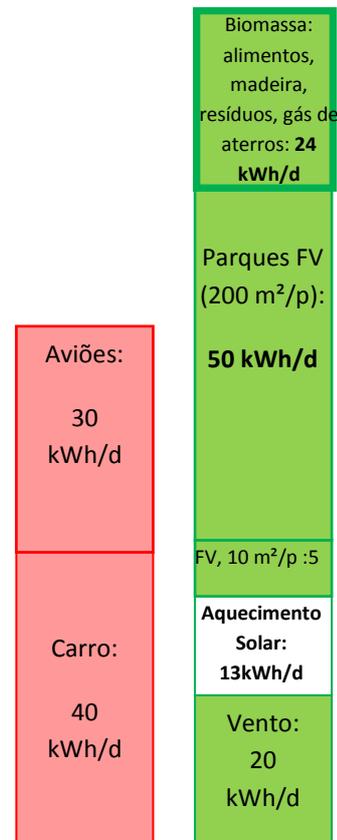


Figura 6.12. Biomassa solar, incluindo todas as formas de biocombustíveis, incineração de resíduos, e alimentação: 24 kWh/d por pessoa .

Observações e Leitura Complementar

N pg.

- 47 **compensar pela inclinação existente entre o sol e a terra.** A latitude de Cambridge é $\theta = 52^\circ$; a intensidade da luz do sol ao meio-dia é multiplicada pelo $\cos \theta \approx 0,6$. O fator de precisão depende do período do ano, e variáveis entre $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ e $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.
- **Em uma localidade típica do Reino Unido o sol brilha por apenas um terço das horas diárias.** As Terras Altas recebem 1100 h de luz solar por ano – uma recepção solar de 25%. Os melhores locais na Escócia recebem 1400 h por ano – 32%. Cambridge: 1500 ± 130 h por ano – 34%. Costa sul da Inglaterra (a parte mais ensolarada do Reino Unido): 1700 h por ano – 39%. [2rqloc] Informações sobre Cambridge do [2szckw]. Veja também a figura 6.16.

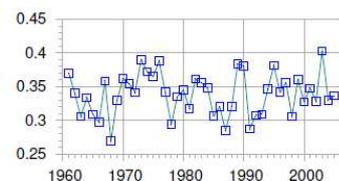


Figura 6.13. O mais ensolarado de Cambridge: o número de horas de incidência de raios solares por ano, expresso como uma fração do número total de horas de iluminação diária.

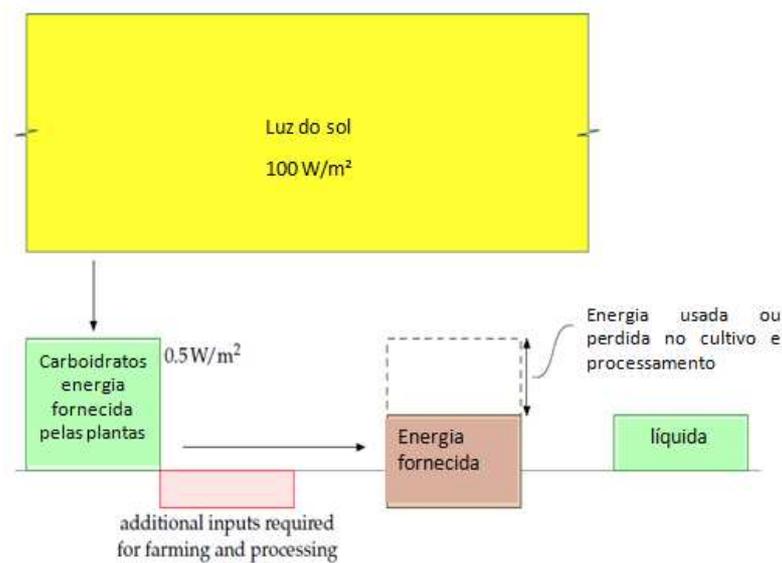


Figura 6.14. Esta imagem ilustra as questões quantitativas que devem ser perguntadas para qualquer biocombustível proposto. Quais são os gastos de energia adicionais necessários para cultivo e processamento? Qual é a energia fornecida? Qual é a produção de energia líquida? Geralmente os gastos adicionais e perdas acabam com a maioria da energia fornecida pelas plantas.

47 A potência média bruta da luz do sol por metro quadrado de telhados orientados para o sul na Grã-Bretanha é aproximadamente 110 W/m^2 , e a potência média bruta da luz solar por metro quadrado de terreno plano é aproximadamente 100 W/m^2 . Fonte: NASA "Surface meteorology and Solar Energy" [5hrxls]. Surpreso que haja tão pouca diferença entre um telhado inclinado e um terreno plano? Eu fiquei surpreso. A diferença realmente é 10% [6z9epq].

48 Isto seria cerca de 10 m^2 de painéis por pessoa. Eu estimei a área de telhados voltados para o sul por pessoa pegando a área de terra coberta por edificações por pessoa (48 m^2 na Inglaterra – tabela I.6), multiplicando por $\frac{1}{4}$ para conseguir a fração orientada para o sul e então aumentei a área em 40% para permitir a inclinação dos telhados. Isto nos dá 16 m^2 por pessoa. Painéis geralmente vêm em retângulos inconvenientes de modo que alguma fração do telhado não será coberta: sobrando 10 m^2 de painéis.

- A potência média fornecida por painéis fotovoltaicos...Existe um mito por aí de que os painéis solares produzem quase tanta potência em dias nublados quanto em dias ensolarados. Isto simplesmente não é verdade. Em um dia claro mas nublado, painéis fotovoltaicos e plantas continuam a converter alguma energia, mas muito menos: a produção fotovoltaica cai aproximadamente dez vezes quando o sol se esconde por trás das nuvens (porque a intensidade da luz solar incidente cai dez vezes). Como a figura 6.15 mostra, a potência fornecida por painéis fotovoltaicos é quase exatamente proporcional à intensidade da luz solar – pelo menos, se os painéis estão a 25°C . Para complicar a situação, a potência fornecida depende da temperatura também – painéis mais quentes têm uma potência reduzida (geralmente 0,38% de perda de

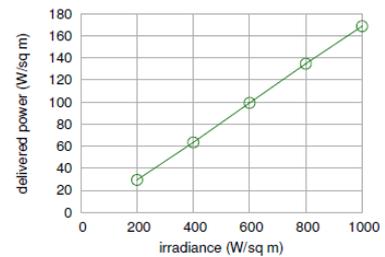


Figura 6.15. Potência produzida pelo módulo Sanyo HIP-210NKHE1 como função da intensidade da luz (à 25°C , assumindo uma voltagem de saída de 40V). Fonte: datasheet, www.sanyo-solar.eu.

potência por °C) – mas se você checar dados de painéis reais, como no www.solarwarrior.com, você pode confirmar o ponto principal: a potência fornecida em um dia nublado é *muito menor* do que em um dia ensolarado. Este ponto é ofuscado por promotores dos painéis solares que discutem como a “eficiência” varia com a luz solar. “Os painéis são mais eficientes em dias nublados”, eles dizem; isto pode ser verdade, mas a eficiência não deve ser confundida com a potência fornecida.

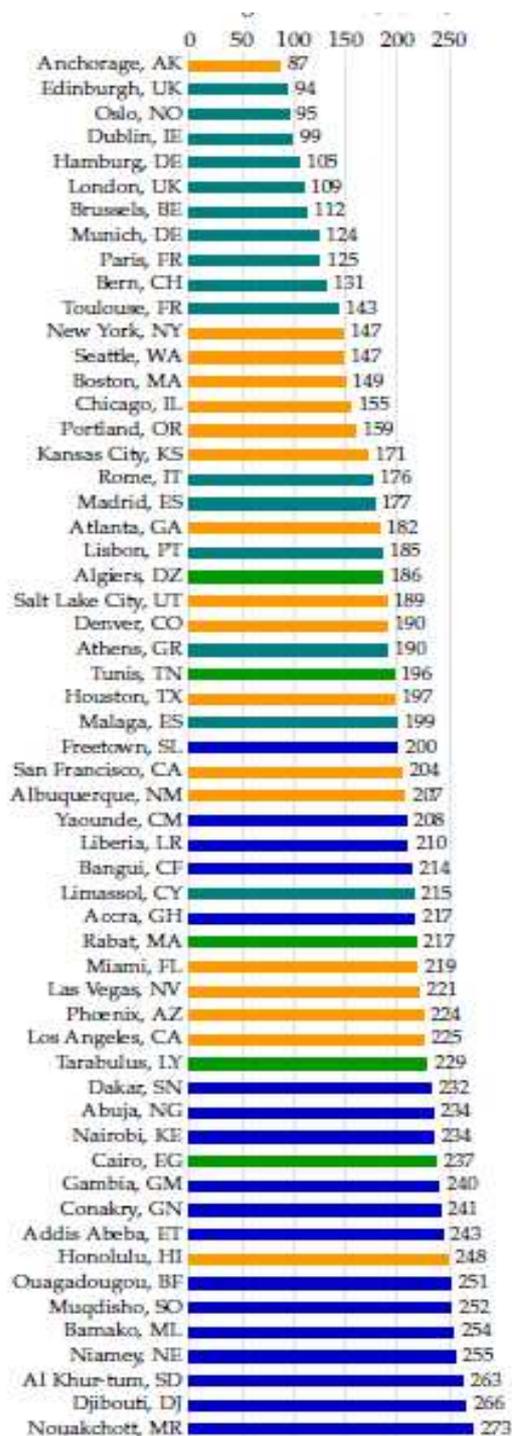


Figura 6.16. Potência média de luz solar incidindo sobre uma superfície horizontal em localidades selecionadas na Europa, América do Norte e África.



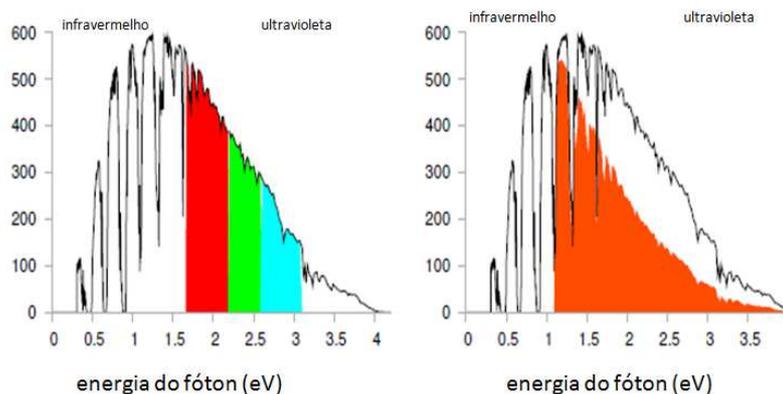


Figura 6.17. Parte da explicação de Shockley e Queisser para o limite de 31% da eficiência de simples fotovoltaicos.

Esquerda: o espectro da luz do sol ao meio-dia. O eixo vertical mostra a densidade de potência em W/m^2 por eV de intervalo no espectro. A parte visível no espectro é indicada pela seção colorida.

Direita: a energia capturada por um equipamento fotovoltaico com apenas uma banda em 1.1 eV é mostrado na área cor de tomate. Fótons com nível de energia menor do que o da banda de energia são perdidos; por exemplo, metade da energia de cada fóton de 2,2 eV é perdida.

Mais perdas são inevitáveis por causa da inevitável radiação da recombinação de cargas no material fotovoltaico.

49 Típicos painéis solares possuem uma eficiência de 10%; os painéis mais caros trabalham a 20%. Veja a figura 6.18. Fontes: Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.

- Um equipamento com eficiência maior do que 30% seria sensacional. Esta é uma citação de de Hopfield e Gollub (1978), que estavam escrevendo sobre painéis sem espelhos de concentração ou lentes. O limite teórico para uma painel solar “junção-única” sem concentradores, o limite Shockley-Queisser, diz que no máximo 31% da luz solar pode ser convertida em eletricidade (Shockley e Queisser, 1961). (A razão principal para este limite é que o material solar padrão possui uma propriedade chamada de sua banda de energia, que define a energia particular em um fóton que aquele material converte mais eficientemente. A luz do sol contém fótons com muitas energias; fótons com energia *abaixo* da banda de energia não são utilizados de forma alguma; fótons com energia *maior* do que a da banda podem ser capturados, mas todo o seu excesso de energia com relação à banda é perdido. Concentradores (espelhos ou lentes) podem ambos reduzir o custo (por watt) de sistemas fotovoltaicos, e aumentar sua eficiência. O único modo de superar o limite Shockley-Queisser é fazer equipamentos fotovoltaicos mais caros que dividam a luz em diferentes comprimentos de onda, processando cada comprimento com a sua banda de energia personalizada. Recentemente fotovoltaicos de multiplas-junções com concentradores ópticos reportaram uma eficiência de cerca de 40%. [2t17t6], www.spectrolab.com. Em julho de 2007, a Universidade de Delaware reportou uma eficiência de 42,8% com concentradores de 20 vezes [6hobq2], [21sx6t]. Em agosto de 2008, a NREL reportou uma eficiência de 40,8% com concentração de 326 vezes [62ccou]. Estranhamente, ambos estes resultados foram chamados de recordes de eficiência mundial. Quais equipamentos de múltiplas-juntas estão disponíveis no mercado? A Uni-solar vende um painel

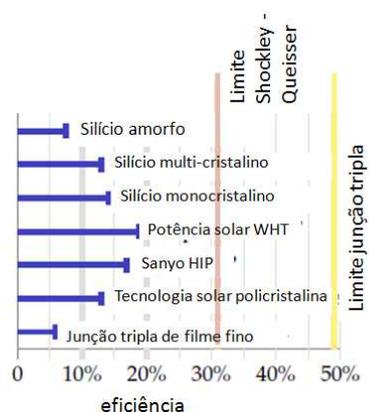


Figura 6.18. Eficiências de módulos fotovoltaicos disponíveis para compra atualmente. No texto eu pressuponho que os melhores fotovoltaicos nos telhados possuem uma eficiência de 20%, e que a cobertura fotovoltaica do país seria de 10% de eficiência. Em uma localidade onde a densidade de potência média da luz solar incidente é $100 W/m^2$, painéis 20% eficiente fornecem $20 w/m^2$.

de filme-fino de junção-tripla com 58W (pico) com uma área de 1 m². Isto implica uma eficiência, com plena luz solar, de apenas 5,8%.

49 **Figura 6.5: dados da Solar PV.** Dados e fotografia gentilmente fornecidos por Jonathan Kimmitt.

- **Heliodynamics** – www.hdsolar.com. Veja a figura 6.19. Um sistema similar é feito por Arontis www.arontis.se.

50 **O Solarpark em Mühlhausen, Bavaria.** Em média este parque de 25 hectares deve fornecer 0,7 MW (17 000 kWh por dia).

A estação de metrô da Stillwell Avenue em Nova York possui fotovoltaicos integrados de silício amorfo de filme-fino no seu telhado dossel, fornecendo 4 W/m² (Fies et al., 2007).

A usina solar Nellis, em Nevada, foi terminada em dezembro de 2007, possuindo 140 acres, e espera-se que ela gere 30 GWh por ano. Isto é 6 W/m² [5hzs5y].

A Usina Solar Serpa, Portugal (PV), “a usina solar mais potente do mundo”, [39z5m5] [2uk8q8] possui painéis de controle solar ocupando 60 hectares, isto é, 600 000 m² ou 0,6 km², devendo gerar 20 GWh por ano, ou seja, 23 MW na média. Isto é, em potência por unidade de área, 3,8 W/m².

51 **A capacidade de potência solar necessária para fornecer estes 50 kWh por dia por pessoa no Reino Unido é mais do que 100 vezes todos os painéis fotovoltaicos no mundo.** Para fornecer 50 kWh/d por pessoa no Reino Unido necessitaria 125 GW de potência média, o que requer 1250 GW de capacidade. No final de 2007, a potência fotovoltaica instalada no mundo somou 10 GW de pico; a taxa de aumento é de aproximadamente 2 GW por ano.

53 **As pessoas na Grã-Bretanha jogam fora 300 g de comida por dia.** Fonte: Ventour (2008).

- **Figura 6.10.** Nos Estados Unidos, *Miscanthus* cultivados sem fertilizantes nitrogenados crescem cerca de 24 t/ha/y de matéria seca. Na Grã Bretanha, crescimentos de 12-16 t/ha/y são divulgados. *Miscanthus* seco possui um valor calorífico líquido de 17 MJ/kg, então o cultivo britânico corresponde a uma densidade de potência de 0,75 W/m² Fontes: Heaton et al. (2004) e [6kq77]. O cultivo estimado é obtido apenas após três anos de crescimento imperturbável.

- **As plantas mais eficientes, na Europa, possuem uma eficiência de 2%, contudo o melhor desempenho delas é de 0,5 W/m².** Com baixas intensidades de luz, as melhores plantas britânicas possuem uma eficiência de 2,4% em campos bem fertilizados (Monteith, 1977) mas com maiores intensidades de iluminação, suas eficiências de conversão caem. Segundo Turkengurg (2000) e Shiermeier et al. (2008), a eficiência de conversão da energia de biomassa solar é menor do que 1%.

Aqui estão algumas fontes para reforçarem a minha estimativa de 0,5 W/m² para potência vegetal no Reino



Figura 6.19. Uma unidade fotovoltaica que combina calor e potência da Heliodynamic. Um refletor com área de 32 m² (um pouco maior do que o lado de um ônibus de dois andares) fornece até 10 kW de calor e 1,5 kW de potência elétrica. Em um país ensolarado, um destes equipamentos de uma tonelada poderia fornecer cerca de 60 kWh/d de calor e 9 kWh/d de eletricidade. Estas potências correspondem aos fluxos médios de 80W/m² de calor e 12 W/m² de eletricidade (isto é por metro quadrado de superfície do equipamento); estes fluxos são similares são fluxos fornecidos por painéis de aquecimento solar padrões e painéis fotovoltaicos, mas o design de concentração da Heliodynamic fornece uma potência a um custo reduzido, porque a maior parte do material é simplesmente vidro plano. Por comparação, o consumo total médio de potência na Europa por pessoa é 125 kWh/d.

Unido. A estimativa da *Royal Commission of Environmental Pollution* do potencial de densidade de potência fornecida pelas plantões destinadas à produção de energia na Grã-Bretanha é de $0,2 \text{ W/m}^2$ (Royal Commission of Environment, 2004). Na página 43 do documento sobre biocombustíveis da Royal Society (grupo de trabalho da Royal Society em biocombustíveis, 2008), a *Miscanthus* está no topo da lista, fornecendo cerca de $0,8 \text{ W/m}^2$ de potência química.

No *World Energy Assessment* publicado pelo UNDP (United Nations Development Programme), Rogner (2000) escreveu: “Assumindo uma eficiência de conversão de 45% para eletricidade e rendimentos de 15 toneladas de forno seco por hectare por ano, 2 km^2 de plantação seriam necessários por megawatt de eletricidade de capacidade instalada funcionando 4 000 horas por ano.” Isto é uma potência por unidade de área de $0,23 \text{ W(e)/m}^2$. (1 W(e) significa 1 watt de potência elétrica.)

Energy for Sustainable Development Ltd (2003) estima que espécies de curta rotação podem fornecer mais do que 10 toneladas de madeira seca por hectare por ano, o que corresponde a uma densidade de potência de $0,57 \text{ W/m}^2$. (Madeira seca possui um poder calorífico de 5 kWh por kg.)

Segundo Archer e Barber (2004), a eficiência instantânea de uma folha saudável em condições ótimas pode chegar a 5%, mas a eficiência do armazenamento de energia a longo prazo das plantações modernas é de 0,5-1%. Archer e Barber sugerem que através da modificação genética poderia ser possível aumentar a eficiência armazenada de plantas, especialmente plantas C4, que já evoluíram naturalmente sua eficiência fotossintética. Plantas C4 são encontradas principalmente nos trópicos e prosperam a altas temperaturas; elas não crescem em temperaturas abaixo de 10°C . Alguns exemplos de plantas C4 são cana de açúcar, milho, sorgo, milho miúdo. Zhu et al. (2008) calculou que o limite teórico para a eficiência da conversão da energia solar para biomassa é 4,6% para fotossínteses C3 à 30°C e as concentrações atuais de CO_2 na atmosfera de 380 ppm, e 6% para fotossínteses C4. Eles dizem que as maiores eficiências de conversão de energia solar para cultivos C3 e C4 são reportadas em 2,4% e 3,7% respectivamente; e, citando Boyer (1982), que a média das eficiências de conversão dos maiores cultivos nos Estados Unidos são 3 ou 4 vezes menores do que estas eficiências recordes (o que é cerca de 1%). Uma razão pela qual as plantas não atingem o limite teórico é que a capacidade delas de absorver toda a radiação incidente do sol é insuficiente. Ambos os documentos (Zhu et al. 2008; Boyer, 1982) discutem perspectivas para a engenharia genética conseguir plantas mais eficientes.

54 **Figura 6.11.** Os números nesta figura foram desenhados por Rogner (2000) (energia líquida contida na madeira, cana de

açúcar, canola e plantações tropicais); Bayer Crop Science (2003) (canola para biodiesel); Francis et al. (2005) e Asselbergs et al. (2006) (pinhão); Mabee et al. (2006) (cana-de-açúcar, Brasil); Schmer et al. (2008) (grama alta, nos Estados Unidos); Shapouri et al. (1995) (milho para etanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); grupo de trabalho em biocombustíveis da Royal Society (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer e Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).

- 54 Até a queima de madeira seca em uma boa caldeira de madeira perde 20% do calor pela chaminé. Fontes: grupo de trabalho em biocombustíveis da Royal Society (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7. Aquecimento e Refrigeração

Este capítulo explora quanta potência nós consumimos controlando a temperatura dos nossos arredores – em casa e no trabalho – e no aquecimento e refrigeração dos nossos alimentos, bebidas, e louça suja.

Aquecimento doméstico de água

O maior uso de água quente em uma casa pode ser para banhos em banheiras, duchas, lavagem de louça ou lavagem de roupas – isto vai depender do seu estilo de vida. Vamos estimar primeiro a energia usada para tomar um banho quente. O volume de água para o banho é 50 cm x 15 cm x 150 cm \approx 110 litros. Digamos que a temperatura do banho seja 50°C (120 F) e que a água entrando na casa esteja a 10°C. O calor específico da água, que mede quanta energia é necessária para aquecê-la, é 4200 J por litro por °C. Então a energia necessária para aquecer a água em 40°C é

$$4200 \text{ J/litro } ^\circ\text{C} \times 110 \text{ litros} \times 40^\circ\text{C} \approx 18 \text{ MJ} \approx 5\text{kWh.}$$

Então tomar um banho de banheira consome cerca de **5 kWh**. Por comparação, tomar uma ducha (30 litros) consome cerca de **1,4 kWh**.

Chaleiras e panelas

A Grã-Bretanha, sendo um país civilizado possui um fornecimento de eletricidade doméstica de 230 volts. Com este fornecimento, nós podemos utilizar uma chaleira elétrica para ferver vários litros de água em alguns minutos. Tais chaleiras possuem uma potência de 3 kW. Por que 3 kW? Porque esta é a maior potência de saída que um equipamento de 230 volts pode fornecer sem que a corrente exceda o máximo permitido, 13 ampéres. Em países onde a voltagem é de 110 volts, leva o dobro do tempo para fazer uma xícara de café.

Se uma casa fica com uma chaleira ligada por 20 minutos por dia, tem-se uma média de potência consumida de 1 kWh por dia. (Eu trabalharei os próximos itens “por casa”, contando 2 pessoas por casa). Uma pequena boca em um fogão elétrico possui a mesma potência do que uma torradeira: 1 kW. Nos pratos de maior potência dos fogões elétricos a potência fornecida é de 2,3 kW. Se você utiliza duas



Figura 7.1. Um conjunto de casas novas.

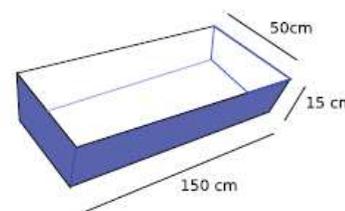


Figura 7.2. A água em um banho de banheira.

$$230 \text{ V} \times 13 \text{ A} = 3000 \text{ W}$$

Micro-ondas:
1400 W pico

Refrigerador–
freezer:
100 W pico,
18 W média



Figura 7.3. Consumo de potência de um equipamento de aquecimento e outro de refrigeração.

bocas do fogão elétrico na potência total por meia hora por dia, isto corresponde a **1,6 kWh por dia**.

Um forno de microondas geralmente possui sua potência de cozimento marcada na frente: o meu diz 900 W, mas ele na verdade consome cerca de 1,4 kW. Se você utiliza o microondas por 20 minutos por dia, isto significa **0,5 kWh por dia**.

Um forno normal consome mais: cerca de 3 kW quando na sua potência máxima. Se você utilizar o forno por 1 hora por dia, e o forno estiver ligado na sua potência máxima por metade deste tempo, isto significa **1,5 kWh por dia**.

Aparelho	potência	tempo por dia	energia por dia
Cozinha			
- chaleira	3 kW	1/3 h	1 kWh/d
- micro-ondas	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
- fogão elétrico (anéis)	3,3 kW	½ h	1,6 kWh/d
- fogão elétrico	3 kW	½ h	1,5 kWh/d
Limpeza			
- máquina de lavar roupa	2,5 kW		1 kWh/d
- secadora de roupa	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/d
- varal para secar roupa			0,5 kWh/d
- varal de corda			0 kWh/d
- máquina de lavar louça	2,5 kW		1,5 kWh/d
Refrigeração			
- refrigerador	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
- freezer	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/d
- ar condicionado	0,6 kW	1h	0,6 kWh/d

Figura 7.4. Consumo energético para equipamentos de aquecimento e refrigeração, por casa.

Lavagem quente de roupas e louça

Uma máquina de lavar roupas, uma máquina de lavar louças, e uma secadora usam uma potência de cerca de 2,5 kW quando em funcionamento.

Uma lava-roupas utiliza cerca de 80 litros de água por carga, com um custo energético de cerca de 1 kWh se a temperatura estiver ajustada para 40 °C. Se utilizarmos um varal dentro de casa ao invés de uma secadora para secar as roupas, calor ainda é necessário para evaporar a água – aproximadamente 1,5 kWh para secar uma carga de roupas, ao invés de 3 kWh.

Somando as estimativas relacionadas à água quente, eu acho que é fácil consumir cerca de **12 kWh por dia por pessoa**.

Aquecimento de ambientes – em casa e no trabalho

Água quente: **12 kWh/d**

Figura 7.5. A água quente total tanto em casa quanto no trabalho – incluindo banhos de banheira, duchas, lavagem de roupas, panelas elétricas, chaleiras, fornos de microondas, e lavagem de louças – é cerca de 12 kWh por dia por pessoa. Eu dei uma cor mais clara para esta caixa, para indicar que esta potência poderia ser fornecida por energia térmica de baixo nível.

Agora, se consome mais potência ao aquecer água e alimentos, ou ao aquecer o ar através dos radiadores das nossas edificações?

Um modo de estimar a energia consumida por dia para o aquecimento do ar é imaginar uma edificação aquecida por aquecedores elétricos, cujas potências são mais conhecidas por nós. A potência de uma pequena barra de aquecimento elétrico ou de um ventilador aquecedor elétrico é 1 kW (24 kWh por dia). No inverno, você pode precisar um destes por pessoa para manter o ambiente agradável. No verão, nenhum. Então nós estimamos que em média uma pessoa moderna *precise* consumir 12 kWh por dia com o aquecimento de ambientes. Porém a maioria das pessoas utiliza mais do que precisa, mantendo mais de um cômodo quente simultaneamente (cozinhas, sala de estar, corredor, e banheiros, por assim dizer). Então uma imagem de consumo plausível para o ar quente é cerca do dobro disto: **24 kWh por dia por pessoa**.

O capítulo de acompanhamento para este, o Capítulo E, contém uma contabilização mais detalhada de onde o calor está indo em uma edificação; este modelo torna possível prever as economias de calor ao diminuir a temperatura do termostato, dobrar o isolamento das janelas, e assim por diante.

Aquecendo o ambiente externo, e outros luxos

Há uma tendência crescente de aquecer os ambientes externos com aquecedores externos. Típicos aquecedores externos possuem uma potência de 15 kW. Então se você utilizar um destes por umas duas horas todos os inícios de noite, você está consumindo um extra de **30 kWh por dia**.

Um luxo um pouco mais modesto é o cobertor elétrico. Um cobertor elétrico para uma cama de casal consome 140 W; ligá-lo por uma hora consome **0,14 kWh**.

Refrigeração

Geladeira e Freezer

Nós controlamos as temperaturas não apenas da água e do ar quentes com os quais nos envolvemos, mas também dos armários refrigerados que enfiamos em nossas casas aquecidas.



Figura 7.6. Um grande aquecedor elétrico: 2kW.

Aquecimento
de
ambientes:
24 kWh/d

Figura 7.7. Total em aquecimento de ambientes – incluindo aquecimento doméstico e no local de trabalho – cerca de 24 kWh por dia por pessoa.

A minha geladeira com freezer, na foto 7.3, consome 18 W na média – isto é aproximadamente 0,5 kWh/d.

Ar-condicionado

Em países onde a temperatura chega a acima de 30°C, o ar-condicionado é visto como uma necessidade, e o custo energético do fornecimento do controle de temperatura pode ser alto. Contudo, esta parte do livro é sobre o consumo energético da Grã-Bretanha, e as temperaturas britânicas fornecem pouca necessidade para o uso de equipamentos de ar-condicionado (figura 7.8)

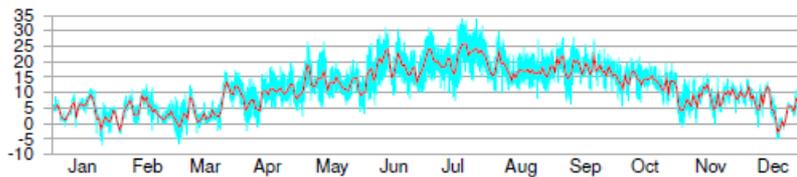


Figura 7.8. A temperatura, em graus Celsius, em Cambridge, diária (linha vermelha) e a cada meia hora (linha azul) no ano de 2006.

Uma forma econômica de conseguir ar-condicionado é uma bomba de calor com fonte de ar. Uma unidade de ar-condicionado de janela para uma única sala consome 0,6 kW de eletricidade e (por troca de calor) fornece 2,6 kW de refrigeração. Para estimar quanta energia uma pessoa pode consumir no Reino Unido, eu presumi que as pessoas podem ligar tal equipamento de ar-condicionado por 12 horas por dia por 30 dias por ano. Nos dias em que está ligado, o ar-condicionado consome 7,2 kWh. O consumo médio ao longo do ano todo é **0,6 kWh/d**.

Refrigeração: **1 kWh/d**.



Figura 7.9. Total de refrigeração, incluindo um refrigerador (geladeira/freezer) e um pequeno ar-condicionado para o verão – 1 kWh/d.

Este capítulo estima o custo energético para refrigeração – 1 kWh/d por pessoa – incluindo seu ar-condicionado e um refrigerador doméstico. A sociedade também refrigera alimentos no seu caminho para o campo para a cesta de compras no mercado. Eu estimei o custo de potência na cadeia de alimentação mais tarde, no Capítulo 15.

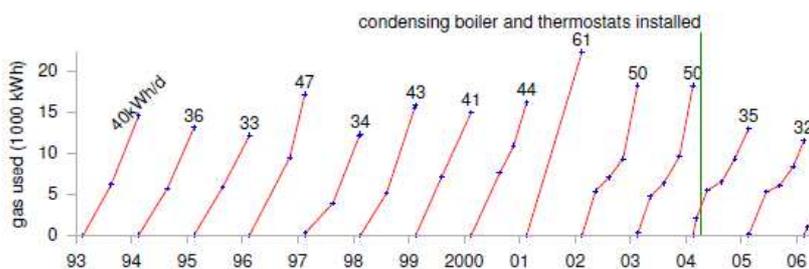


Figura 7.10. O meu consumo acumulado de gás, em kWh, em cada ano de 1993 a 2005. O número no topo de cada linha de ano é a taxa média de consumo de energia. Para descobrir o que aconteceu em 2007, continue lendo!

Aquecimento e Refrigeração Totais

Nossa aproximada estimativa da energia total que uma pessoa pode consumir com aquecimento e refrigeração, incluindo a casa, local de trabalho, e ao cozinhar, é **37 kWh/d por pessoa** (12 para água quente, 24 para ar quente e 1 para refrigeração).

A evidência é que esta estimativa está do lado correto, ou talvez um pouco abaixo do correto, uma vez que vem do meu próprio consumo doméstico de gás, que por 12 anos teve como média 40 kWh por dia (figura 7.10). quando calculei isto eu acreditei que eu fosse um usuário bastante frugal de aquecimento, mas eu não estava me atentando à minha atual potência de consumo. O Capítulo 21 revelará quanta potência eu economizei uma vez que eu comecei a prestar atenção.

Uma vez que aquecimento é um grande item na nossa pilha de consumo, vamos comparar a minha estimativa com algumas estatísticas nacionais. Nacionalmente, a média de consumo *doméstico* para aquecimento de ambientes, água, e para cozinhar, no ano 2000 foi de 21 kWh por dia por pessoa, e o consumo no *setor de serviço* para aquecimento, refrigeração, provimento de serviços e água quente foi 8,5 kWh/d/p. Para uma estimativa do aquecimento no ambiente de trabalho, vamos pegar o consumo de gás da Universidade de Cambridge em 2006-7: 16 kWh/d por funcionário.

Somando-se estes três números, um segundo palpite para o consumo nacional com aquecimento seria $21 + 8,5 + 16 \approx 45$ kWh/d por pessoa, se a Universidade de Cambridge for um local de trabalho normal. Ótimo, isto é tranquilizadamente próximo da nossa estimativa de 37 kWh/d.

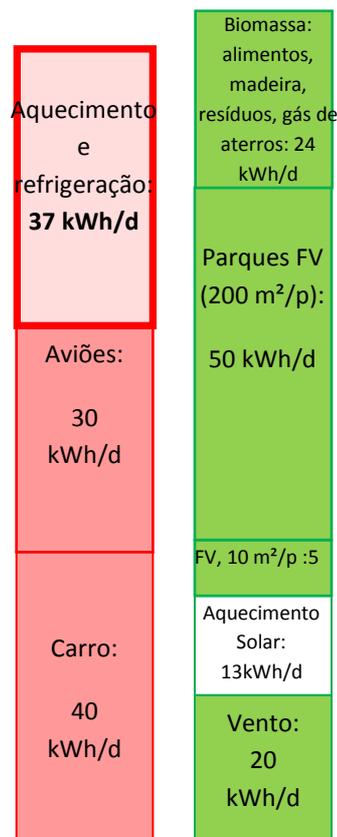


Figura 7.11. Aquecimento e refrigeração – cerca de 37 unidades por dia por pessoa. Eu deixei a figura mais clara pra mostrar que ela representa potência que poderia ser fornecida por energia térmica de baixo-nível.

Observações e Leitura Complementar

N pg

63 Um forno consome 3 kW. Obviamente existe uma gama de potências. Muitos fornos possuem uma potência máxima de 1,8 kW ou 2,2 kW. Fornos top-de-linha consomem até 6 kW. Por exemplo, o Whirlpool AGB 487/WP 4 Hotplate Electric Oven Range possuem um forno de 5,9 kW, e quatro bocas de 2,3 kW.

www.kcmltd.com/electric_oven_ranges.shtml

www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html

63 O varal dentro de casa requer aproximadamente 1,5 kWh para secar uma carga de roupas. Eu cheguei a esta conclusão

pesando as minhas roupas sujas: uma carga de roupas, 4 kg quando secas, saíram da minha máquina de lavar roupas pesando 2,2 kg a mais (mesmo após uma boa centrifugada da máquina). O calor latente de vaporização da água a 15°C é aproximadamente 2500 kJ/kg. Para obter a figura diária na tabela 7.4 eu considerei que uma pessoa possui uma carga de roupas a cada três dias, e que isto suga valioso calor da casa durante a metade fria do ano. (No verão, utilizar o varal fornece um pouco de potência do ar-condicionado, uma vez que a evaporação da água resfria o ar dentro e casa.)

66 Nacionalmente, a média de consumo *doméstico* para aquecimento de ambientes, água, e para cozinhar, no ano 2000 foi de 21 kWh por dia por pessoa, e o consumo no *setor de serviço* para aquecimento, refrigeração, oferecimento de serviços e água quente foi 8,5 kWh/d/p. Fonte: Departamento de Comércio e Indústria (2002a).

- Em 2006-7 o consumo de gás da Universidade de Cambridge foi 16 kWh/d por funcionário. O consumo de gás e óleo da Universidade de Cambridge (sem incluir as Faculdades) foi 76 GWh em 2006-7. Eu considerei a Universidade como o local de trabalho de 13 300 pessoas (8602 administrativos e 4667 pesquisadores de pós-graduação). Seu consumo elétrico, incidentalmente, foi 99,5 GWh. Fonte: relatório de utilitários da Universidade.

8 Hidroeletricidade

Para fazer potência hidroelétrica, você precisa de altitude, e você precisa de chuvas. Vamos estimar a energia total de todas as chuvas assim que elas chegam ao nível do mar.

Para esta previsão de chuvas, eu dividirei a Grã-Bretanha em duas: a parte mais baixa e seca, que eu chamarei de “terras baixas”; e a alta mais úmida, que eu chamarei de “terras altas”. Eu escolherei Bedford e Kinlochewe como as minhas representantes destas duas regiões.

Vamos trabalhar com as terras baixas primeiro. Para estimar a potência gravitacional de chuvas nas terras baixas, nós multiplicamos a chuva em Bedford (584 mm por ano) pela densidade da água (1000 kg/m^3), pela aceleração da gravidade (10 m/s^2) e pela altura típica dessa região em relação ao mar (digamos 100 m). A potência por unidade de área acaba sendo $0,02 \text{ W/m}^2$. Esta é a potência por unidade de terra na qual a chuva cai.

Quando nós multiplicamos esta área por pessoa (2700 m^2 , se as terras baixas forem igualmente divididas entre todos os 60 milhões de britânicos), nós encontramos uma média de potência bruta de cerca de 1 kWh por dia por pessoa. Este é o limite superior absoluto para a potência hidroelétrica das terras baixas, se cada rio fosse represado e cada gota fosse perfeitamente explorada. Realisticamente, nós apenas represaremos rios com alturas de queda substanciais, com áreas de captação muito menores do que o país inteiro. Muita da água evapora antes de chegar sequer perto da turbina, e nenhum sistema hidroelétrico explora a energia potencial completa da água. Então nós chegamos a uma firme conclusão sobre a potência da água das terras baixas. As pessoas podem querer fazer "hidroelétricas de passagem" e outros esquemas hidroelétricos pequenos, mas instalações em terras baixas nunca conseguirão fornecer mais do que 1 kWh por dia por pessoa.



Figura 8.1.Represa Nant-y-Moch, parte de uma instalação hidroelétrica de 55 MW no País de Gales. Foto de Dave Newbould, www.origins-photography.co.uk



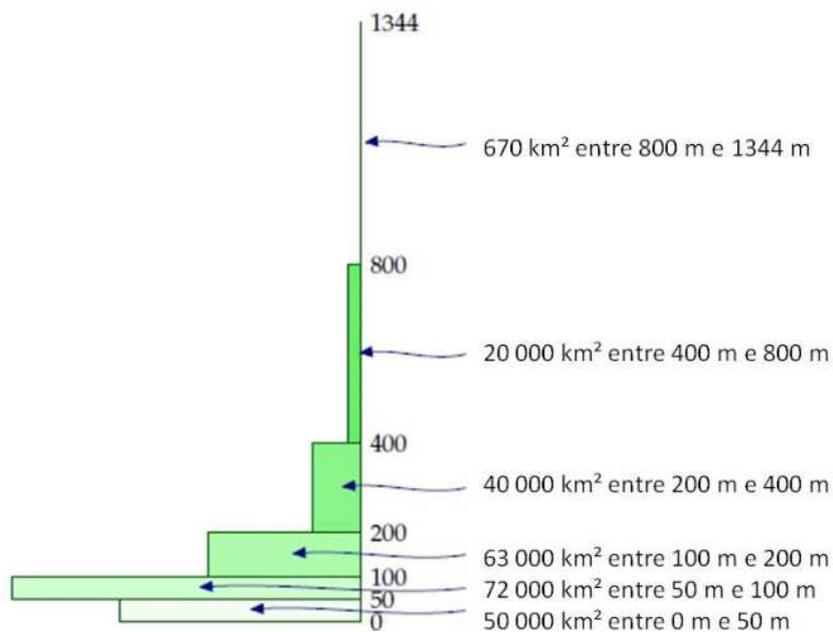


Figura 8.2. Altitudes de terra na Grã-Bretanha. Os retângulos mostram quanta área de terra há a cada altura.

Agora vamos nos focar nas terras altas. Kinlonchewe é um local mais chuvoso: ele recebe 2278 mm por ano, quatro vezes a mais do que Bedford. As alturas de queda de água lá são maiores também – áreas maiores de terra estão acima de 300 m do nível do mar. Então, no geral, um aumento de doze vezes na potência por metro quadrado é plausível para regiões montanhosas. A potência bruta por unidade de área é aproximadamente $0,24 \text{ W/m}^2$. Se as terras altas generosamente dividirem sua potência hídrica com o resto do Reino Unido (à 1300 m^2 de área por pessoa), nós encontramos um limite superior de cerca de 7 kWh por dia por pessoa. Assim como nas terras baixas, este é o limite superior da potência bruta se a evaporação fosse desconsiderada e toda gota de chuva fosse aproveitada com perfeição.

O que nós deveríamos estimar é o limite limite prático plausível? Vamos considerar que seja 20% disto – 1,4 kWh por dia, e arredondar para cima um pouco para permitir a produção nas terras baixas: **1,5 kWh por dia**.

A potência real hidroelétrica no Reino Unido hoje em dia é 0,2 kWh/d por pessoa, então este 1,5 kWh/d por pessoa necessitaria um aumento de sete vezes na potência hidroelétrica do país.

Observações e Leitura Complementar

Nº da página

68 Estatísticas das chuvas são do centro climático BBC.

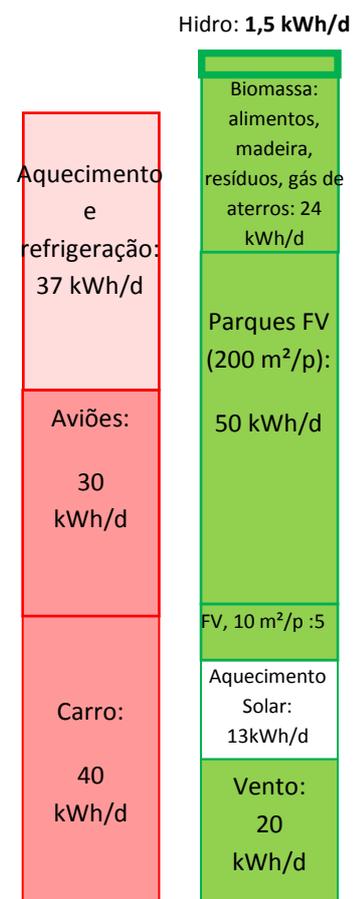


Figura 8.3. Hidroeletricidade.

69 A potência bruta por unidade de área [da chuva nas terras altas] é aproximadamente $0,24 \text{ W/m}^2$. Nós podemos comparar esta estimativa contra a densidade de potência real da hidroelétrica de Loch Sloy, terminada em 1950 (Ross, 2008). A área de captura de Loch Sloy é cerca de 83 km^2 ; a chuva lá é cerca de 2900 mm por ano (um pouco maior do que 2278 mm/ano de Kinlochewe); e a eletricidade produzida em 2006 foi 142 GWh por ano, o que corresponde a uma densidade de potência de $0,2 \text{ W por m}^2$ de área de captura. A área de superfície de Loch Sloy é cerca de $1,5 \text{ km}^2$, de modo que a usina hidrelétrica em si possui por unidade uma área de lago de 11 W/m^2 . Então as encostas, os aquedutos, e os túneis trazendo água para Loch Sloy agem como um concentrador de potência de 55 vezes.

- A potência real da hidroeletricidade no Reino Unido atualmente é $0,2 \text{ kWh por dia por pessoa}$. Fonte: MacLeay et al. (2007). Em 2006, hidroelétricas de grande escala produziram 3513 GWh (de plantas com uma capacidade de $1,37 \text{ GW}$); hidroelétricas de pequena escala, 212 GWh ($0,01 \text{ kWh/d/p}$) (de capacidade de 153 MW).

Em 1943, quando o crescimento da hidroeletricidade estava em pleno andamento, os engenheiros do Conselho de Hidroeletricidade do Norte da Escócia estimaram que as Terras Altas da Escócia poderiam produzir $6,3 \text{ TWh}$ por ano em 102 usinas – o que corresponderia a $0,3 \text{ kWh/d}$ por pessoa no Reino Unido (Ross, 2008).

Glendoe, o primeiro projeto hidrelétrico de larga-escala no Reino Unido desde 1957, adicionará capacidade de 100 MW e espera-se que forneça 180 GWh por ano. A área de captura de Glendoe é 75 m^2 , então sua densidade de potência é $0,27 \text{ W por m}^2$ de área de captura. Glendoe tem sido caracterizado como “grande o suficiente para abastecer Glasgow”. Mas se nós dividirmos seus 180 GWh por ano pela população de Glasgow (616 000 pessoas), nós conseguimos apenas $0,8 \text{ kWh/d}$ por pessoa. Isto é apenas 5% do consumo médio de eletricidade de 17 kWh/d por pessoa. O exagero de 20 vezes é atingido ao se focar no *pico* de saída de Glendoe ao invés de sua *média*, que é 5 vezes menor; e também ao considerar “residências” ao invés da potência elétrica total de Glasgow (veja pag 429).



Figura 8.4. Uma roda hidráulica de 60 kW .

9 Iluminação

Iluminação em casa e no trabalho

A lâmpada doméstica mais brilhante consome 250 W, e lâmpadas de cabeceira consomem 40 W. Em uma lâmpada incandescente antiquada, a maioria da sua potência é transformada em calor, ao invés de em luz. Um tubo fluorescente pode produzir a mesma quantidade de luz usando um quarto da potência de uma lâmpada incandescente.

Quanta potência uma pessoa moderada consome para iluminação? A minha estimativa aproximada, baseada na tabela 9.2, é que uma residência típica de duas pessoas com uma mistura de lâmpadas de baixa energia e de alta energia consome cerca de 5,5 kWh por dia, ou 2,7 kWh por dia por pessoa. Eu assumo que cada pessoa também possua um local de trabalho onde dividem iluminação similar com seus colegas; palpitando que o local de trabalho consuma 1,3 kWh/d por pessoa, nós conseguimos um número redondo de **4 kWh/d por pessoa**.

Iluminação pública e luzes do trânsito

Nós precisamos incluir a iluminação pública também, para conseguir uma estimativa mais precisa, ou apenas iluminação residencial e no trabalho dominam o nosso orçamento de iluminação? Iluminação pública de fato consome cerca de 0,1 kWh por dia por pessoa, e a iluminação com tráfego consome apenas 0,005 kWh/d por pessoa – ambos são desprezíveis, comparados com a iluminação das nossas residências e ambientes de trabalho. E outras formas de iluminação pública – placas e postes iluminadas, por exemplo? Existem menos deles do que luzes na rua; e as luzes de iluminação pública já estão bem baixas no nosso radar, de modo que não precisamos modificar de modo algum a nossa estimativa de 4 kWh por dia por pessoa.

Luzes no Tráfego

Em alguns países, os motoristas devem acender suas luzes sempre que seus carros estiverem em movimento. Como a potência extra consumida por esta política se compara com a potência já sendo consumida para mover o carro? Vamos

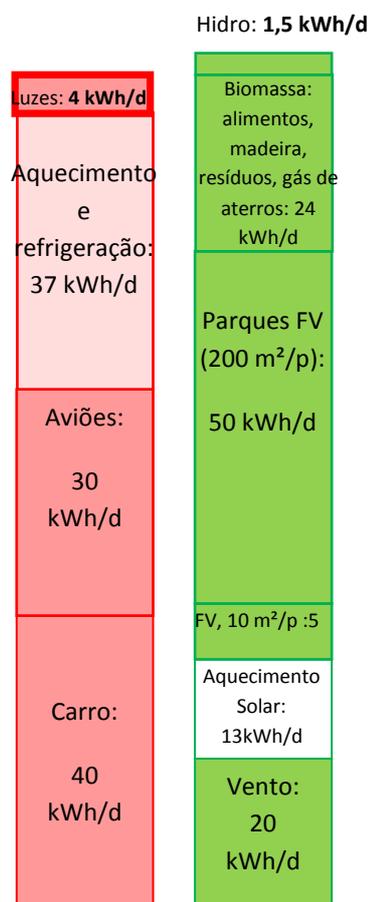


Figura 9.1. Iluminação – 4 kWh por dia por pessoa.

supor que o carro possua quatro luzes incandescentes, totalizando 100 W. A eletricidade para estas lâmpadas é fornecida por um motor com 25% de eficiência alimentando a um gerador com 55% de eficiência, de modo que a potência necessária é **730 W**. Por comparação, um carro típico movimentando-se a uma velocidade mediana de 50 km/h e consumindo um litro por 12 km possui um consumo médio de potência de **42 000 W**. Então deixar as luzes ligadas enquanto o carro anda necessita 2% a mais de potência.

Aparelho	Potência	Tempo por dia	Energia por dia por residência
10 lâmpadas incandescentes	1 kW	5 h	5 kWh
10 lâmpadas econômicas	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

E como ficam os futuros carros elétricos? O consumo de potência de um carro elétrico típico é cerca de 5000 W. Então adicionar os 100 W extras aumentaria o seu consumo em 2%. O consumo de potência seria menor se nós trocássemos todas as luzes do carro por diodos emissores de luz (LEDs), mas se nós prestarmos mais atenção a este tópico nós seremos diagnosticados com um severo caso da síndrome do todo pouco ajuda.

A economia das lâmpadas de baixo consumo energético

Geralmente, eu evito discutir economia, mas eu gostaria de abrir uma exceção para as lâmpadas. As lâmpadas de baixo consumo energético de 20 W da Osram alegam fornecer a mesma iluminação de saída do que as lâmpadas incandescentes de 100 W. Além disso, dizem que sua vida-útil é de 15 000 horas (ou “12 anos”, a um uso de 3 horas por dia). Em contrapartida uma lâmpada incandescente pode durar até 1000 horas. Então em um períodos de 12 anos, você possui esta escolha (figura 9.3): comprar 15 lâmpadas incandescentes e 1500 kWh de eletricidade (que custam aproximadamente £150); ou comprar uma lâmpada de baixo consumo energético e 300 kWh de eletricidade (o que custa aproximadamente £30⁷).

Tabela 9.2. Consumo de eletricidade para iluminação doméstica. Um total plausível é 5,5 kWh por residência por dia; e um consumo similar no trabalho; talvez 4kWh por dia por pessoa.

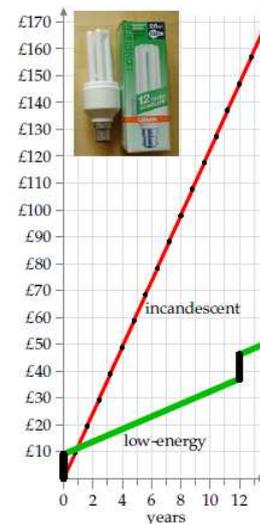


Figura 9.3. Custos cumulativos totais de se utilizar uma tradicional lâmpada incandescente de 100 W por 3 horas por dia, comparado com a substituição dela *agora* por uma Osram Dulux Longlife Energy Saver (fotografada). Suposições: a eletricidade custa 10p por kWh; a substituição das lâmpadas tradicionais custa 45p cada; lâmpadas de baixo consumo energético custam £9 (eu sei que você consegue encontrá-las com um preço melhor do que este, porém o gráfico mostra que, mesmo a este preço, elas são muito mais econômicas).

⁷ R\$ 112,9116 em agosto de 2013.

Eu deveria esperar até que a lâmpada antiga queime antes de substituí-la?

Parece um desperdício, não? Alguém investiu recursos ao fazer a velha lâmpada incandescente; nós não deveríamos fazer o investimento valer à pena e utilizar a lâmpada incandescente até que ela queime? Porém a resposta econômica é clara: *continuar a utilizar a velha lâmpada incandescente é jogar dinheiro fora*. Se você conseguir encontrar um substituto de baixo consumo energético satisfatório, troque a sua lâmpada incandescente agora mesmo.

E como fica o mercúrio contido nas lâmpadas fluorescentes compactas? As lâmpadas LED são melhores do que as fluorescentes?

Pesquisadores dizem que as lâmpadas LED (diodos emissores de luz) logo se tornarão até mais eficientes energeticamente do que as lâmpadas fluorescentes compactas. A eficiência de uma lâmpada é medida em *lumens por watt*. Eu chequei os números nas minhas últimas compras: a lâmpada fluorescente compacta Phillips Genie de 11 W (figura 9.4) possui um brilho de 600 lumens, o que é uma eficiência de **55 lumens por watt**; lâmpadas incandescentes normais fornecem **10 lumens por watt**; a lâmpada Omicron de 1,3 W, que possui 20 LEDs brancos escondidos no seu interior, possui um brilho de 46 lumens, o que é uma eficiência de **35 lumens por watt**. Então esta lâmpada LED é quase tão eficiente quanto a lâmpada fluorescente. A indústria LED ainda tem que correr um pouco atrás. A seu favor, a lâmpada LED possui uma vida útil de 50 000 horas, oito vezes a vida útil da lâmpada fluorescente. No que eu estou escrevendo, eu vejo que o www.cree.com está vendendo LEDs com uma potência de **100 lumens por watt**. Espera-se que no futuro, os LEDs brancos terão uma eficiência superior a **150 lumens por watt** [ynjzej]. Eu espero que daqui uns dois anos, o melhor conselho, tanto pela questão de eficiência energética quanto para evitar a poluição por mercúrio, será utilizar as lâmpadas LED.

Mitos

“Não há porque trocar as minhas lâmpadas por lâmpadas econômicas de energia. A energia “perdida” que elas liberam na forma de calor aquece a minha casa, de modo que não é perdida”.

Este mito será comentado no Capítulo 11, p88.



Figura 9.4. Phillips 11 W ao lado da lâmpada LED da Omicron de 1,3

Tipo de lâmpada	Eficiência (lumens/W)
Incandescente	10
Halógena	16-24
LED branco	35
Fluorescente compacta	55
Fluorescente grande	94
Lâmpada externa de sódio	150

Tabela 9.5. Eficiências de iluminação de lâmpadas comercialmente disponíveis. No futuro, espera-se que os LEDs brancos forneçam 150 lumens por watt.

Observações e Leitura Complementar

Número da página.

- 71 Iluminação pública consome cerca de 0,1 kWh por dia por pessoa... Existe aproximadamente uma lâmpada de sódio na iluminação pública para cada 10 pessoas; cada lâmpada possui uma potência de 100 W ligadas por 10 horas por dia. Isto é 0,1 kWh por dia por pessoa.
- ...e a iluminação com tráfego consome apenas 0,005 kWh/d por pessoa. A Grã Bretanha possui 420 000 lâmpadas de sinais de tráfego e de pedestres, consumindo 100 milhões kWh de eletricidade por ano. Divididos entre 60 milhões de pessoas, 100 milhões de kWh por ano é 0,005 kWh/d por pessoa.
 - Existem menos placas e postes iluminados do que luzes na rua. [www.highwayelectrical.org.uk]. Existem 7,7 milhões de unidades de iluminação (iluminação pública, placas e cartazes iluminados) no Reino Unido. Destes, aproximadamente 7 milhões são de iluminação pública e 1 milhão são de sinais de trânsito. Existem 210 000 sinais de trânsito.
Segundo DUKES 2005, a potência total para iluminação pública é 2095 GWh/ano, o que é 0,1 kWh/d por pessoa.
 - Gerador com 55% de eficiência. Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Alternator. Geradores em estações de potência são muito mais eficientes ao converter trabalho mecânico em eletricidade.

10 Vento do mar

A ordem de vento de parques eólicos marítimos de Londres terá uma contribuição crucial nos objetivos de energias renováveis do Reino Unido.

James Smith, presidente da Shell UK

A potência elétrica é uma comodidade vital demais para ser usada como um programa de criação de empregos para a indústria da turbina eólica.

David J. White

No mar, os ventos são mais fortes e constantes do que em terra, desta forma, os parques eólicos no mar fornecem uma potência maior por unidade de área do que os parques eólicos em terra. Previu-se que o parque eólico Kentish Flats no estuário do Tamisa, cerca de 8,5 km da costa da baía Herne e da cidade de Whistable, que iniciou suas operações no final de 2005, teria uma potência média por unidade de área de 3,2 W/m². Em 2006, sua potência média por unidade de área foi de 2,6 W/m².

Eu presumirei que uma potência média por unidade de área de 3 W/m² (50% acima dos 2 W/m² que estimamos para a potência de parques eólicos em terra) é um valor apropriado para parques eólicos no mar ao redor do Reino Unido.

Agora nós precisamos de uma estimativa da área de mar que poderia, plausivelmente, ser coberta por turbinas eólicas. Convencionalmente se faz uma distinção entre vento de águas rasas e vento de águas profundas, como ilustrado na figura 10.2. A sabedoria popular parece ser de que o vento de águas rasas (profundidade menor do que 25-30m), mesmo que seja aproximadamente duas vezes mais caro do que o vento de terra, é economicamente factível, uma vez dado subsídio modesto; e o vento de águas profundas, atualmente, não é factível. Até 2008 existe apenas um parque eólico de ventos de águas profundas no Reino Unido, um protótipo experimental que manda toda a sua eletricidade produzida para uma plataforma de petróleo nas proximidades, chamada Beatrice.

Águas Rasas

Considerando-se as águas dentro do território da Grã-Bretanha, a área de águas rasas é de cerca de 40 000 km²,



Figura 10.1 Kentish Flats – um parque eólico de ventos rasos. Cada rotor possui um diâmetro de 90 m centrados em um cubo a 70 m de altura. Cada turbina de “3 MW” pesa 500 toneladas, sendo que metade do peso é o seu fundamento.

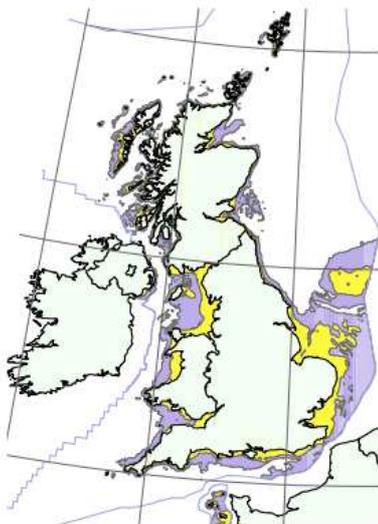
Fotos © Elsam (elsam.com). Usadas com permissão.

sendo a maioria desta área, parte das costas da Inglaterra e do País de Gales. Esta área é cerca do dobro da área do País de Gales.

A potência média disponível para os parques eólicos de ventos de águas rasas ocupando toda esta área seria de 120 GW, ou 48 kWh/d por pessoa. Mas é difícil imaginar este arranjo funcionando satisfatoriamente para a navegação. Pedacos substanciais dessas águas rasas permaneceriam fora dos limites para os parques eólicos. O espaço necessário para os corredores de navegação e áreas de pesca reduzirá a área plausível; eu proponho que assumamos que a fração disponível seja de um terço da área total (mas por favor, veja as notas deste capítulo para obter uma visão ainda mais pessimista!). Então nós estimamos uma potência máxima plausível de ser produzida pelos ventos de águas rasas de **16 kWh/d por pessoa**.

Antes de seguirmos adiante, eu quero enfatizar a grande área – dois terços de um País de Gales – que seria necessária para fornecer 16 kWh/d por pessoa. Se nós pegarmos toda a linha de costa da Grã-Bretanha (comprimento: 3000 km), e colocarmos uma linha de 4 km de turbinas por essa linha, esta linha teria uma área de 12000 km².⁸ Esta é a área que nós devemos encher com turbinas para fornecer 16 kWh/d por pessoa. Para colocar de outra forma, considere o número de turbinas necessário. 16 kWh/d por pessoa seriam fornecidos por 44 000 turbinas de “3MW”, que se distribuiriam ao longo de 3 000 km de costa, com uma densidade de 15 turbinas por km de linha de costeira, todas elas separadas umas das outras pela mesma.

Figura 10.2. As águas dentro do território do Reino Unido com profundidade menor do que 25 m (amarelo) e entre 25 m e 50 m (lilás). Dados do Atlas DTI de Recursos Marinhos Renováveis © Crown direitos autorais.



⁸ N.T. No original, 13 000 km², porém 3000 x 4 = 12 000.

É difícil trabalhar com o vento marítimo devido aos efeitos corrosivos da água do mar. No grande parque eólico dinamarquês, Horns Reef, todas as 80 turbinas tiveram que ser desmanteladas e consertadas após apenas 18 meses de exposição ao ar marítimo. As turbinas de Kentish Flats parecem estar sofrendo problemas similares com as suas caixas de velocidade, já que um terço delas está precisando ser substituído após os primeiros 18 meses.

Águas profundas

A área costeira com profundidade entre 25 m e 50 m tem cerca de 80 000 km² - o tamanho da Escócia. Considerando-se novamente uma potência por unidade de área de 3 W/m², os parques eólicos de águas profundas poderiam fornecer outros 240 GW, ou 96 kWh/d por pessoa, se as turbinas encherem completamente esta área. Novamente nós devemos separar corredores para a navegação. Eu sugiro, como antes, que nós suponhamos que usemos um terço desta área para parques eólicos; esta área seria, então 30% maior do que o País de Gales, e muito dela estaria a mais de 50 km da costa. O resultado: se uma linha com largura de 9 km ao longo da costa fosse ocupada com turbinas, o ventos nas águas profundas poderiam fornecer uma potência de **32 kWh/d por pessoa**. Uma grande quantidade de potência, sim; mas ainda não é párea para o nosso grandíssimo consumo. E nós ainda não mencionamos nada sobre a intermitência do vento. Voltaremos a este assunto no Capítulo 26.

Eu incluirei esta contribuição de potencial dos ventos de águas profundas na pilha de produção, com a condição, como eu disse antes, de que reconheçamos que a energia oriunda de ventos de águas profundas é proibitivamente cara.

Algumas comparações e custos

Então, como está indo a nossa corrida entre consumo e produção? Adicionar ambos os ventos marítimos raso e profundo à pilha de produção, fez com que a pilha verde tomasse a liderança. Uma coisa que eu gostaria que você observasse sobre esta corrida, no entanto, é este contraste: quão *fácil* é fazer com que a pilha de consumo cresça, e quão *difícil* é aumentar a pilha de produção. Enquanto eu estou escrevendo este parágrafo, eu sinto um pouco de frio, então eu me dirijo até o meu termostato e o aumento. É tão simples

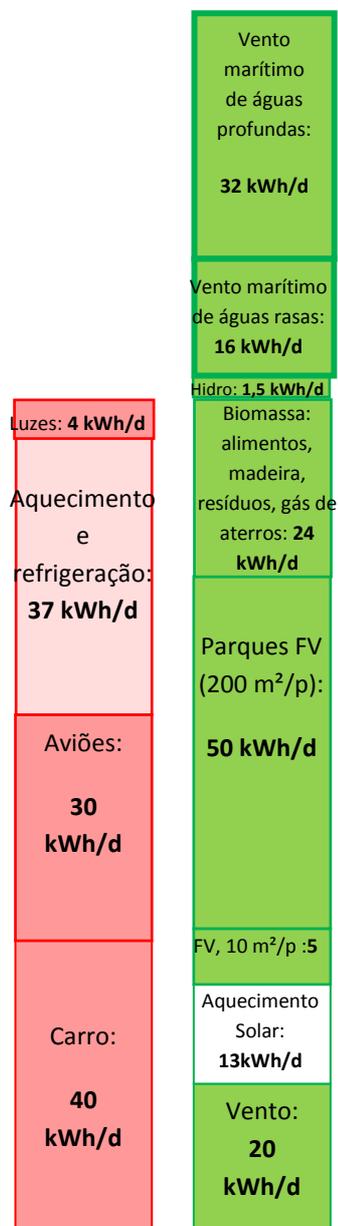


Figura 10.3. Vento marítimo.

para eu consumir 30 kWh extras por dia. Mas espremer 30 kWh extras por pessoa das energias renováveis necessita uma industrialização do meio ambiente tão grande que é difícil de imaginar.

Produzir 48 kWh por dia de vento marítimo por pessoa no Reino Unido necessitaria de **60 milhões de toneladas de concreto e aço** – 1 tonelada por pessoa. A produção anual no mundo é de cerca de 1 200 milhões de toneladas, o que corresponde a 0,2 toneladas por pessoa no mundo. Durante a Segunda Guerra Mundial, os estaleiros americanos construíram 2 751 navios Liberty, cada um contendo 7 000 toneladas de aço – um total de 19 milhões de toneladas de aço, ou 0,1 toneladas por norte-americano. Então a construção de 60 milhões de toneladas de turbinas eólicas não está fora da escala do alcançável; mas não se engane achando que será fácil. Fazer tantas turbinas eólicas será tão difícil quanto construir os navios Liberty.

Por comparação, para produzir 48 kWh por dia de potência nuclear por pessoa no Reino Unido, necessitaria **8 milhões de toneladas de aço** e **0,14 toneladas de concreto**. Nós também podemos comparar 60 milhões de toneladas de instalações de vento marítimo que estamos imaginando com as instalações existente dos combustíveis fósseis, já instaladas ao longo do Mar Norte (figura 10.4). Em 1997, 200 instalações e 7000 km de oleodutos nas águas do Reino Unido do Mar Norte continham **8 milhões de toneladas de aço e concreto**. Os dutos de gás Langeled recém construídos da Noruega para a Grã-Bretanha, que transmitem gás com uma potência de 25 GW (10 kWh/d/p), utilizaram outro **1 milhão de toneladas de concreto** (figura 10.5).

O governo do Reino Unido anunciou em 10 de dezembro de 2007 que permitiria a criação de 33 GW de capacidade de ventos marítimos (que forneceria em média 10 GW ao Reino Unido, ou 4,4 kWh por dia por pessoa), um plano conhecido como utópico por alguns na indústria eólica. Vamos trabalhar com um valor redondo de 4 kWh/d por pessoa. Isto é um quarto dos meus 16 kWh/d por pessoa. Para obter esta potência média é necessário aproximadamente 10 000 turbinas de “3MW” como aquelas mostradas na figura 10.1. (Elas possuem uma capacidade de “3MW” mas em média fornecem 1 MW. Eu coloco aspas ao redor dos “3MW” para indicar que esta é a capacidade, uma potência de pico.)

Qual seria o custo para construir estes “33GW” de potência? Bem, os “90 MW” do parque de Kentish Flat



Figura 10.4. A plataforma Magnus no setor norte do Reino Unido no Mas Norte contém 71 000 toneladas de aço. No ano 2000 esta plataforma forneceu 3,8 milhões de toneladas de petróleo e gás – uma potência de 5 GW. A plataforma custou £1,1 bilhão. Fotos por Terry Caverner.



Figura 10.5. Canos para Langeled.

custaram £33 bilhões⁹. Um modo de esclarecer estes £33 bilhões de custo com ventos marítimos fornecendo 4 kWh/d por pessoa é dividir isto entre a população do Reino Unido; assim, ficaria £550 por pessoa. Este é um acordo muito melhor, na verdade, do que as microturbinas. Uma microturbina instalada em um telhado custa atualmente £1500 e, mesmo sob uma velocidade muito otimista de vento de 6 m/s, fornece apenas 1,6 kWh/d. Na realidade, em uma localidade urbana típica na Inglaterra, tais microturbinas fornecem apenas 0,2 kWh/d.

Outro fato restringindo a instalação de turbinas eólicas é a necessidade de navios especiais. Para erguer 10 000 turbinas eólicas (“33GW”) ao longo de um período de 10 anos necessitaria aproximadamente 50 plataformas auto-elevatórias. Isto teria um custo de £60 milhões cada, necessitando um investimento extra de capital de £3 bilhões. Isto não impediria o show, já que não chega perto dos £33 bilhões já estimados, mas a necessidade de plataformas auto-elevatórias é certamente um detalhe que requer algum planejamento.

Custos das Aves

As turbinas eólicas matam “uma grandíssima quantidade” de aves? Parques eólicos recentemente receberam publicidade adversa na Noruega, onde as turbinas eólicas em Smola, um grupo de ilhas na costa noroeste, mataram 9 águias de cauda branca em 10 meses. Eu compartilho da preocupação da BirdLife International pela segurança das aves raras. Mas eu acho, como sempre, que é importante compararmos os números. Estimou-se que 30 000 aves por ano são mortas pelas turbinas eólicas na Dinamarca, onde as turbinas eólicas geram 9% da eletricidade. Que horror! Vamos banir as turbinas eólicas! Nós também aprendemos, no entanto, que o *trânsito* mata *um milhão* de aves por ano na Dinamarca. É um horror trinta vezes maior! Um incentivo trinta vezes maior para banir os carros! E na Grã-Bretanha, 55 milhões de aves por ano são mortas por *gatos* (figura 10.6).

Considerando apenas as emoções, eu gostaria de viver em um país virtuosamente sem carros, virtuosamente sem aerogeradores, e com uma quantidade enorme de gatos e pássaros (com os gatos que se alimentam dos pássaros sendo caçados pelas águias de cauda branca, para que as coisas

⁹ N.T. £1 equivalem a R\$ 3,7275 em agosto de 2013.

fiquem equilibradas). Mas o que eu realmente espero é que as decisões envolvendo carros e aerogeradores sejam feitas através de considerações racionais, não apenas emoções. Talvez nós realmente precisemos de aerogeradores!

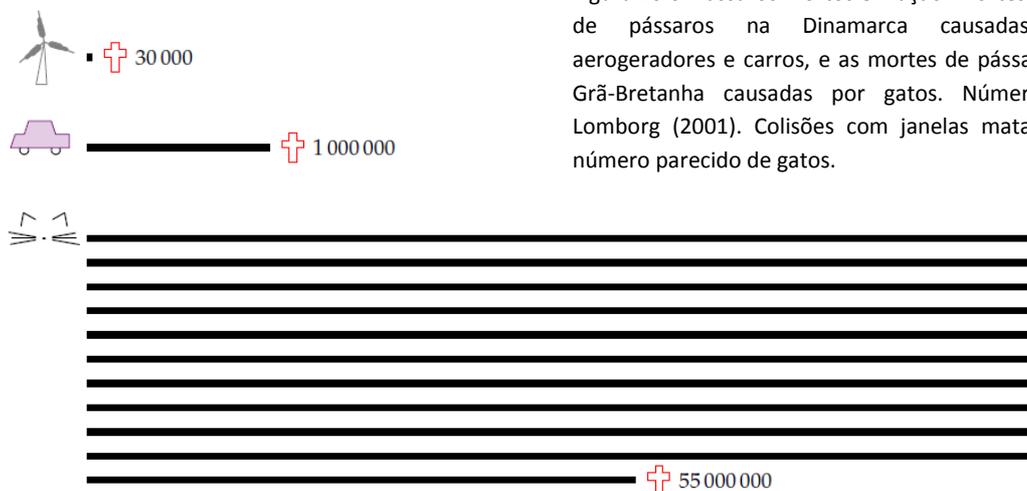


Figura 10.6. Pássaros mortos em ação. Mortes anuais de pássaros na Dinamarca causadas por aerogeradores e carros, e as mortes de pássaros na Grã-Bretanha causadas por gatos. Números de Lomborg (2001). Colisões com janelas matam um número parecido de gatos.

Observações e Leitura Complementar

N pg

75 O parque eólico Kentish Flats no estuário do Tamisa...

Acesse o www.kentishflats.co.uk. Suas 30 turbinas Vestas V9 possuem um pico total de saída de 90 MW, e uma saída média que foi de 32 MW (assumindo um fator de carga de 36%). A velocidade média do vento na altura do cubo da turbina é de 8,7 m/s. As turbinas ficam em águas com profundidade de 5 m, e são espaçadas em 700m umas das outras, ocupando uma área de 10 km². A densidade de potência deste parque eólico marinho foi prevista para ser 3,2 W/m². De fato, a potência média de saída foi 26 MW, de modo que o real fator de carga em 2006 foi de 29%. [wbd80]. Isto faz com que a densidade de potência seja 2,6 W/m². O parque eólico North Hoyle de Prestatyn, no norte do País de Gales, obteve um maior fator de carga de 36% em 2006. Suas trinta turbinas de 2 MW ocupam 8,4 km². No entanto eles obtiveram uma densidade de potência de 2,6 W/m².

- ... o vento de águas rasas, mesmo que seja aproximadamente duas vezes mais caro do que o vento de terra, é economicamente factível, uma vez dado subsídio modesto. Fonte: Associação dinamarquesa de vento windpower.org.

- ... o vento de águas profundas, atualmente, não é factível.

Fonte: documento informativo da Associação de Energia Eólica Britânica, Setembro de 2005, www.bwea.com. Ainda assim, um projeto de demonstração, em 2007, instalou duas turbinas adjacentes ao campo de petróleo Beatrice, a 22 km da costa leste da Escócia (figura 10.8). Cada turbina possui uma “capacidade” de 5 MW e se situa em águas de 45 m de profundidade. Altura do cubo: 107 m; diâmetro 126 m. Toda a eletricidade gerada será utilizada nas plataformas de petróleo. Não é nada do outro mundo! O projeto de 10 MW custou £30 milhões – esta etiqueta de preço de £3 por watt (pico) pode ser comparada com a de Kentish Flats, £1,2 por watt (£105 milhões por 90 MW). www.beatricewind.co.uk

Região	profundidade de 5 a 30 m		profundidade de 30 a 50 m	
	área (km ²)	recurso de potência (kWh/d/p)	área (km ²)	recurso de potência (kWh/d/p)
Noroeste	3 300	6	2 000	4
Greater Wash	7 400	14	950	2
Estuário do Tamisa	2 100	4	850	2
Outras	14 000	28	45 000	87
TOTAL	27 000	52	49 000	94

Tabela 10.7. Recursos para geração de potência eólica nas propostas regiões estratégicas, caso estas regiões fossem *completamente cheias* com turbinas eólicas. Do Departamento do Comércio e Indústria (2002b).

76 A área disponível para ventos marítimos.

O documento “Futuro Além do Mar”¹⁰ do Departamento do Comércio e da Indústria dá em detalhes as áreas que podem ser utilizadas para produção de potência eólica marítima. A Tabela 10.7 mostra os recursos estimados em 76 000 km² de águas profundas e rasas. As estimativas de contribuição de potência do DCI, caso estas áreas fossem *completamente* ocupadas com aerogeradores, é 146 kWh/d por pessoa (consistindo de 52 kWh/d por pessoa dos ventos rasos e 94 kWh/d/p dos ventos profundos). Porém a estimativa de geração de potência eólica marinha do DCI é de apenas **4,6 kWh/d por pessoa**. Pode ser interessante descrever como eles fizeram para reduzir dos 146 kWh/d por pessoa para 4,6 kWh/d por pessoa. Por que eles tiveram um resultado final tão abaixo do nosso? Primeiramente, eles impuseram estes limites: a água deve estar a 30 km da costa e ter profundidade menor do que 40 m; o leito do mar não deve possuir um gradiente maior do que 5°; as rotas de navegação, áreas militares, linhas de dutos, zonas de pesca, e reservas de vida marinha são excluídas da área. Segundo, eles assumem que apenas 5% dos locais de potencial serão desenvolvidos (como resultado da composição do leito marinho e das restrições de planejamento); eles reduziram a

¹⁰ Future Offshore.

capacidade por 50% para todos os locais com menos de 16 km da costa, por motivos de aceitabilidade pública; eles reduziram ainda mais a capacidade dos locais com velocidade de vento superior a 9 m/s em 95% para dar conta das “barreiras de desenvolvimento apresentadas pelo desenvolvimento hostil”; e outros locais com uma velocidade média de vento entre 8-9 m/s tiveram suas capacidades reduzidas em 5%.

76 ...Se nós pegarmos toda a linha de costa da Grã-Bretanha (comprimento: 3000 km), e colocarmos uma linha de 4 km de turbinas por essa linha... Os pedantes dirão que a “linha de costa da Grã-Bretanha não possui um comprimento bem definido, por que sua costa é fractal”. Sim, sim, a linha de costa é quebrada. Mas, caro pedante, por favor pegue um mapa e coloque uma linha de 4 km de turbinas ao redor da ilha principal da Grã-Bretanha e veja se não é o caso de que a sua linha tenha aproximadamente um comprimento de 3000 km.

- **Horns Reef** (Horns Ver). A dificuldade com este parque eólico dinamarquês de “160 MW” de Jutland [www.hornsrev.dk] são descritas por Halkema (2006). Quando está operando, o fator de carga de Horns Reef é 0,43 e sua potência média por unidade de área é 2,6 W/m².

- **Navios Liberty-**
www.liberty-ships.com/html/yards/introduction.html

- ... as instalações de combustíveis fósseis no Mar Norte contém 8 milhões de toneladas de aço e concreto – Rice e Owen (1999).

- O governo do Reino Unido anunciou em 10 de dezembro de 2007 que permitiria a criação de 33 GW de capacidade de ventos marítimos... [25e59w]

78 Qual seria o custo para construir “33 GW” de potência eólica? Segundo o DCI em novembro de 2002, a eletricidade dos parques eólicos custava cerca de £50 por MWh (5p por kWh) (Departamento do Comércio e da Indústria, 2002b, p21). A economia varia rapidamente, contudo, e em abril de 2007, o custo estimado do vento marítimo subiu para £92 por MWh (Departamento do Comércio e da Indústria, 2007, p27). Em abril de 2008, o preço do vento marítimo evidentemente subiu ainda mais: A Shell desistiu de seu compromisso de construir o "London Array". É devido ao fato de que o vento marinho é tão caro que o governo está tendo que aumentar o número de CORs (certificados de obrigações renováveis)¹¹ por unidade de energia eólica marinha. O COR é a unidade de subsídio dado para certas formas de geração renovável de eletricidade. O valor padrão de uma COR é £45, com 1 COR por MWh; então com um preço por atacado de £40/MWh, geradores renováveis estão



Figura 10.8. Construção do parque eólico de demonstração Beatrice. Fotos gentilmente cedidas pela Talisman Energy (UK) Limitada.

¹¹ Do inglês, ROCs(*renewable obligation certificates*).

sendo pagos com £85 por MWh. Então 1 COR por MWh não é o suficiente para cobrir os £92 por MWh. No mesmo documento, estimativas para outras renováveis (custos nivelados para 2010) são listadas a seguir: eólica em terra: £65-89/ MWh; co-combustão da biomassa: £53/MWh; hidroelétrica de grande porte: £63/MWh; gás de esgoto: £38/MWh; solar fotovoltaica: £571/MWh; ondas: £196/MWh; marés: £177/MWh.

“Dale Vince, chefe executivo da fornecedora de energia verde Ecotricity, que é engajado com parques eólicos em terra, disse que ele apoiava os planos do governo [sobre eólica marinha], mas apenas se isto não for em detrimento da eólica em terra. ‘É perigoso negligenciarmos o fantástico recurso que temos neste país... Pelas nossas estimativas, isto terá um custo médio de £40 bilhões para construir os 33 GW de potência eólica marinha que Hutton promete. Nós poderíamos fazer o mesmo trabalho em terra por £20 bilhões.’”[57984r]

- Em uma localidade urbana típica da Inglaterra, as microturbinas fornecem 0,2 kWh por dia. Fonte: *Terceiro Boletim Interino*, www.warwickwindtrials.org.uk/2.html. Entre os melhores resultados nos estudos de Warwick Wind Trials está um Windsave WS1000 (uma máquina de 1-kW) em Daventry montada a uma altura de 15 m acima do chão, gerando 0,6 kWh/d em média. Mas algumas microturbinas fornecem apenas 0,5 kWh/d – Fonte: Donnachadh McCarthy: “Meu ano livre de carbono”¹², *The Independent*, Dezembro de 2003 [6oc3ja]. A turbina eólica Windsave WS1000 vendida na Inglaterra em lojas B&Q, ganhou um prêmio Eco-Bollocks do autor Mark Brinkley da *Housebuilders Bible*: “Vamos lá, é hora de admitir que a indústria das turbinas montadas em telhados é um fiasco completo. Uma grande quantia de dinheiro está sendo jogada fora em uma invenção que não funciona. Este é o Sinclair C5 dos Noughties” [5soq12]. O Met Office e o Carbon Trust publicaram um boletim em julho de 2008 [6g2jm5], que estimou que, se turbinas de baixa-escala fossem instaladas em todas as residências no Reino Unido, elas gerariam um total de aproximadamente 0,7 kWh/d/p. Eles aconselham que turbinas instaladas em telhados na cidade são piores do que inúteis: “em muitas situações urbanas, turbinas instaladas em telhados podem não compensar a emissão de carbono durante a sua produção, instalação e operação”.

¹² No original "My Carbon Free Year".



79 Plataformas auto-elevatórias teriam um custo de £60 milhões.

Fonte: [news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm](https://www.bbc.com/news/health-7206780). Eu estimei que nós precisaríamos de aproximadamente 50 plataformas ao pressupor que teríamos 60 dias favoráveis para o trabalho a cada ano, e que erguer uma turbina levaria 3 dias.

Figura 10.9. Kentish Flats. Fotos ©Elsam (elsam.com). Usadas com permissão.

Para mais leitura: Banco de dados de energia eólica do Reino Unido [www.bwea.com/ukwed/].

11. Eletrônicos

Um dos maiores perigos para a sociedade são os carregadores de celulares. A BBC News vem nos avisando sobre isto desde 2005.

“As estações de potência nuclear serão todas fechadas em alguns anos. Como a Grã-Bretanha fará para manter as suas luzes acesas? ... **tire seus carregadores de celular das tomadas quando não estiverem em uso.**”

Infelizmente um ano depois a Grã-Bretanha ainda não tinha captado a mensagem, e a BBC se sentiu forçada a avisar:

“**A Grã-Bretanha lidera em desperdício de energia.**”

E como isto aconteceu? A BBC manda a seguinte mensagem:

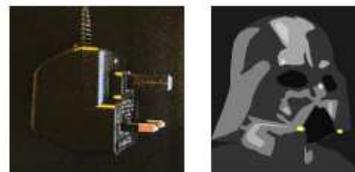
“65% dos usuários do Reino Unido deixam seus carregadores conectados nas tomadas.”

Do modo como os repórteres falam sobre estes objetos pretos destruidores do planeta, é óbvio que eles são tão malvados quanto Darth Vader. Mas quão malvados, exatamente?

Neste capítulo nós descobriremos a verdade a respeito dos carregadores. Nós também investigaremos seus primos na parada dos eletrônicos: computadores, telefones e TVs. Conversores de sinal digital. Modems a cabo. Neste capítulo nós estimaremos a potência consumida para utilizá-los e carregá-los, mas não em produzir estes brinquedos – nós chegaremos nisto mais tarde, num capítulo chamado “coisas”.

A verdade a respeito dos carregadores

Carregadores modernos de celulares, quando deixados conectados na tomada sem nenhum telefone conectado a eles, consomem cerca de meio watt. Nas nossas unidades preferidas, isto equivale a um consumo de potência de 0,01 kWh por dia. Para qualquer um cuja pilha de consumo esteja acima dos 100 kWh por dia, o conselho da BBC, *sempre desconecte o seu carregador*, poderia reduzir potencialmente o



Vader

Carregador

Figura 11.1. Destruidores do planeta. Tente achar as diferenças entre eles.



Figura 11.2. Estes cinco carregadores – três para celulares, um para um computador portátil, e um para um laptop – registraram menos do que um watt no meu medidor de potência.

seu consumo energético em um centésimo de um por cento (se pelo menos as pessoas fizessem isso!).

Todo pouco ajuda!

Eu não acho. Desligar obsessivamente os carregadores de celular da tomada é o mesmo do que tentar tirar água do Titanic com uma colher de chá. Tire-o sim da tomada, mas, por favor, esteja consciente do quão pequeno este gesto é. Deixe-me colocar isto desta maneira:

Toda a energia economizada ao desligar o seu carregador da tomada por um dia é consumida em *um segundo* ao andar de carro.

A energia economizada em *um ano* desconectando o carregador da tomada é igual à energia consumida em um banho quente.

Reconhecidamente, carregadores mais antigos consomem uma quantidade maior de energia do que apenas meio watt – se está quente ao toque, o carregador provavelmente está consumindo um watt ou até três (figura 11.3). Um carregador de três watts consome 0,07 kWh por dia. Eu acho que é uma boa ideia desligá-lo da tomada – *economizará* a você três libras por ano. Mas não se engane achando que você fez a sua parte apenas com este gesto. 3 W é apenas uma pequena fração do consumo energético total.

Ok, chega de tentar salvar o Titanic com colheres de chá. Vamos descobrir onde a eletricidade está realmente sendo consumida.

Eletrônicos que são realmente um problema:

A tabela 11.4 mostra os consumos de potência, em watts, de uma casa cheia de eletrônicos. A primeira coluna mostra o consumo de potência quando o aparelho está realmente sendo utilizado – por exemplo, quando um sistema de som está realmente produzindo algum som. A segunda coluna mostra o consumo quando o aparelho está ligado, mas sem fazer nada. Eu fiquei particularmente chocado ao descobrir que uma impressora a laser ligada sem fazer nada consome 17 W – o mesmo que o consumo médio de um freezer! A terceira coluna mostra o consumo quando o eletrônico é especificamente pedido para dormir ou ficar em "standby". A quarta coluna



Figura 11.3 Este dispensável telefone sem fio e seu carregador consomem 3 W quando ligados na tomada. Isto é **0,07 kWh/d**. Se a eletricidade custa 10p por kWh então um equipamento de 3 W custa £3 por ano.

mostra o consumo quando o aparelho está totalmente desligado – porém ainda conectado na tomada. Eu estou apresentando todas estas potências em watts – para convertê-las novamente para as unidades padrões, lembre-se de que 40 W equivalem a 1 kWh/d. Uma boa regra para lembrar também, por sinal, é que cada watt custa cerca de uma libra por ano (assumindo-se que a eletricidade custe 10p por kWh).

Os maiores comilões são o computador, suas telas, e a televisão, cujos consumos chegam a centenas de watts, quando ligados. Sistemas de entretenimento como aparelhos de som e DVDs pululam na esteira dos computadores, muitos deles consumindo em torno de 10 W. Um DVD player pode custar £20 na loja, mas se você deixa-lo ligado o tempo todo, eles consumirão mais £10 por ano. Alguns aparelhos de som e periféricos de computadores consomem vários watts mesmo quando desligados, graças aos seus transformadores principais. Para ter certeza de que um equipamento está realmente desligado, você precisa desligá-lo da parede.

Aparelho	Consumo de Potência (W)			
	ligado e ativo	ligado e inativo	"standby"	desligado
Computadores e periféricos:				
caixa do computador	80	55		2
monitor de raios catódicos	110		3	0
monitor de LCD	34		2	1
projektor	150		5	
impressora a laser	500	17		
modem "wireless" e com cabo	9			
Computador Laptop	16	9		0,5
Tocador de CD portátil	2			
Rádio-relógio de cabeceira	1,1	1		
Rádio-relógio de cabeceira	1,9	1,4		
Rádio digital	9,1		3	
Rádio com tocador de fita cassete	3	1,2		1,2
Amplificador Estéreo	6			6
Amplificador Estéreo II	13			0
Som de cinema em casa	7	7	4	
Aparelho de DVD	7	6		
Aparelho de DVD II	12	10	5	
TV	100		10	
Gravador de vídeo	13		1	
Caixa de controle da TV Digital	6		5	
Relógio no forno micro-ondas	2			
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Secretária eletrônica		2		
Secretária eletrônica II		3		
Telefone sem fio		1,7		
Carregador de celular	5	0,5		
Aspirador de pó	1600			

Tabela 11.4. Consumo de Potência de vários eletrônicos, em watts. 40 W é 1 kWh/d.



Laptop: 16



Computador: 80



LCD
31 W



CRT
108 W

Impressora: 17 W (ligada, em espera).



Projektor: 150 W



Rádio Digital: 8 W

Alimentando os tentáculos ocultos da era da informação

De acordo com Jonathan Koomey (2007), os servidores de computadores nos centros de informações do Reino Unido e conexões associadas (ar condicionado, sistemas de potência de reserva, etc) consumiram **0,4 kWh por dia por** pessoa – apenas 1% a mais do que o consumo nos Estados Unidos. Este é o consumo para 2005 que, por sinal, é duas vezes maior do que o consumo em 2000, já que o número de servidores aumentou de 5,6 milhões para 10 milhões.

Outros eletrônicos

Um aspirador de pó, se você utilizá-lo por umas duas horas por semana, equivale a cerca de **0,2 kWh/d**. Roçar o gramado consome cerca de **0,6 kWh/d**. Nós poderíamos continuar com isto, mas eu suspeito que computadores e sistemas de entretenimento são as grandes sanguessugas nos balanços de consumo elétrico da maioria das pessoas.

O resumo deste capítulo: dependerá de quantos eletrônicos você tem em casa e no trabalho, mas uma quantidade salutar de equipamentos eletrônicos ligados o tempo todo facilmente consumiriam **5 kWh/d**.

Mitos

“Não há porque desligar as luzes, TVs, e carregadores de celulares durante o inverno. A energia “desperdiçada” por eles aquece a minha residência, então ela não é perdida”.

Este mito é verdade para algumas pessoas, mas apenas durante o inverno. Porém é *falso* para a maioria das pessoas.

Se a sua casa está sendo aquecida por eletricidade de resistências elétricas ou por aquecedores com ventilação forçada então, sim, dá no mesmo aquecer a sua casa com qualquer eletricidade – mesmo as oriundas de perdas. Mas se você está nesta situação, você deveria mudar o modo de aquecer a sua residência. Eletricidade é uma energia de alto nível, enquanto calor é energia de baixo nível. *É um desperdício transformar eletricidade em calor*. Para ser preciso, se você produzir uma unidade de calor de uma unidade de eletricidade, é desperdício. Aquecedores chamados bombas de calor aéreas ou subterrânea, podem fazer muito mais, fornecendo 3 ou 4 unidades de calor para cada unidade de

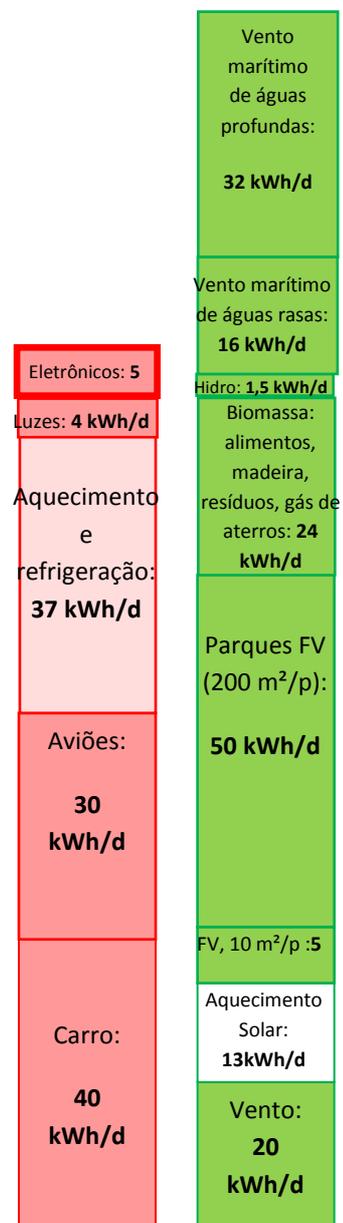


Figura 11.5. Sistemas de informação e outros eletrônicos.

eletricidade consumida. Eles funcionam como refrigeradores, mas ao contrário, bombeando calor do ar externo para a sua casa (veja Capítulo 21).

Para os outros, cujas residências são aquecidas por combustíveis fósseis ou biocombustíveis, é uma boa ideia evitar o uso de eletrônicos como fonte de calor para a sua residência – pelo menos enquanto os nossos aumentos de demanda energética forem supridos por combustíveis fósseis. É melhor queimar os combustíveis fósseis em casa. A questão é, se você consome eletricidade oriunda de uma termoelétrica padrão de combustíveis fósseis, mais da metade da energia do combustível fóssil, infelizmente, vai parar na torre de resfriamento. Da energia que é convertida em eletricidade, cerca de 8% dela é perdida nos sistemas de transmissão. Se você queimar o combustível fóssil na sua residência, uma maior parte da energia será utilizada para fornecer ar quente para você.

Observações e Leitura Complementar

N pg

- 85 **A BBC News vem nos avisando... tire seus carregadores de celulares das tomadas.** O artigo de 2005 da BBC News dizia: “todas as estações de potência nucleares serão fechadas em alguns anos. Como nós podemos manter as luzes da Grã-Bretanha acesas? Aqui estão três maneiras para você economizar energia: desligue gravadores de vídeo quando eles não estiverem em uso; não deixe sua televisão em standby; e tire o seu carregador de celular da tomada quando não estiver usando-o.”
- 85 **Carregadores modernos de celulares, quando deixados conectados na tomada sem nenhum telefone conectado a eles, consomem cerca de meio watt.** O medidor de potência Maplin da figura 11.2 não é preciso o suficiente para medir este tipo de potência. Eu sou grato a Sven Weier e Richard McMahon do Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge que mediram um carregador padrão Nokia com um calorímetro preciso; eles descobriram que, quando não está conectado a um celular, ele perde 0,472 W. Eles fizeram medidas adicionais interessantes: o carregador, quando conectado a um celular completamente carregado, desperdiça 0,845 W; e quando o carregador está fazendo o que deve fazer, carregando um celular Nokia com baixa carga na bateria, ele desperdiça 4,146 W de calor. Pedantes podem perguntar “e como fica a *potência reativa* do carregador?” Isto é uma mesquinha técnica, não vale à pena investir o nosso tempo nisto. Para constar, eu medi a

potência reativa (com um medidor fajuto) e descobri que ela é cerca de 2 VA por carregador. Uma vez que a potência perdida na rede nacional de distribuição é 8% da potência distribuída, eu acredito que a perda de potência associada com a potência reativa é, no máximo, 0,16 W. Sendo que fazer uma ligação custa 1 W.

Leitura complementar: Kuehr (2003).

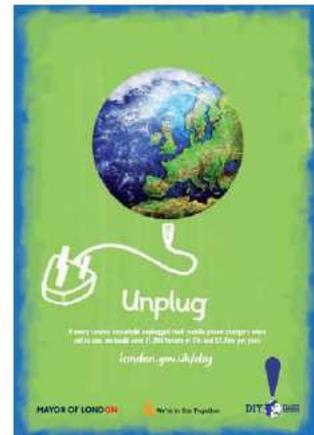


Figura 11.6. Propaganda da campanha “reparos ao planeta DIY”. O texto diz “**Desconecte.** Se todas as residências de Londres desconectassem seus carregadores quando eles não estão em uso, nós poderíamos economizar 31,000 toneladas de CO₂ e £7,75m por ano.” London.gov.uk/diy

12 Ondas

Se a potência das ondas oferece esperança para qualquer país, então ela deve oferecer esperança para o Reino Unido e Irlanda – rodeados por um lado pelo Oceano Atlântico e pelo outro pelo Mar Norte.

Primeiramente vamos esclarecer de onde as ondas vêm: *o sol faz vento e o vento faz ondas*.

A maioria da luz solar que atinge o nosso planeta aquece os oceanos. A água morna aquece o ar que está acima dela, e produz vapor d'água. O ar aquecido sobe; no que ele sobe ele se resfria, e a água eventualmente se recondensa, formando nuvens e chuva. No seu ponto mais alto, o ar é resfriado ainda mais pela congelante escuridão do espaço. O ar frio afunda novamente. Esta grande bomba alimentada pelo sol move o ar em grandes rolos de convecção. Do nosso ponto de vista na superfície, estes rolos convectivos produzem os ventos. O vento é energia solar de segunda-mão. Quando o vento passa sobre o mar aberto, ele gera ondas. Logo, as ondas são energia solar de terceira-mão. (As ondas que estouram na praia não têm nada a ver com as marés.)

Em mar aberto, as ondas são geradas sempre que a velocidade do vento é maior do que 0,5 m/s. As cristas das ondas se movem mais ou menos com a mesma velocidade que o vento que as criou, e na mesma direção. O *comprimento de onda* das ondas (distância entre as cristas) e o *período* (o tempo entre as cristas) dependem da velocidade do vento. Quanto maior o tempo que o vento soprar, e quanto maior a expansão de água na qual o vento sopra, maior a *altura* das ondas geradas pelo vento. Uma vez que o vento prevalecente no Oceano Atlântico vai de oeste para leste, as ondas que atingem a costa da Europa voltada para o Oceano Atlântico são especialmente grandes. (As ondas na costa leste das ilhas britânicas geralmente são muito menores, então as minhas estimativas de potência das ondas se focará nos recursos do Oceano Atlântico.)

As ondas possuem uma memória longa e continuarão seguindo na mesma direção por dias depois que o vento que as criou parou de soprar, até que elas esbarrem em algo. Nos mares em que a direção dos ventos se altera com frequência, ondas nascidas em dias diferentes formam uma grande confusão de sobreposições, viajando em diferentes direções.

Se ondas viajando em uma direção em particular encontram objetos que absorvem energia das ondas – por



Figura 12.1. Um coletor de energia das ondas do tipo Pelamis é como uma serpente marinha com quatro seções. Sua face fica de frente para as ondas que chegam. As ondas fazem com que a serpente marinha oscile, e estes movimentos são resistidos por geradores hidráulicos. A potência de pico de uma serpente marinha é de 750 kW; nas melhores localidades do Oceano Atlântico, uma serpente marinha forneceria uma potência média de 300 kW. Foto da central de potência de onda do tipo Pelamis.

exemplo, uma linha de ilhas com praias arenosas – então o mar após esse objeto será mais calmo. Os objetos lançam uma sombra, e há menos energia nas ondas que passam por eles. Então, enquanto o sol fornece uma potência por unidade de *área*, as ondas fornecem uma potência por unidade de *comprimento* de linha de costa. Você não pode pegar o seu bolo e comê-lo. Você não pode coletar energia das ondas a 3 km da costa e a

1,5 km da costa. Ou então, você até pode tentar, mas a instalação que fica a 3 km da costa absorverá energia que teria ido para a instalação a 1,5 km da costa, e ela não será substituída. A distância necessária para o vento produzir ondas grandes é de milhares de quilômetros.

Nós podemos encontrar o limite superior da potência máxima plausível de ser produzida da potência das ondas ao estimar a potência de entrada por unidade de comprimento de linha de costa exposta, e multiplicar o resultado pelo comprimento de linha de costa. Nós ignoraremos a questão de que mecanismo seria capaz de coletar toda esta potência, e nos focaremos inicialmente em quanta potencia isto seria.

A potência das ondas do oceano Atlântico já foram medidas: são cerca de 40 kW por metro de linha de costa exposta. Isto parece ser muita potência! Se cada pessoa possuísse o seu metro de costa e pudesse coletar todos os seus 40 kW, isto seria potência suficiente para cobrir o consumo moderno. Contudo, *a nossa população é muito grande*. Não há linha de costa voltada para o Atlântico suficiente para que cada um possua o seu metro.

Como mostrado no mapa na página 91, a Grã-Bretanha possui cerca de 1000 km de linha de costa para o Oceano Atlântico (um milhão de metros), o que tá 1/60 m por pessoa. Então a potência total por pessoa é de 16 kWh por dia por pessoa. Se nós extrairmos toda essa potência, o Oceano Atlântico ficaria mais plano do que uma planície. Sistemas reais não conseguiriam extrair toda a potência, e parte da potência seria perdida inevitavelmente ao longo da conversão de energia mecânica para eletricidade. Vamos assumir que os brilhantes equipamentos das ondas possuam uma eficiência de 50% em converter a potência das ondas em eletricidade, e que nós somos capazes de encher de equipamentos de ondas por 500 km da linha de costa voltada para o Oceano Atlântico. Isto significaria que nós poderíamos fornecer 25% deste limite teórico. Isto equivale a **4 kWh por dia por pessoa**. Como sempre, eu estou fazendo considerações bastante extremas propositalmente, para aumentar a pilha verde – eu espero que

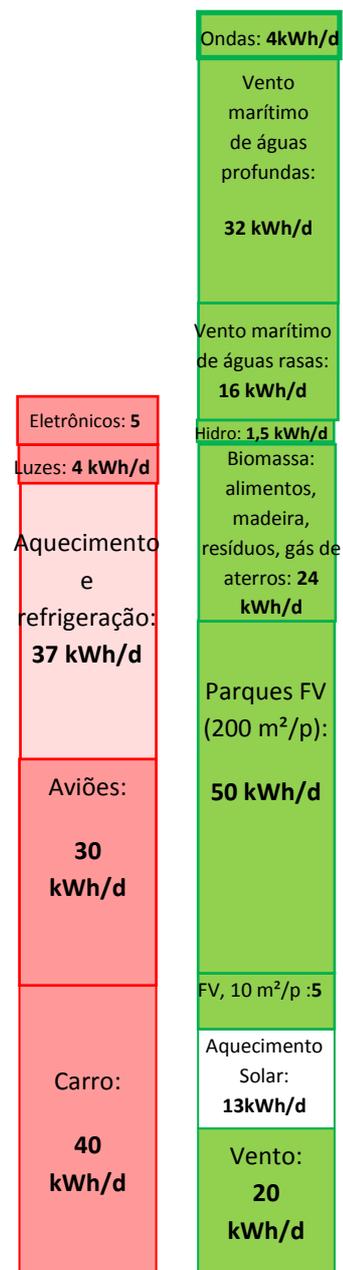


Figura 12.2. Ondas

a pressuposição de que nós possamos cobrir *metade da linha de costa voltada para o Oceano Atlântico* com absorvedores de ondas pareça absurdo para a maioria dos leitores.

Como os números estimados nestes cálculos se comparam com as tecnologias atuais? Enquanto eu escrevo, existem apenas três máquinas de ondas trabalhando em águas profundas: três coletores de energia das ondas do tipo Pelamis (figura 12.1) construídos na Escócia e implantados em Portugal. Nenhum resultado de desempenho foi publicado, mas os criadores da Pelamis (“projetado priorizando a longevidade ao invés da eficiência na conversão de energia”) previram que uma central de potência com 2 km de comprimento contendo 40 serpentes Pelamis forneceria 6 kW por metro de central. Usando este número nos cálculos anteriores, a potência fornecida por 500 quilômetros de parque das ondas é reduzida para **1,2 kWh por dia por pessoa**. Enquanto a energia das ondas pode ser útil para comunidades pequenas de ilhas remotas, eu suspeito que ela não pode desempenhar um papel significativo na solução do problema energético da Grã-Bretanha.

Qual o peso de uma Pelamis, e quanto aço uma delas possui? Uma serpente marinha com uma potência máxima de 750 kW pesa 700 toneladas, incluindo 350 toneladas de lastro. Então ela possui cerca de 350 toneladas de aço. Isto é uma razão de peso por potência de aproximadamente 500 kg por kW (pico). Nós podemos comparar isto com o aço necessário para a potência eólica marinha: uma turbina eólica marinha com uma potência máxima de 3 MW pesa 500 toneladas, incluindo sua fundação. Isto é uma razão de peso por potência de cerca de 170 kg por kW, um terço das máquinas de ondas. A Pelamis é o primeiro protótipo; presume-se que com maiores investimentos e desenvolvimento desta tecnologia, a razão de peso por potência diminua.



Foto por Terry Caverner.

Observações e Leitura Complementar

N pg.

- 91 As ondas são geradas sempre que a velocidade do vento é maior do que 0,5 m/s. As cristas das ondas se movem mais ou menos com a mesma velocidade que o vento que as criou. A teoria mais simples sobre a produção de ondas (Faber, 1995, p 337) sugere que (para ondas pequenas) as cristas das ondas se movem com metade da velocidade do vento que as criou. Descobriu-se empiricamente, no entanto, que, quanto maior o tempo em que o vento



soprar, maior o comprimento de onda das ondas dominantes presentes, e maior é a sua velocidade. A velocidade característica de mares completamente desenvolvidos é quase exatamente igual a velocidade do vento a 20 m acima da superfície do mar (Mollison, 1986).

- **As ondas na costa leste das ilhas britânicas geralmente são bem menores.** Enquanto que a potência das ondas em Lewis (Atlântico) é de 42 kW/m, as potências nos locais da costa leste são: Peterhead: 4 kW/m; Scarborough: 8 kW/m; Cromer: 5 kW/m. Fonte: Sinden (2005). Sinden diz: “A Região do Mar do Norte é um ambiente com baixa quantidade de energia proveniente das ondas.”
- 92 **A potência das ondas do Atlântico é de 40 kW por metro de linha de costa exposta.** (O Apêndice F mostra como nós podemos estimar esta potência utilizando alguns fatos sobre ondas.) Este número possui uma base sólida baseada na literatura sobre potência das ondas do Atlântico (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). De Mollison (1986), por exemplo: “o recurso de larga escala do nordeste do Atlântico, da Islândia para o Norte de Portugal, possui recursos líquidos de 40-50 MW/km, dos quais 20-30 MW/km são potencialmente e economicamente extraíveis.” Em qualquer ponto do oceano aberto, três potências por unidade de comprimento podem ser distinguidas: a potência total passando por aquele ponto em todas as direções (63 kW/m em média nas Ilhas de Scilly e 67 kW/m em Uist); a potência líquida interceptada por um aparelho direcional orientado na direção ótima (47 kW/m e 45 kW/m, respectivamente); e a potência por unidade de linha de costa, que leva em conta o desalinhamento entre a orientação ótima de um coletor direcional e a linha de costa (por exemplo, em Portugal a orientação ótima é para noroeste e a linha de costa é orientada para oeste).
- **Sistemas reais não serão capazes de extrair toda a potência, e parte da potência será inevitavelmente perdida durante a conversão de energia mecânica para eletricidade.** A primeira máquina de ondas conectada à rede no Reino Unido, o Limpet em Islay, é um exemplo notável dessas perdas. Quando ele foi projetado, estimou-se sua eficiência de conversão de potência das ondas para potência para a rede em 48%, e a potência média de saída seria 200 kW. Contudo, as perdas no sistema de captura, volantes e componentes elétricos significaram numa potência de saída real de 21 kW – cerca de 10%¹³ da saída estimada (Wavegen, 2002).

¹³ N.T. No original está escrito 5%, porém 21 de 200 é cerca de 10%.

13 Alimentos e Agricultura

A agricultura moderna é o uso de terra para converter petróleo em alimentos.

Albert Bartlett

Nós já discutimos no Capítulo 6, quanta potência poderia ser *produzida* com os verdes; neste capítulo discutiremos quanta potência é atualmente *consumida* na produção diária do nosso pão.

Uma pessoa moderadamente ativa com um peso de 65 kg consome comida com conteúdo de energia química de cerca de 2600 “Calorias” por dia. Uma “caloria” nos círculos de alimentos, é na verdade 1000 calorias químicas (1 kcal). 2600 “calorias” por dia é cerca de 3 kWh por dia. A maior parte desta energia geralmente escapa do corpo na forma de calor, então uma função de uma pessoa normal é funcionar como um aquecedor de ambientes com uma potência de saída de um pouco mais do que 100 W, uma lâmpada de média-potência. Coloque 10 pessoas em uma sala gelada, e você pode desligar o aquecedor por convecção de 1 kW.

Quanta energia nós realmente consumimos para conseguir os nossos 3 kWh por dia? Se nós expandirmos o nosso ponto de vista para incluir o inevitável aumento com os custos de produção de alimentos, então talvez nós descubramos que a nossa pegada energética é substancialmente maior. Isto depende se somos veganos, vegetarianos ou carnívoros.

O vegano possui inevitavelmente a menor pegada: **3 kWh por dia** de energia das plantas que ele come.

Os custos energéticos de beber leite

Eu amo leite. Se eu beber um pouco de leite todos os dias, que energia isto requer? Uma típica vaca leiteira produz 16 litros de leite por dia. Então o meu bocado por dia (meio litro por dia) faz com que eu empregue 1/32 de uma vaca. Oh, espere aí. Eu adoro queijo também. E para produzir 1 kg de queijo Cheddar Irlandês faz-se necessários 9 kg de leite. Então consumir 50 g de queijo por dia requer uma produção de 450 g extras de leite. OK: Os meus hábitos de leite e queijo fazem com que eu empregue 1/16 de uma vaca. E quanta potência é necessária para sustentar uma vaca? Bem, se uma vaca pesando 450 kg



Figura 13.1. Uma salada Niçoise.

Mínimo: **3 kWh/d**



Figura 13.2. Necessidade mínima de energia para uma pessoa.

Leite, queijo: **1,5 kWh/d**



Figura 13.3. Leite e queijo.

possui necessidades energéticas similares por quilograma de um humano (cujos 65 kg queimam 3 kWh por dia) então a vaca deve estar consumindo cerca de 21 kWh/d. Esta extrapolação de humano para vaca te deixa inquieto? Vamos checar estes números: www.dairyaustralia.com.au diz que uma vaca amamentando com peso de 450 kg necessita 85 MJ/d, o que são 24 kWh/d. Ótimo! Nosso chute não estava tão absurdo assim. Então os meus 1/16 de uma vaca representam, um consumo energético de cerca de **1,5 kWh por dia**. Este valor ignora outros custos energéticos envolvidos em convencer a vaca a produzir leite e em transformar o leite em queijo, e em fazer com que o leite e o queijo viajem até mim. Nós cobriremos alguns destes custos quando chegarmos ao Capítulo 15.

Ovos

Uma "poedeira" (galinha que põe ovos) come cerca de 110 g de ração de galinha por dia. Pressupondo-se que comida de galinha tenha um conteúdo energético metabolizável de 3,3 kWh por quilograma de ração, isto é um consumo de potência de 0,4 kWh por dia por galinha. As galinhas chocadeiras colocam cerca de 290 ovos por ano. Então consumir dois ovos por dia requer uma potência de **1 kWh por dia**. Cada ovo contém em si 80 kcal, o que é cerca de 0,1 kWh. Então do ponto de vista energético, a produção de ovos possui uma eficiência de 20%.

Ovos: **1 kWh/d**



Figura 13.4. Dois ovos por dia.

O custo energético de comer carne

Digamos que um consumidor entusiástico de carne coma 230 g de carne por dia (este é o consumo médio de carne dos norte-americanos). Para descobrir a potência necessária para manter os animais que são devorados pelo comedor de carne no que eles crescem e aguardam pelo abate, é necessário saber por quanto tempo os animais ficam por ali, consumindo energia. Carne de frango, suína ou de gado?

Frango, senhor? Todo frango que você consome esteve cacarejando por aí por aproximadamente 50 dias. Então o consumo diário de 230 g de frango faz com que sejam necessários 11,3 kg de galinhas que estejam vivas, esperando para serem devoradas. E estes 11,3 kg de galinha consomem energia.

Carne suína, senhora? Porcos vivem por mais tempo – talvez uns 400 dias do seu nascimento até virarem bacon – então o consumo médio de 230 g de carne suína por dia necessita que cerca de 90,7 kg.

Carne de gado? A produção de carne de gado envolve o mais longo tempo de criação. Leva cerca de 1000 dias da vida da vaca até surgir um bife. Então o consumo médio de 230 g por dia de bife faz com que seja necessário que 226,7 kg de gado vivo, preparando-se para ser comido.

Para juntar todas estas ideias em um único número, vamos supor que você coma 230 g por dia de carne, feito de quantidades iguais de galinha, carne suína e carne de gado. Este hábito de ingestão de carne necessita o fornecimento contínuo de aproximadamente 3,63 kg de frango, 31,75 kg de carne suína e 77,11 kg de gado. Isto é um total de, aproximadamente, 112 kg de carne animal, ou 170 kg de animal (uma vez que apenas dois terços do animal acabam se tornando carne). E se estes 170 kg de animal possuírem necessidades de potência similares às humanas (cujos 65 kg queimam 3 kWh/d), então a potência necessária para abastecer o hábito de comer carne é

$$170 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/d}}{65 \text{ kg}} \approx 8 \text{ kWh/d}$$

Eu novamente fiz uso da liberdade fisiológica de pressupor que “animais são similares a humanos”; uma estimativa mais precisa sobre o consumo energético para a produção de carne de galinha está nas notas no final deste capítulo. Sem problemas, uma vez que eu quero apenas uma estimativa aproximada e aqui está ela. A potência necessária para produzir comida para um consumidor típico de vegetais, ovos, laticínios, e carne é $1,5 + 1,5 + 1 + 8 = 12 \text{ kWh por dia}$. (o balanço calórico desta rigorosa dieta é de 1,5 kWh de vegetais; 0,7 kWh de laticínios; 0,2 kWh de ovos; e 0,5 kWh de carne – totalizando 2,9 kWh por dia).

Este número não possui nenhum dos custos de potência necessários para agricultura, fertilização, processamento, refrigeração, e transporte de alimentos. Nós estimaremos alguns destes custos abaixo, e outros no Capítulo 15.

Estes cálculos fornecem uma base de argumentos a favor do vegetarianismo, uma vez que há menores custos de potência quando não se come carne? Isto depende de onde o animal de alimenta. Pegue as colinas íngremes e as montanhas

Carnívoros: **8 kWh/d**



Figura 13.5. Alimentar-se de carne requer uma potência extra porque nós precisamos alimentar os animais que estão aguardando para serem devorados por humanos.



Figura 13.6. A energia colhida nas plantações para alimentos.

do País de Gales, por exemplo. Será que esta terra poderia ser utilizada para alguma outra coisa além de pastoreio? Ou estas pastagens rochosas são utilizadas para alimentar ovelhas, ou elas não serão utilizadas para alimentar humanos. Você pode pensar nestas encostas verdes como plantações de biocombustíveis livres de manutenção, e nas ovelhas como colheitadeiras de biocombustíveis auto-reprodutoras. As perdas energéticas entre a luz do sol e os carneiros são substanciais, mas provavelmente não há forma melhor de capturar a luz do sol em tais localidades. (Eu não tenho muita certeza se este argumento a favor da criação de ovelhas no País de Gales realmente convence: durante períodos de clima ruim, as ovelhas do País de Gales são movidas para campos mais baixos, onde sua dieta é suplementada com ração a base de soja e outros alimentos cultivados com o auxílio intensivo de fertilizantes; qual é o real custo energético? Eu não sei.) Argumentos similares podem ser feitos a favor de comer carne para outros lugares como os cerrados da África e as pastagens da Austrália; e a favor do consumo de laticínios na Índia, onde milhões de vacas são alimentadas com sub-produtos de arroz e do cultivo de milho.

Por outro lado, em localidades onde os animais crescem dentro de gaiolas e são alimentados com grãos que poderiam alimentar humanos, não há dúvida de que seria mais eficiente energeticamente cortar fora o que vem no meio e dar os grãos diretamente para os humanos.

Fertilizantes e outros custos energéticos na agricultura

A energia embutida nos fertilizantes europeus é cerca de **2 kWh por dia por pessoa**. De acordo com um boletim do DEFRA da Universidade de Warwick, a agricultura no Reino Unido em 2005 consumiu uma potência de **0,9 kWh por dia por pessoa** para alimentar os veículos de fazenda, maquinaria, aquecimento (principalmente estufas), iluminação, ventilação e refrigeração.

O Custo Energético da Bella, do Rex e do Alazão

Animais de estimação! Você é um serviçal de um cão, gato, ou de um cavalo?

Existem em média 8 milhões de gatos na Grã-Bretanha. Vamos assumir que você cuide de um deles. Quais são os

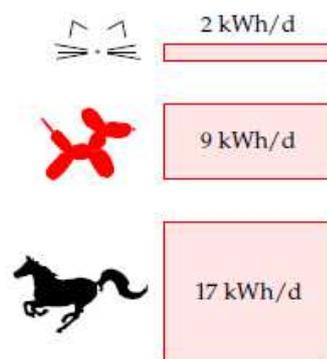


Figura 13.7. A potência necessária para alimentar os animais de estimação.

custos energéticos da Bella? Se ela ingerir 50 g de carne por dia (carne, porco ou gado), então os cálculos da última seção dizem que a potência necessária para produzir a comida da Bella são singelos **2 kWh por dia**. Um gato vegetariano consumiria menos.

Similarmente, se o seu cachorro Rex consome 200 g de carne por dia, e os carboidratos somam em 1 kWh por dia, então a potência necessária para fazer a comida dele é de cerca de **9 kWh por dia**.

O cavalo Alazão pesa cerca de 400 kg e consome **17 kWh por dia**.

Mitos

Eu ouvi dizer que a pegada energética da comida é tão grande que “é melhor dirigir do que caminhar”.

Se isto é verdade ou não, depende da sua dieta. Certamente é possível encontrar comida cuja pegada energética de combustíveis fósseis seja maior do que a energia fornecida para o humano. Um pacote de batatinhas-fritas, por exemplo, possui uma energia embutida de 1,4 kWh de combustível fóssil por kWh de energia química comida. A energia embutida da carne é maior. De acordo com um estudo da Universidade de Exeter, uma dieta típica possui uma energia embutida de aproximadamente 6 kWh por kWh consumido. Para descobrir se dirigir um carro ou caminhar consome menos energia, nós precisamos conhecer a eficiência do transporte de cada modo. Para o carro típico do Capítulo 3, o custo energético foi 80 kWh por 100 km. Caminhadas consomem uma energia líquida de 3,6 kWh por 100 km – 22 vezes menos. Então se você vive inteiramente a base de alimentos cujas pegadas são maiores do que 22 kWh por kWh, então sim, o custo energético para mover você de A até B em um veículo movido a combustíveis fósseis é menor do que se você for movendo você mesmo. Mas se você tiver uma dieta normal (6 kWh por kWh) então é “é melhor dirigir do que caminhar” é um mito. Caminhar consome um quarto de tal energia.

Observações e Leitura Complementar

N pg

95 Uma típica vaca leiteira produz 16 litros de leite por dia. Existem 2,3 milhões de vacas leiteiras no Reino Unido, cada uma produzindo cerca de 5900 litros por ano. Metade de

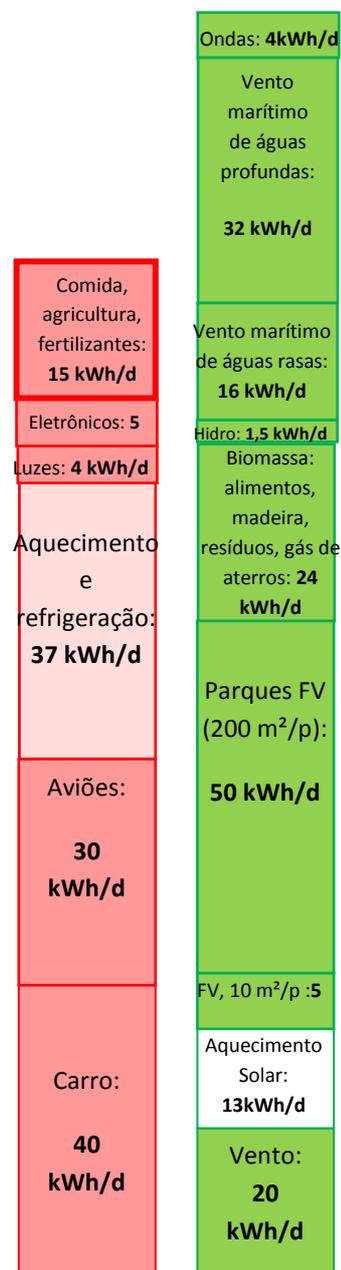


Figura 13.8. Alimentação e agricultura.

- todo o leite produzido pelas vacas é vendido como leite líquido. www.ukagriculture.com, www.vegsoc.org/info/cattle.html.
- 97 **Leva cerca de 1000 dias da vida da vaca para surgir um bife.** 33 meses da concepção até o abatedouro: 9 meses de gestação e 24 meses de criação. www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm.
- **Galinha.** Uma galinha poedeira completamente adulta (20 semanas de idade) pesa entre 1,5 e 1,6 kg. Sua ração possui um conteúdo energético de 2850 kcal por kg, o que são 3,3 kWh por kg, e o seu consumo alimentar aumenta para 340 g por semana quando elas atingem 6 semanas de idade, e para 500 g por semana quando atingem 20 semanas. Uma vez que elas estejam pondo ovos, a quantidade de alimentos necessária é de 110g por dia.
- Alimentar-se de carne de galinha possui um conteúdo energético de 3,7 kWh por kg. O consumo energético é de 400-450 kcal por dia por galinha (0,5 kWh/d por galinha), com 2 kg sendo um peso típico da galinha. Carne de galinha pesando 2,95 kg consome um total de 5,32 kg de ração [5h69fm]. Então a energia da carne de galinha é de cerca de 6,7 kWh por kg de animal, ou 10 kWh por kg de carne comida.]
- Se eu fosse utilizar este número ao invés do meu chute aproximado, a contribuição energética da galinha teria aumentado um pouco. Mas uma vez que a pegada energética da dieta carnívora mista é dominada pela carne de gado, realmente não importa se eu subestimei as galinhas. Fontes: Subcomitê de Nutrição de Aves, Conselho Nacional de Pesquisa (1994), www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, MacDonalds (2008), e www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp.
- 96 **Vamos assumir que você ingira 230 g de carne por dia, feitos de quantidades iguais de carne de galinha, suína e bovina.** Este é um valor próximo da média de consumo nos Estados Unidos, que é 251 g por dia – composto de 108 g de galinha, 81 g de carne bovina e 62 g de carne suína (MacDonalds, 2008).
- 98 **A energia incorporada nos fertilizantes da Europa é cerca de 2 kWh por dia por pessoa.** Em 1998-9, o Oeste Europeu consumiu 17,6 Mt por ano de fertilizantes: 10 Mt de nitratos, 3,5 Mt de fosfato e 4,1 Mt de potassa. Estes fertilizantes possuem pegadas energéticas de 21,7; 4,9 e 3,8 kWh por kg respectivamente. Ao dividir esta energia entre os 375 milhões de habitantes, encontramos uma pegada total de 1,8 kWh por dia por pessoa. Fontes: Gellings e Parmenter (2004), Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes [5pwojp].

- A agricultura no Reino Unido em 2005 consumiu uma energia de 0,9 kWh por dia por pessoa. Fonte: Warwick HRI (2007).
- 99 Um pacote de batatinhas-fritas, por exemplo, possui uma energia embutida de 1,4 kWh de combustível fóssil por kWh de energia química comida. Eu estimei esta energia a partir da pegada de carbono de um pacote de batatinhas-fritas: 75 g de CO₂ para um pacote padrão de 35 g [5bj8k3]. Desta pegada, 44% está associado com a agricultura, 30% com o processamento, 15% com a embalagem, e 11% com o transporte e disposição nos mercados. A energia química fornecida ao consumidor é 770 kJ. Então este alimento possui uma pegada de carbono de 350 g por kWh. Assumindo que a maior parte desta pegada de carbono vem de combustíveis fósseis a 250 g CO₂ por kWh, a pegada energética das batatinhas é 1,4 kWh de combustível fóssil por kWh de energia química consumida.
- Uma dieta típica possui uma energia corporificada de aproximadamente 6 kWh por kWh consumidos. Coley (2001) estimou que a energia corporificada em uma dieta típica é 5,75 vezes a energia derivada dela. Caminhar possui uma pegada de CO₂ de 42 g/km; andar de bicicleta, 30 g/km; Por comparação, dirigir um carro típico emite 183 g/km.
- Caminhar consome 3,6 kWh por 100 km. Um humano caminhando consome um total de 6,6 kWh por 100 km [3s576h]; nós subtraímos a energia restante para chegar na pegada energética de caminhar (Coley, 2001).

Leitura Complementar: Weber e Matthews (2008).

14 Marés

A Terra e a Lua estão girando, dando piruetas enquanto dançam ao redor do Sol. Juntas, elas dão uma volta ao redor do Sol a cada ano, ao mesmo tempo que giram em torno uma da outra a cada 28 dias. A Lua também se vira a cada 28 dias, de modo que ela sempre mostra a mesma face para a sua parceira de dança, a Terra. A prima-dona Terra não devolve o cumprimento; ela dá uma pirueta a cada dia. Esta dança é mantida pela força da gravidade: cada pedaço de Terra, Lua e Sol é puxado por outros pedaços de Terra, Lua e Sol. A soma de todas estas forças é *quase* exatamente o necessário para manter essa dança girante. São estes desequilíbrios que dão surgimento às marés.

Os desequilíbrios associados aos giros da lua e da Terra em torno uma da outra são cerca de três vezes maior do que os desequilíbrios associados à dança mais lenta da Terra ao redor do Sol, então o tamanho das marés varia com as fases da lua, dependendo de se a Lua e o Sol estão entrando ou saindo de alinhamento. Na Lua Cheia e na Lua Nova (quando a Lua e o Sol estão em linha um com o outro), os desequilíbrios são reforçados, e as grandes marés resultantes são chamadas *marés vivas*¹⁴. Porém nas meias luas que acontecem entre elas, parte dos desequilíbrios se cancelam e as marés são menores; estas marés menores são chamadas de *marés mortas*. As marés vivas possuem cerca de duas vezes a amplitude das marés mortas: as altas marés vivas estão a uma altura duas vezes maior acima do nível médio do mar do que as altas marés mortas, e as baixas marés vivas ficam a alturas duas vezes mais baixas com relação ao nível médio do mar do que as baixas marés mortas, e as correntes de marés são duas vezes maiores nas marés vivas do que nas mortas.

Por que existem duas marés altas e duas marés baixas por dia? Bem, se a Terra fosse uma esfera perfeita, uma lisa bola de bilhar coberta por oceanos, os efeitos das marés neste giro Terra-lua seriam a deformação da água levemente em direção e para longe da lua, fazendo com que a água ficasse com um leve formato de bola de rugby (figura 14.1). Uma pessoa vivendo no equador desta Terra em forma de bola de bilhar, girando uma vez por dia dentro do casulo de água,

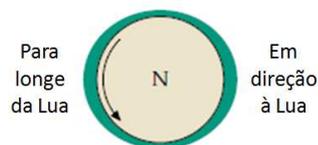


Figura 14.1. Um oceano cobrindo uma Terra em forma de bola de bilhar. Nós estamos olhando para baixo pelo polo norte, e a lua está a 60 cm acima da página à direita. A Terra gira uma vez por dia dentro de um casulo de água no formato de uma bola de rugby. Os oceanos são esticados na direção e para longe da lua porque as forças gravitacionais geradas pela lua não se combinam perfeitamente com a força centrípeta necessária para manter a terra e a lua girando em volta do seu centro comum de gravidade.

Uma pessoa parada no equador (rodando como indicado pela seta) presenciará duas marés altas e duas marés baixas por dia.

¹⁴ Quando o Sol e a Lua estão em oposição (Lua Cheia) ou conjunção (Lua Nova) a influência do Sol reforça a influência da Lua e ocorrem as marés vivas. Todavia, quando o Sol e a Lua estão em quadratura (Quarto crescente e Quarto minguante) a influência do Sol contrapõe a da Lua e ocorrem as marés mortas.

notaria o nível de água subindo e descendo duas vezes por dia: subindo uma vez que tivesse passado sobre o nariz da bola de rugby, e subindo pela segunda vez ao passar pela cauda da bola. A explicação a partir deste desenho difere um pouco da realidade, pois a Terra não é lisa, e não é uniformemente coberta por água (o que você deve ter percebido). Duas corcovas de água não poderiam se mover em volta da Terra ao longo do dia, porque os continentes ficam no caminho. O verdadeiro comportamento das marés é um pouco mais complicado. Em um grande corpo de água, tal qual o Oceano Atlântico, as cristas e os cavados das marés se formam, porém são incapazes de percorrer toda a Terra, de forma que fazem a próxima melhor coisa que podem fazer: percorrer todo o perímetro do Oceano. No norte do Atlântico existem duas cristas e dois cavados, todos circulando o Atlântico em um sentido anti-horário uma vez por dia. Aqui na Grã-Bretanha nós não vemos diretamente estas cristas e cavados do Atlântico – nós estamos alocados nas costas do Atlântico, separados dele por algumas centenas de quilômetros de uma piscina para crianças chamada de plataforma continental. Cada vez que uma destas cristas percorre apropriadamente o Atlântico, ela manda uma crista para a nossa piscina de crianças. Cristas consecutivas e cavados são separados por seis horas. Ou, para ser mais preciso, por seis e um quarto de hora, uma vez que o tempo de nascimento da lua é de 25 horas, e não 24.

A velocidade com que as cristas e cavados viajam varia com a profundidade da piscina de crianças. Quanto mais rasa fica a piscina, mais lentamente as cristas e cavados viajam e mais largas elas ficam. Nos oceanos, as marés possuem apenas 0,3 a 0,6 m de altura. Chegando aos estuários europeus, o alcance das cristas geralmente é de quatro metros. No hemisfério norte, a força de Coriolis (uma força, associada à rotação da Terra, que atua apenas em objetos em movimento) faz com que todas as cristas e cavados tendam a abraçar a margem direita por onde passam. Por exemplo, as marés no canal inglês são maiores do que as do lado francês. Similarmente, as cristas e cavados entrando no Mar Norte por Orkneys abraçam o lado britânico, viajando por baixo do Estuário do Tamisa e virando à esquerda na Holanda para prestar os seus respeitos à Dinamarca.

A energia das marés é algumas vezes chamada de energia da Lua, uma vez que é principalmente devido à lua que a água se move de um lado para o outro. Muito da energia das marés, contudo, está realmente vindo da energia rotacional da Terra. A Terra está gradativamente se desacelerando.



Figura 14.2. A piscina de maré e o moinho de maré de Woodbridge. Fotos gentilmente fornecidas por Ted Evans.

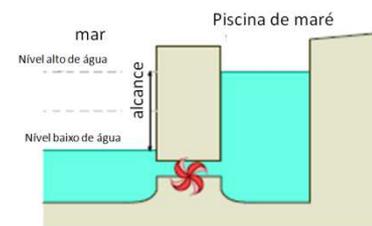


Figura 14.3. Uma piscina de maré artificial. A piscina foi enchida na maré alta, e agora está na maré baixa. Deixamos a água sair da piscina pelo gerador elétrico para transformar a energia potencial da água em eletricidade.

Alcance da maré	Densidade de potência
2 m	1 W/m ²
4 m	3 W/m ²
6 m	7 W/m ²
8 m	13 W/m ²

Figura 14.4. Densidade de potência (potência por unidade de área) das piscinas de marés, assumindo geração tanto do aumento quanto da diminuição da maré.

Então, como nós podemos utilizar a energia das marés, e quanta potência poderíamos extrair?

Estimativas aproximadas da potência das marés

Quando você pensa em potência das marés, você pode pensar em uma piscina artificial próxima do mar, com uma roda de água que gira quando a piscina se enche ou esvazia (figuras 14.2 e 14.3). O Capítulo G mostra como estimar a potência disponível em tais piscinas de marés. Assumindo um alcance de 4m, um alcance típico e muitos estuários europeus, a potência máxima de uma piscina de maré artificial que é enchida rapidamente na maré alta e esvaziada rapidamente na maré baixa, gerando potência de ambas as direções dos fluxos, é cerca de 3 W/m^2 . Esta é a mesma potência por unidade de área que os parques eólicos marinhos. E nós já sabemos o quão grande os parques eólicos marinhos precisam ser para fazer alguma diferença. *Eles precisam ser do tamanho do país.* Então, similarmente, para fazer piscinas de marés capazes de produzir potência comparável ao consumo total da Grã-Bretanha, nós precisaríamos que a área total de piscinas de marés fosse similar à área da Grã-Bretanha.

Incrivelmente, a Grã-Bretanha já é abastecida com uma piscina de maré natural nas dimensões necessárias. Esta piscina de maré é conhecida como Mar do Norte (figura 14.5). Se nós simplesmente inseríssemos geradores nos locais apropriados, uma potência significativa poderia ser extraída. Os geradores poderiam parecer como moinhos de vento embaixo da água. Como a densidade da água é 1000 vezes a densidade do ar, a potência do fluxo de água é 1000 vezes do que a potência do vento à mesma velocidade. Nós voltaremos aos parques de marés em um instante, mas primeiramente vamos discutir quanta energia bruta das marés passa pela Grã-Bretanha todos os dias.

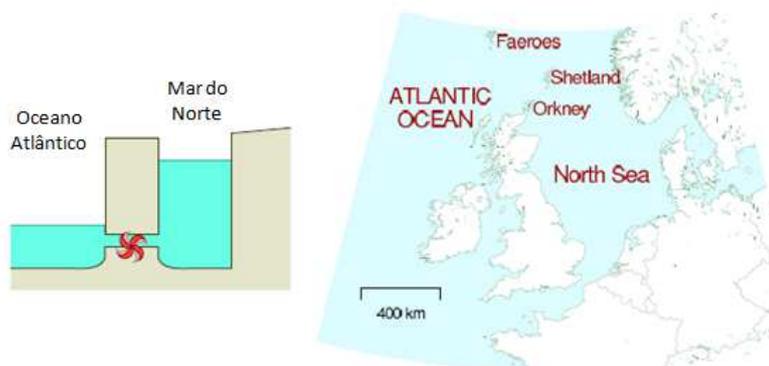


Figura 14.5. As ilhas britânicas estão em uma posição privilegiada: o Mar Norte forma uma piscina de maré natural, onde grandes quantidades de água entram e saem duas vezes

Potência bruta das marés

As marés na Grã-Bretanha são genuínas ondas de marés – diferentemente dos tsunamis que são chamados de “ondas de marés”, mas que não possuem nenhuma relação com as marés. Siga uma maré alta no que ela desliza pelo Atlântico. O tempo da maré alta fica progressivamente atrasado no que nós nos movemos a leste ao longo do canal Inglês, das ilhas de Scilly para Portsmouth e para Dover. A crista da onda de maré progride para cima do canal com cerca de 70 km/h. (A crista da onda se move muito mais rapidamente do que a água em si, assim como as ondas normais no mar se movem mais rapidamente do que a água.) Similarmente, uma alta maré se move no sentido horário pela Escócia, seguindo para baixo pelo Mar do Norte, de Wick para Berwick e até Hull a uma velocidade de cerca de 100 km/h. Estas duas altas marés convergem no Estuário do Tamisa. Por coincidência, a crista escocesa chega umas 12 horas depois do que a crista que vem via Dover, então ela chega perto de um sincronismo com a próxima maré alta via Dover, e Londres recebe as normais duas marés altas por dia.

A potência que nós podemos extrair das marés nunca pode ser maior do que a potência total destas ondas de marés no Oceano Atlântico. A potência total cruzando as linhas na figura 14.6 foi medida; em média ela soma 100 kWh por dia por pessoa. Se nós imaginarmos extrair 10% desta energia incidente, e se os processos de transmissão e conversão tiverem uma eficiência de 50%, a potência média fornecida seria de **5 kWh por dia por pessoa**.

Este é um primeiro palpite, feito sem a especificação de nenhum detalhe técnico. Agora vamos estimar a potência que poderia ser fornecida através de três soluções específicas: parques de marés, barragens, e lagoas de marés em alto mar.

Parques de fluxo de marés

Uma forma de extrair energia das marés seria construir parques de marés, assim como parques eólicos. O primeiro moinho submarino, ou “gerador de fluxo de marés”, a ser conectado com a rede elétrica foi uma turbina de “300 kW”, instalada em 2003 próximo da cidade setentrional de Hammerfest, na Noruega. Resultados detalhados de produção de potência não foram publicados, e ninguém até hoje construiu um parque de marés com mais de uma turbina,



Figura 14.6. A média de potência vinda das ondas de marés lunares atravessando estas duas linhas foi medida como sendo 250 GW. Esta potência bruta, dividida entre 60 milhões de pessoas, é de 100 kWh por dia por pessoa.

velocidade (m/s)	densidade (nós)	de potência (W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela 14.7. Densidade de potência de parque de fluxo de marés (em watts por metro quadrado de fundo do mar) como função da velocidade de fluxo. (1 nó = 1 milha náutica por hora = 0,514 m/s.

então nós teremos que nos apoiar na física e em palpites para prever quanta potência tais parques de marés poderiam produzir. Assumindo que as regras para a colocação sensata de um parque de marés sejam similares às aquelas para parques eólicos, e que a eficiência das turbinas de marés sejam as mesmas das melhores turbinas eólicas, a tabela 14.7 mostra a potência de um parque de marés para algumas correntes de marés.

Partindo do ponto de que correntes de marés de 2 a 3 nós são comuns, existem muitos locais ao redor das Ilhas Britânicas onde a potência por unidade de área de parques de marés seriam de 6 W/m^2 ou maiores. Esta potência por unidade de área pode ser comparada com as nossas estimativas para parques eólicos ($2 - 3 \text{ W/m}^2$) e para parques de energia fotovoltaica ($5 - 10 \text{ W/m}^2$).

Não se pode esnobar a potência das marés! O que mudaria se nós assumíssemos que não existem obstáculos econômicos para a exploração de potência das marés em todos os pontos críticos ao redor do Reino Unido? O Apêndice G lista as velocidades de fluxo nas melhores áreas ao redor do Reino Unido, e estima que **9 kWh/d por pessoa** poderiam ser extraídos.

Barragens

Barragens de marés são uma tecnologia comprovada. A famosa barragem em La Rance na França, onde o alcance das marés são gritantes 8 metros em média, produz uma potência média de 60 MW desde 1966. O alcance das marés no Estuário Severn também é absurdamente grande. Em Cardiff o alcance é de 11,3 m nas marés vivas, e 5,8 m nas marés mortas. Se uma barragem fosse colocada sobre a boca do Estuário Severn (de Weston-super-Mare para Cardiff), isto seria uma piscina de 500 km^2 (figura 14.8). Note quão maior é esta piscina do que o estuário em La Rance. Que potência poderia fornecer esta piscina de maré, se nós deixássemos a água sair e entrar nos momentos ideais, gerando tanto na enchente quanto na vazante? Segundo os números teóricos da tabela 14.4, quando o alcance é de 11,3 m, a potência média contribuída pela barragem (a 30 W/m^2) seria no máximo 14,5 GW, ou **5,8 kWh/d por pessoa**. Quando o alcance é de 5,8 m, a potência média contribuída pela barragem (a 8 W/m^2) seria de no máximo 3,9 GW, ou **1,6 kWh/d por pessoa**. Estes números assumem que a água é deixada entrar em um único pulso no pico da maré alta, e deixada sair em um único pulso na maré

baixa. Na prática, os fluxos de entrada e de saída seriam distribuídos por algumas horas, o que diminuiria um pouco a potência fornecida.



As propostas atuais de barragens gerariam potência em uma direção apenas. Isto reduz a potência fornecida em mais 50%. Os boletins dos engenheiros sobre a proposta da barragem de Severn dizem que, gerando potência apenas na vazante, teria uma contribuição de **0,8 kWh/d por pessoa** em média. A barragem também forneceria proteção de inundações avaliadas em cerca de £120M por ano.

Lagoas de marés

Lagoas de marés são criadas construindo-se paredes no mar; elas então podem ser utilizadas como estuários artificiais. As condições necessárias para construir lagoas são de que a água deve ser rasa e o alcance da maré deve ser grande. A economia de escala se aplica: grandes lagoas de marés produzem energia elétrica mais barata do que pequenas lagoas. As duas principais localizações para lagoas de marés na Grã-Bretanha são a Wash, na costa leste, e as águas de Blackpool na costa oeste (figura 14.9). Instalações menores poderiam ser construídas no norte do País de Gales, Lincolnshire, no sudoeste do País de Gales, e no leste de Sussex.

Se duas lagoas fossem construídas em uma localidade, um truque pode ser utilizado para aumentar a potência fornecida e para habilitar as lagoas a fornecerem potência para demanda a qualquer hora, independente do estado da maré. Uma lagoa

Figura 14.8. As propostas para a barragem de Severn (no canto inferior esquerdo), e Stranford Lough, na Irlanda do Norte (canto superior esquerdo), mostradas na mesma escala que a barragem de La Rance (canto inferior direito).

O mapa mostra dois locais propostos para a barragem de Severn. Uma barragem em Weston-Super-Mare forneceria uma potência média de 2 GW (0,8 kWh/d por pessoa). A alternativa forneceria duas vezes isso.

Há um grande recurso de marés na Irlanda do Norte em Strangford Lough. A área de Strangford Lough é de 150 km²; o alcance das marés no Mar Irlandês é de 1,5 m – infelizmente não tão grande quanto o alcance em La Rance ou Severn. A potência bruta da piscina de marés natural em Strangford Lough é de aproximadamente 150 MW, o que, divididos entre 1,7 milhões de pessoas da Irlanda do Norte, chega a 2 kWh/d por pessoa. Strangford Lough é a localização do primeiro gerador por fluxo de marés conectado à rede no Reino Unido.

pode ser designada como lagoa “alta”, e a outra como lagoa “baixa”. Na baixa maré, alguma potência gerada pelo esvaziamento da lagoa alta pode ser utilizada para bombear água para *fora* da lagoa baixa, deixando o seu nível ainda mais baixo do que o nível baixo da água.

A energia necessária para bombear a água para um nível mais baixo na lagoa baixa é então repago com juros na maré alta, quando a potência é gerada ao deixar a água entrar na lagoa baixa. Similarmente, água extra pode ser bombeada para a lagoa alta usando a energia gerada pela lagoa baixa. Qualquer que seja o estado em que a maré se encontra, uma lagoa ou a outra teria condições de gerar potência. Tal par de lagoas também poderia funcionar como uma unidade de armazenamento por bombeamento, armazenando excesso de energia para a rede elétrica.

A potência média por unidade de área de lagoas de marés nas águas britânicas é de $4,5 \text{ W/m}^2$, então se uma lagoa de maré com uma área total de 800 km^2 fosse criada (como indicado na figura 14.9), a potência gerada seria de $1,5 \text{ kWh/d}$ por pessoa.

A beleza das marés

Somando-se tudo, as barragens, as lagoas e os parques de fluxo de marés poderiam fornecer 11 kWh/d por pessoa.

A potência das marés nunca foi utilizada em escala industrial na Grã-Bretanha, então é difícil saber que desafios econômicos e técnicos surgiriam para construir e manter turbinas de marés – corrosão, acúmulo de lodo, problemas com destroços? Mas aqui estão sete razões para ficar empolgado com a potência das marés nas Ilhas Britânicas. 1. A potência das marés é completamente previsível; diferentemente do vento e do sol, a potência das marés é uma fonte renovável da qual uma pessoa poderia depender; ela funciona dia e noite durante o ano inteiro; com o uso de lagoas de marés, a energia poderia ser armazenada, de modo que se produzisse energia dependendo da demanda. 2. Marés altas e baixas sucessivas levam 12 horas para progredirem pelas Ilhas Britânicas, então as maiores correntes em Anglesey, Isley, Orkney e Dover, ocorrem em momentos diferentes uns dos outros; então, de forma que juntos, um conjunto de parques de marés poderia produzir uma contribuição mais constante que um único parque de marés, mesmo que oscilando para mais ou para menos, com as fases da lua. 3. A potência das marés durará por milhões de anos. 4. Ela não necessita de maquinário de alto custo, em



Figura 14.9. Duas lagoas de marés, cada uma com uma área de 400 km^2 , uma em Blackpool, e outra em Wash. O estuário de Severn também está marcado para comparação.

contraste com a potência solar fotovoltaica. 5. Além disso, uma vez que a densidade de potência de um fluxo típico de maré é maior do que a densidade de potência do vento, uma turbina de maré de 1 MW possui um tamanho menor do que uma turbina eólica de 1 MW; talvez com isso as turbinas de marés pudessem ficar mais baratas do que as turbinas eólicas. 6. A vida embaixo das ondas é pacífica; não existe tal coisa como uma tempestade de maré descontrolada; então, diferentemente das turbinas eólicas, que necessitam de caras intervenções de engenharia para sobreviverem às raras tempestades de vento, as turbinas de marés submarinas não necessitariam de grandes fatores de segurança em seus projetos. 7. Os humanos vivem principalmente em terra, e eles não conseguem ver embaixo da água, então objeções ao impacto visual das turbinas de marés seriam mais fracas do que os das turbinas eólicas.

Mitos

A potência das marés, mesmo que limpa e verde, não deveria ser chamada de renovável. Extrair potência das marés diminui a rotação da Terra. Nós definitivamente não podemos utilizar a potência das marés a longo termo.

Falso. As marés naturais já diminuem a rotação da Terra. A perda natural de energia de rotação é de cerca de 3 TW (Shepperd, 2003). Graças à fricção natural das marés, a cada século, o dia fica mais longo por 2,3 milissegundos. Muitos sistemas de extração de energia das marés estão apenas extraíndo energia que seria perdida por fricção. Mas mesmo que nós *dobrássemos* a potência extraída do sistema Terra-lua, a energia das marés ainda duraria mais do que um bilhão de anos.

Observações e Leitura Complementar

N pg.

- 104 **A potência de uma piscina de maré artificial.** A potência por unidade de área de uma piscina de maré é calculada no Apêndice G, p408.
- **A Grã-Bretanha já é abastecida com uma piscina de maré natural ... esta piscina de maré é conhecida como Mar do Norte.** Eu não deveria dar a impressão de que o Mar do Norte se enche e se esvazia da mesma forma como uma piscina de maré na costa da Inglaterra. Os fluxos no Mar do

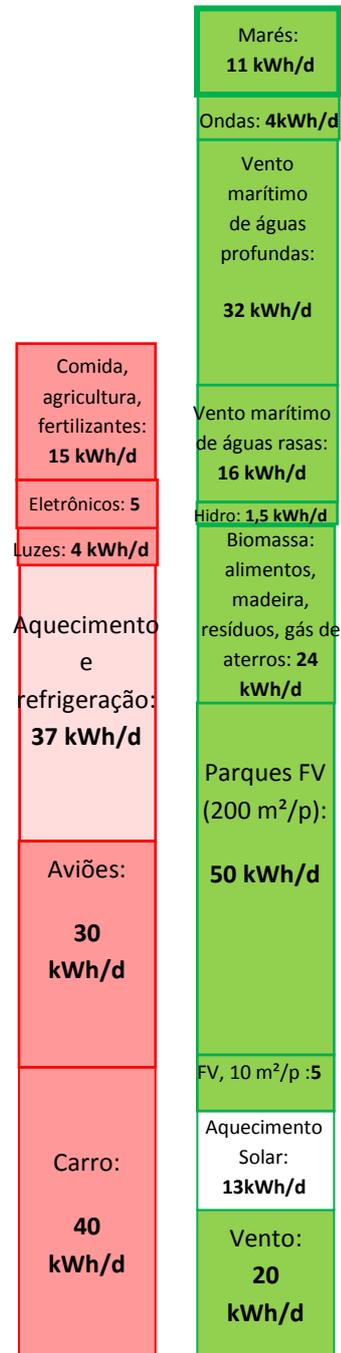


Figura 14.10. Marés.

Norte são mais complexos porque o tempo que leva para que um aumento no nível de água se propague pelo mar é similar ao tempo entre as marés. Ainda assim, existem correntes de marés entrando e saindo do Mar do Norte, e no seu interior também.

- 105 A potência total fornecida pelas ondas de marés lunares que cruzam essas linhas foi medida como sendo 100 kWh por dia por pessoa. Fonte: Cartwright et al. (1980). Para leitores que gostam de modelos aproximados, o Apêndice G mostra como estimar esta potência a partir dos princípios fundamentais.
- 106 La Rance gerou 16 TWh por 30 anos. Isto é uma potência média de 60 MW. (Sua potência de pico é de 240 MW.) O alcance da maré vai até 13,5 m; a área represada é de 22 km²; a barragem possui 750 m de comprimento. Densidade média de potência: 2,7 W/m². Fonte: [6xrm5q].
- 107 Os boletins dos engenheiros sobre a barragem de Severn dizem que ...17 TWh/ano. (Taylor, 2002b). Estes (2 GW) correspondem a 5% do consumo atual de eletricidade do Reino Unido, em média.
- 108 A potência por unidade de área das lagoas de maré poderiam ser 4,5 W/m². MacKay (2007a).

15. Objetos

Um dos maiores ralos da energia no mundo “desenvolvido” é a criação de objetos. No seu ciclo de vida natural, as coisas passam por três estágios. Primeiro, um objeto recém nascido é colocado à disposição em um pacote brilhante em uma prateleira de supermercado. Neste estágio, os objetos são chamados de “bens”. Assim que os objetos são levados para casa e retirados de suas embalagens, eles são rebaixados do seu status de “bens” para “tralha”. As tralhas vivem com seus donos por um período de meses ou anos. Durante este período, a tralha é constantemente ignorada pelo seu dono, que está fora de casa, nos mercados, comprando mais bens. Eventualmente, por um milagre da alquimia moderna, a tralha é transformada na sua forma final, lixo. Para os olhos destreinados, pode ser difícil distinguir este “lixo” do altamente desejado “bem” que ele costumava ser. No entanto, o proprietário capaz de discernir um do outro paga o lixeiro para transportar as coisas embora.

Digamos que nós queiramos compreender o custo completo dos objetos, talvez pensando em projetar objetos melhores. Isto se chama análise de ciclo de vida. Convencionalmente se divide o custo energético de qualquer coisa, desde um secador de cabelos a um transatlântico, em quatro estágios:

Fase B: Obtenção da matéria bruta. Esta fase envolve a extração de minerais da terra, o seu derretimento, a sua purificação e então sua transformação em blocos manufaturados: de plásticos, vidros, metais e cerâmicas, por exemplo. O custo energético desta fase inclui os custos de transporte para carregar a matéria bruta até o seu próximo destino.

Fase P: Produção. Nesta fase, os materiais brutos são processados em um produto manufaturado. A fábrica onde as bobinas do secador de cabelos são enroladas, suas linhas graciosamente moldadas, e seus componentes cuidadosamente montados, utiliza calor e iluminação. Os custos energéticos desta fase incluem o empacotamento do produto e mais transporte.

Fase U: Uso. Secadores de cabelo e transatlânticos, ambos consomem energia quando estão sendo usados.



Figura 15.1. Propaganda sobre o lixo da Selfridge.

	energia embutida (kWh por kg)
combustível fóssil	10
madeira	5
papel	10
vidro	7
plástico PET	30
alumínio	40
aço	6

Figura 15.2 A energia embutida dos materiais.

Fase D: Descarte. Esta fase inclui os custos energéticos de se colocar as coisas de volta em um buraco na terra (aterros), ou em transformá-la novamente em materiais brutos (reciclagem); e em limpar toda a poluição associada a estes produtos.

Para entender quanta energia a vida de um objeto necessita, nós devemos estimar os custos energéticos de todas as quatro fases e somá-los. Geralmente uma destas quatro fases domina o custo total de energia, então para conseguir uma estimativa razoável do custo total de energia, nós precisamos de estimativas precisas da fase dominante. Se nós queremos remodelar um objeto de modo a reduzir seu custo energético total, devemos principalmente nos focar em reduzir o custo da fase dominante, ao mesmo tempo em que temos certeza de que as economias de energia feitas nesta fase não sejam jogadas fora por aumentos de consumo energético nas outras três fases.

Ao invés de estimar em detalhe quanta potência a produção perpétua e o transporte de todos os objetos requerem, vamos primeiramente cobrir alguns exemplos comuns: embalagens de bebidas, computadores, baterias, panfletos, carros e casas. Este capítulo foca nos custos energéticos das fases B e P. Estes custos energéticos são, algumas vezes, chamados de energia “corporificada” ou “embutida” das coisas – nomes levemente confusos, uma vez que esta energia não está literalmente corporificada ou embutida nas coisas.

Embalagens de bebidas

Vamos assumir que você tenha o hábito de beber refrigerante: você toma cinco latinhas de produtos químicos de multinacionais por dia, e joga as latinhas de alumínio fora. Para este objeto, é a fase de material bruto que domina. A produção de metais consome energia intensivamente, especialmente para produção de alumínio. Fazer uma lata de bebidas de alumínio requer 0,6 kWh. Então um hábito de cinco latas por dia consome energia a uma taxa de **3 kWh/d**.

No caso de uma garrafa de água de 500 ml feita de PET (que pesa 25 g), a energia embutida é de 0,7 kWh – tão ruim quanto a lata de alumínio!



Alumínio: **3 kWh/d**



Embalagens: **4 kWh/d**



Figura 15.3. Cinco latas de alumínio por dia são 3 kWh/d. A energia embutida em outras embalagens descartadas pelo britânico padrão é 4 kWh/d.

Outras embalagens

Um britânico de classe média joga fora 400 g de embalagens por dia – principalmente embalagens de comida. O conteúdo de energia embutida nas embalagens variam de 7 a 20 kWh por kg no que passamos pelo espectro de vidro e papel para plástico e latas de aço. Pegando o conteúdo energético embutido de 10 kWh/kg, nós deduzimos que a pegada energética das embalagens é de **4 kWh/d**. Um pouco desta energia embutida é recuperável pela incineração de resíduos, como nós discutiremos no Capítulo 27.

Computadores

Fazer um computador pessoal custa 1800 kWh de energia. Então se você comprar um computador novo a cada ano, isto corresponde a um consumo de potência de **2,5 kWh por dia**.

Baterias

O custo energético de produzir pilhas recarregáveis AA de níquel-cádmio, armazenando 0,001 kWh de energia elétrica e possuindo uma massa de 25 g, é 1,4 kWh (fases B e P). Se o custo para descartar as baterias é similar, jogar fora duas baterias AA por mês consome **0,1 kWh/d**. O custo energético com baterias é, então, um item menor na nossa pilha de consumo.

Jornais, revistas e panfletos

Um jornal de 36 páginas distribuído gratuitamente em estações ferroviárias, pesa 90 g. O *Cambridge Weekly News* (56 páginas) pesa 150 g. O *The Independent* (56 páginas) pesa 200 g. Uma revista de 56 páginas acetinadas comum e a revista *Cambridgeshire Pride Magazine* (32 páginas), ambas entregues gratuitamente em casa, pesam 100 g e 125 g respectivamente.

Este amontoado de material de leitura e panfletos de propagandas que chegam nas nossas caixas de correio contém energia. Também custa energia produzir e entregar este material. Papel possui uma energia incorporada de 10 kWh por kg. Então a energia incorporada no fluxo de correio que uma pessoa recebe como propagandas, revistas e jornais, somando-se 200 g de papel por dia, (isto é o equivalente a um

Batatinhas-fritas: **2,5 kWh/d**



Figura 15.4. Ela está fazendo batatinhas.

Foto: ABB.

Fazer um computador pessoal a cada dois anos custa 2,5 kWh por dia.



Jornais, panfletos e revistas: **2 kWh/d**



The Independent por dia, por exemplo) é cerca de **2 kWh por dia**.

A reciclagem de papel economizaria metade da energia na manufatura do papel; a queima de resíduos ou queimar papel em casa pode ser um uso para parte da energia embutida.

Objetos maiores

O maior objeto que a maioria das pessoas compra é uma casa.

No Capítulo H, eu estimo o custo energético de se construir uma nova casa. Assumindo que nós substituamos cada casa a cada 100 anos, o custo energético estimado é de 2,3 kWh/d. Este é o custo energético para se construir apenas o envelope da casa, a fundação, tijolos, telhas e as vigas do telhado. Se a média de ocupação por casa é de 2,3, o gasto médio de energia com a construção de casas é então estimado a ser **1 kWh/d por pessoa**.

E quanto a um carro, e uma rodovia? Alguns de nós possuem carros, mas nós geralmente dividimos um. A energia embutida em um carro novo é 76 000 kWh – então se você comprar um carro novo a cada 15 anos, isto é um custo energético médio de **14 kWh por dia**. Uma análise de ciclo de vida feito por Treloar, Love e Crawford estimou que a construção de uma rodovia australiana custou 7600 kWh por metro (uma contínua rodovia reforçada de concreto), e isto, incluindo os custos com manutenção, resulta no custo total ao longo de 40 anos de 35 000 kWh por metro. Vamos transformar isto em uma imagem sobre o custo energético para as rodovias britânicas. Existem 45 062 km de estradas federais e estradas classe -1¹⁵ na Grã-Bretanha (excluindo as vias expressas). Assumindo 35 000 kWh por metro por 40 anos, estas rodovias nos custam **2 kWh/d por pessoa**.

Transportando objetos

Até agora eu tentei fazer as estimativas de consumo *pessoal*. “Se você consome cinco latinhas de refrigerante, isto são 3 kWh; se você compra o *The Independent*, isto são 2 kWh”. Daqui em diante, contudo, as coisas ficarão um pouco mais impessoais. No que nós estimamos a energia gasta para transportar os objetos pelo país e pelo planeta, eu olharei para os totais nacionais e dividirei o resultado pela população total.

¹⁵ N.T. Rodovias com tráfego entre 10 e 30 milhões de eixo padrão.

Construção de casas: **1 kWh/d**



Construção de carros: **14 kWh/d**

Construção de rodovias: **2 kWh/d**



de



Figura 15.5. Distância da comida – Quitutes, feitos de forma caseira em Helston, Cornwall, viajaram em navio por 580 km para serem consumidos em Cambridge.

O transporte de mercadorias é medido em toneladas-quilômetros (t-km). Se uma tonelada de quitutes de Cornwall são transportados por 580 km (figura 15.5) então nós dizemos 580 t-km de frete foram cumpridos. A intensidade energética do transporte de objetos no Reino Unido é cerca de **1 kWh por t-km**.

Quando um navio de carga na figura 15.6 transporta 50 000 toneladas de carga por uma distância de 1000 km, ele atinge 500 milhões de t-km de transporte de frete. A intensidade da energia de frete por este navio de carga é de **0,015 kWh por t-km**. Note quão mais eficiente é o transporte feito por este navio de carga do que por rodovias. Estas intensidades de energia são mostradas na figura 15.8.



Figura 15.6. O navio de transporte de carga *Ever Uberty* no Terminal de Container Thamesport. Foto por Ian Boyle www.simplonpc.co.uk.

Transporte de objetos por rodovias

Em 2006, a quantidade total de transporte por rodovias na Grã-Bretanha por veículos de transporte de objetos pesados foi de 156 t-km. Divididos entre 60 milhões de habitantes, isto fica em 7 t-km por dia por pessoa, o que custa **7 kWh por dia por pessoa** (assumindo uma intensidade energética de 1kWh por ton-km). Um quarto deste transporte, por sinal, foi comida, bebidas e tabaco.

Transporte por rodovias: **7 kWh/d**

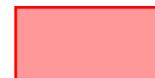


Figura 15.7. O que os caminhões levam e o que os caminhões trazem. Custo energético dos fretes por rodovias no Reino Unido: 7 kWh/d por pessoa.

Transporte de objetos por água

Em 2002, 560 milhões de toneladas de frete passaram pelos portos britânicos. O Centro Tyndall calculou que a parte de

Transporte por navegação: **4 kWh/d**



consumo energético britânica das navegações internacionais é **4 kWh/d por pessoa**.

Transporte da água; fazer xixi

A água não é um objeto com muito glamour, mas nós usamos bastante dela – cerca de 160 litros por dia por pessoa. Em troca, nós fornecemos cerca de 160 litros por dia por pessoa de esgoto para as companhias de água. O custo de bombear a água pelo país e tratar o nosso esgoto é cerca de **0,4 kWh/d por pessoa**.

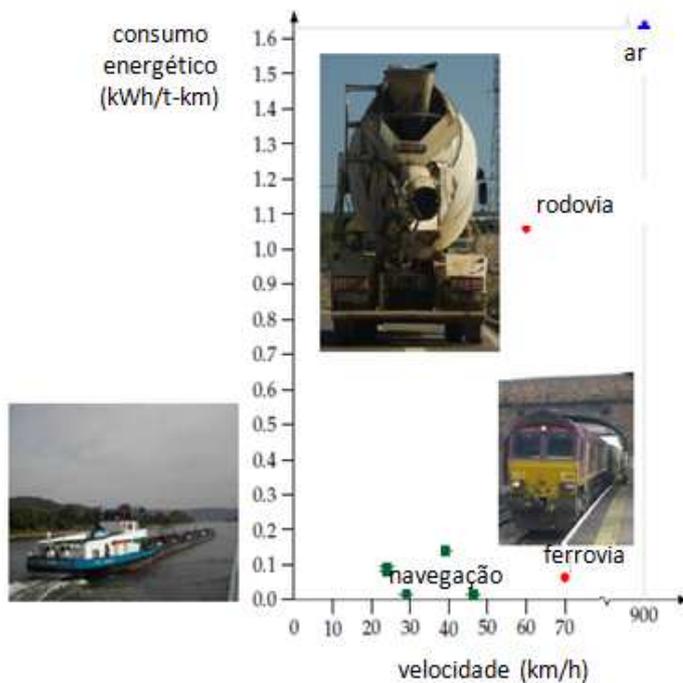


Figura 15.8. As necessidades energéticas de diferentes formas de transporte de carga. A coordenada vertical mostra a energia consumida em kWh por ton-km (isto é, a energia por t-km de frete em movimento, não incluindo o peso do veículo).

Veja também a figura 20.23 (necessidades energéticas de passageiros).



O transporte por água necessita de energia porque um barco produz ondas.

Ainda assim, o transporte por barcos é surpreendentemente eficiente energeticamente.

Dessalinização

No momento o Reino Unido não gasta energia na dessalinização da água. Mas vamos conversar sobre criar plantas de dessalinização em Londres. Qual é o custo de transformar água salgada em água potável? O método que consome menos energia é o de osmose reversa. Pegue uma membrana que deixe apenas água passar, coloque água salgada de um lado dela e pressurize a água salgada. A água relutantemente vazará pela membrana, produzindo água mais pura – relutantemente porque a água pura, separada da água salgada, possui baixa entropia, e a natureza prefere processos

Fornecimento e remoção de água: **0,4 kWh/d**



Figura 15.9. Fornecimento de água: 0,3 kWh/d; processamento de esgotos: 0,1 kWh/d.

de alta entropia onde tudo está misturado. Nós devemos pagar em energia de alto nível para separar as coisas.

A ilha de Jersey possui uma planta de dessalinização que pode produzir 6000 m³ de água pura por dia (figura 15.10). Incluindo as bombas para trazerem a água do oceano e por uma série de filtros, a planta toda consome uma potência de 2 MW. Isto é um custo energético de 8 kWh por m³ de água produzida. A um custo de 8 kWh por m³ de água, para um consumo diário de 160 litros seria necessário **1,3 kWh por dia**.

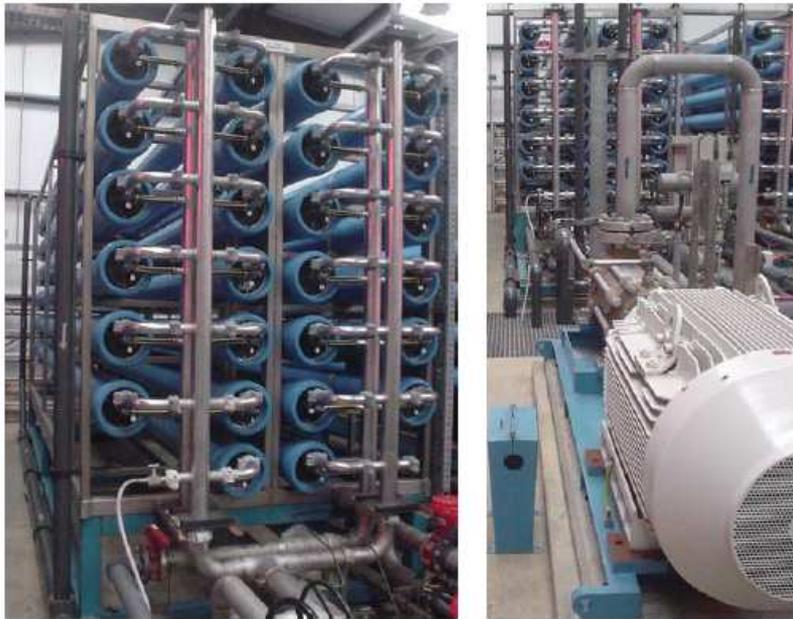


Figura 15.10. Parte da instalação de osmose reversa da planta de dessalinização de Jersey's Water. A bomba no primeiro plano, à direita, possui uma potência de 355 kW e empurra a água do mar a uma pressão de 65 bar em 39 membranas em espiral nos bancos dos tubos azuis horizontais, à esquerda, fornecendo 1500 m³ por dia de água limpa. A água limpa desta instalação possui um custo energético total de 8 kWh por m³.

Venda de objetos

Supermercados no Reino Unido consomem cerca de 11 TW de energia por ano. Dividindo-se isso igualmente pelos 60 milhões de felizes consumidores, é uma potência de **0,5 kWh por dia por pessoa**.

Supermercados: **0,5 kWh/d**



A importância dos objetos importados

Em valores padrões de “consumo energético da Grã-Bretanha” ou “da pegada de carbono da Grã-Bretanha”, os bens de consumo importados *não* são contabilizados. A Grã-Bretanha costumava produzir seus próprios aparelhos, e a nossa pegada per capita em 1910 era tão grande quando a da América é atualmente. Hoje a Grã-Bretanha não fabrica tanto (então o nosso consumo energético e as emissões de carbono caíram

um pouco), mas nós ainda amamos aparelhos, e nós deixamos que eles sejam feitos para nós por outros países. Nós deveríamos ignorar o custo de fabricar aparelhos, porque eles são importados? Eu acho que não. Dieter Helm e seus colegas em Oxford estimaram que sobre uma contabilização correta, contando os importados e os exportados, a pegada de carbono da Grã-Bretanha é quase *duplicada* dos oficiais “11 toneladas de gás carbônico por pessoa” para cerca de 21 toneladas. Isto implica que o maior item na pegada energética de um britânica de classe média é o custo para produzir objetos importados.

No Apêndice H, eu exploro um pouco mais esta ideia ao observar o peso dos importados pela Grã-Bretanha. Deixando de lado nossas importações de combustíveis, nós importamos um pouco mais do que 2 toneladas de objetos a cada ano, dos quais 1,3 toneladas por pessoa são objetos processados e fabricados como veículos, maquinarias, produtos de linha branca, e equipamentos elétricos e eletrônicos. Isto dá cerca de 4 kg por dia por pessoa de objetos processados. Tais bens são feitos principalmente de materiais cujas produções necessitam pelo menos 10 kWh de energia por quilograma de objetos. Eu então estimei que esta pilha de carros, geladeiras, microondas, computadores, fotocopiadoras e televisões possuem uma energia embutida de pelo menos 40 kWh por dia por pessoa.

Para resumir todas estas formas de objetos e transporte de objetos, eu colocarei na pilha de consumo **48 kWh por dia por pessoa** para a produção de objetos (compostos de pelo menos 40 de objetos importados, 2 para o jornal diário, 2 para a construção de rodovias, 1 para a construção de casas e 3 para embalagens); e outros 12 kWh por dia por pessoa para o transporte de objetos por mar, rodovias, e por canos, e para o armazenamento de alimentos nos supermercados.

Trabalhe até que você compre.

Ditado Popular.

Observação e Leitura Complementar

N pg.

112 Uma lata de bebida de alumínio custa 0,6 kWh. A massa de uma lata é 15 g. Estimativas do custo total energético da fabricação do alumínio variam de 60 MJ/kg para 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. O valor que eu utilizei é da Associação do Alumínio [y5as53]: 150 MJ por kg de alumínio (40 kWh/kg).

- A energia embutida de uma garrafa de água feita de PET. Fonte: Hammond e Jones (2006) – a energia embutida do PET é 30 kWh por kg.
 - Um britânico de classe média joga fora 400 g de embalagens por dia. Em 1995, a Grã-Bretanha consumiu 137 kg de embalagens por pessoa (Hird et al. 1999).
 - Um computador pessoa custa 1800 kWh de energia. A fabricação de um PC requer (em energia e materiais brutos) o equivalente a 11 vezes seu próprio peso em combustíveis fósseis. Refrigeradores necessitam 1-2 vezes o seu peso. Williams (2004); Kuehr (2003).
 - Uma bateria recarregável de níquel-cádmio. Fonte: Rydh e Karlström (2002).
 - ... aço... Da Swedish Steel, “O consumo de carvão e refrigerante cola é de 700 kg por tonelada de aço terminado, igual a aproximadamente 5320 kWh por tonelada de aço terminado. O consumo de petróleo, GLP e potência elétrica é de 710 kWh por tonelada de produto finalizado. Total [primário] consumo de energia é então aproximadamente 6000 kWh por tonelada de aço finalizado”. (6 kWh por kg.) [y2ktgg]
- 114 A energia embutida de um carro novo é 76 000 kWh. Fonte: Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) dá um valor mais baixo: 30 500 kWh para o custo energético do ciclo de vida de um carro. Uma razão para a diferença pode ser que esta última análise de ciclo de vida assume que o veículo seja reciclado, reduzindo então o custo com materiais brutos.
- 113 Papel possui uma energia embutida de 10 kWh por kg. Produzir jornais de madeira virgem possui um custo energético de cerca de 5 kWh/kg; e o papel em si possui um conteúdo energético similar ao da madeira, cerca de 5 kWh/kg. (Fonte: Ucuncu (1993); Erdinçler e Vesilind (1993, veja páginas X.) Custos energéticos variam entre os moinhos e os países. 5 kWh/kg é o valor para um moinho de papel sueco em 1973 de Norrström (1980), que estimou que as medidas de eficiência poderiam reduzir os custos em cerca de 3,2 kWh/kg. Uma análise de ciclo de vida mais recente (Denison, 1997) estimou que o custo de produção de um jornal nos Estados Unidos, a partir de madeira virgem seguido por uma mistura típica de disposição em aterro e incineração, seja de 12 kWh/kg; o custo de produção de um jornal feito de material reciclável e reciclá-lo é de 6 kWh/kg.
- 115 A intensidade energética do transporte por rodovias no Reino Unido é de cerca de 1 kWh por ton-km. Fonte: www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablepublications/energyenvironment.
- A intensidade do frete por este navio de carga é de 0,15 kWh por ton-km. O *Ever Uberthy* – comprimento de 285 m, largura de 40 m – possui uma capacidade de 4948 TEUs, peso morto de 63 000 tons, e uma velocidade de trabalho de

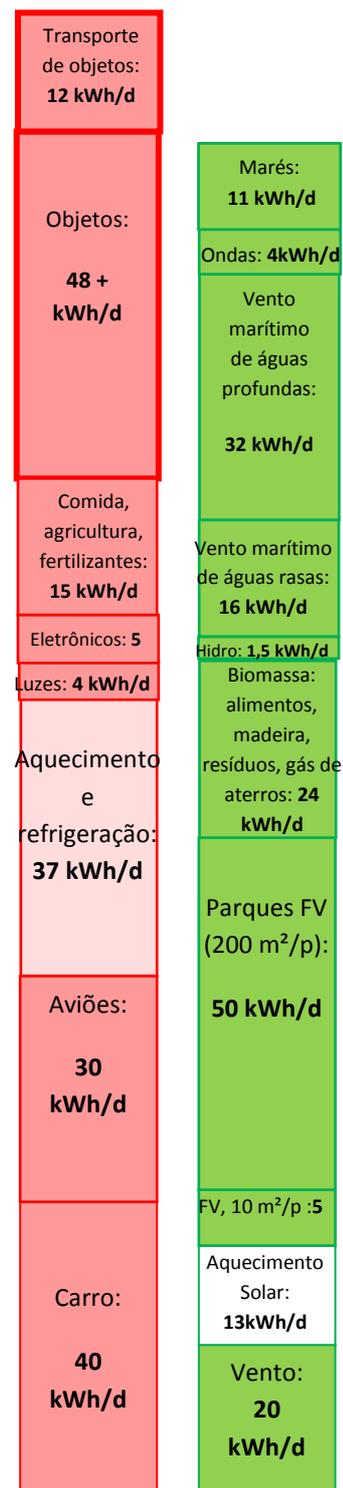


Figura 15.11. Produzir as nossas coisas custa pelo menos 48 kWh/d. Entregar as nossas coisas custa 12 kWh/d.

25 nós; sua potência fornecida ao motor é de 44 MW. Um TEU é o tamanho de um pequeno contêiner de 20-pés – cerca de 40m³. A maioria dos contêineres que você vê hoje em dia são de 40-pés com um tamanho de 2 TEUs. Um contêiner de 40-pés pesa 4 toneladas e pode carregar 26 toneladas de objetos. Assumindo que seu motor tenha uma eficiência de 50%, o consumo energético deste navio é de 0,015 kWh de energia química por ton-km. www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html.

- **A porção da Grã-Bretanha na navegação internacional...** Fonte: Anderson et al. (2006).



- 116 **Figura 15.8. Consumos energéticos de navios.** Os cinco pontos na figura são navios de carga (46 km/h), um navio de carga seca (24 km/h), um petroleiro (29 km/h), um navio da marinha (24 km/h), e o NS Savannah (39 km/h).

Navio de carga seca: 0,08 kWh/t-km. Um navio com uma capacidade de grãos de 5200 m³ carrega 3360 toneladas de peso morto. (As toneladas de peso morto são a massa de carga que o navio pode carregar.) Ele viaja a uma velocidade de 13 nós (24 km/h); seu único motor com 2 MW de potência fornecida consome 186 g de combustível a base de petróleo por kWh de energia fornecida (42% de eficiência). conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm

Petroleiro: Um petroleiro moderno consome 0,017 kWh/ton-km [6lbrab]. O peso de carga é de 40 000 ton. Capacidade: 47 000 m³. Motor principal: 11,2 MW de potência máxima fornecida. Velocidade a 8,2 MW: 15,5 nós (29km/h). A energia contida no petrolífero é 520 milhões de kWh. Então 1 % da energia no petróleo é utilizada no transporte do petróleo por um quarto do caminho ao redor da Terra (10 000 km).

Super Cargueiros Ro-Ro: Os navios da companhia de navegação Wilh. Wilhelmsem fornecem transporte de carga com um custo energético entre 0,028 e 0,05 kWh/ton-km [5ctx4k].

- 116 **O fornecimento de água e tratamento de esgoto custam 0,4 kWh/d por pessoa.** O uso total de energia pela indústria de água em 2005-6 foi de 7703 GWh. Fornecer 1 m³ de água possui um custo energético de 0,59 kWh. Tratar 1 m³ de esgoto possui um custo energético de 0,63 kWh. Para qualquer um interessado em emissões de gases de efeito estufa, o fornecimento de água possui uma pegada de 289 g CO₂ por m³ de água fornecida e o tratamento de águas residuais 406 g de CO₂ por m³ de águas residuais.

O consumo doméstico de água é de 151 litros de água por pessoa. O consumo total de água é 221 l/d por pessoa. Vazamentos somam 57 litros por dia por pessoa. Fontes: Escritório de Ciência e Tecnologia Parlamentar [

www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf,
Água, Reino Unido (2006).

117 Os supermercados no Reino Unido consomem 11 TWh/ano.
[yqbz13]

- Helm et al. sugere que, considerando as importações e exportações, a pegada de carbono da Grã-Bretanha é quase *dobrada* para 21 toneladas. Helm et al.(2007).

16 Geotérmica

A energia geotérmica vem de duas fontes: do decaimento radioativo na crosta da Terra e do calor escorrendo pelo manto do núcleo da Terra. O calor no núcleo está lá porque a Terra costumava ser muito quente, e ela ainda está se resfriando e solidificando; o calor no núcleo também está sendo complementado pelo atrito das marés: a Terra se flexiona em resposta aos campos gravitacionais da lua e do sol, da mesma forma que uma laranja muda de forma se você pressioná-la e rolá-la entre suas mãos.

A geotérmica é uma renovável atrativa porque “está sempre ligada”, independente do clima; se nós fizermos estações de potência geotérmicas, nós podemos ligá-las e desligá-las de acordo com a demanda.

Mas quanta potência geotérmica está disponível? Nós podemos estimar a potência geotérmica de dois tipos: a potência disponível em uma localização específica normal da crosta terrestre; e a potência disponível em pontos quentes especiais como a Islândia (figura 16.3). Enquanto o local certo para desenvolver primeiro a tecnologia geotérmica são definitivamente alguns pontos críticos especiais, como a Islândia, eu assumirei que a maior parte do fornecimento total vem de localidades comuns, uma vez que localidades comuns são bem mais numerosas.

A dificuldade em produzir potência geotérmica *sustentável* é que a velocidade nas quais os níveis de calor viajam pelas rochas sólidas limitam a taxa na qual o calor pode ser sustentavelmente sugado do interior quente da Terra. É como tentar beber um líquido parcialmente congelado por um canudinho. Você suga o canudinho e suga, e logo fica com a boca cheia de líquido. Porém após continuar sugando por mais um tempo, você se encontrará sugando apenas ar. Você extraiu todo o líquido do gelo que estava em volta do canudo. A sua taxa inicial quando sugava não era sustentável.

Se você enfiar um canudo por 15 km na terra, você descobrirá que é legal e quente lá, facilmente quente o suficiente para ferver água. Então você poderia enfiar dois canudos lá para baixo, e bombear água fria para baixo por um deles e sugá-la com o outro. Você estará puxando vapor para cima, e você pode fazer com que ele mova uma estação de potência. Potência ilimitada? Não. Após um tempo, sua extração de calor da rocha terá diminuído a temperatura da rocha. Você não estava extraindo sustentavelmente. Agora

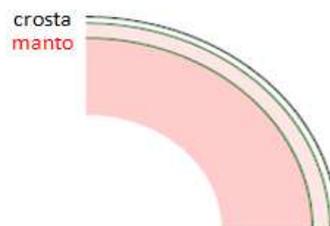


Figura 16.1. A Terra em seção.



Figura 16.2. Granito

você tem que esperar bastante tempo até que a rocha na ponta dos seus canudos se aqueça novamente. Uma atitude possível para este problema é tratar o calor da geotérmica da mesma forma que nós tratamos atualmente os combustíveis fósseis: como uma fonte a ser minerada e não coletada sustentavelmente. Viver do calor geotérmico desta forma pode ser melhor para o planeta do que viver insustentavelmente através de combustíveis fósseis; mas talvez seja apenas outro tapa-buracos que nos dê mais uns 100 anos de vida insustentável? Neste livro eu estou mais interessado em energias *sustentáveis*, como o título indica. Vamos fazer as contas.



Figura 16.3. Potência geotérmica na Islândia. A geração de eletricidade por fonte geotérmica na Islândia (população, 300 000) em 2006 foi de 300 MW (24 kWh/d por pessoa). Mais da metade da produção de eletricidade da Islândia é utilizada para a produção de alumínio. Foto por Gretar Ívarsson.

Potência geotérmica que pode ser sustentável para sempre

Primeiro imagine usar a energia geotérmica ao cravar canudos a uma profundidade adequada, e sugar *gentilmente*. Sugar a uma taxa que não faça com que as rochas no final dos nossos canudos não fiquem cada vez mais frias. Isto significa sugar a uma taxa natural na qual o calor já está fluindo da terra.

Como eu disse antes, a energia geotérmica vem de duas fontes: do decaimento radioativo na crosta da Terra e do calor passando pelo manto do núcleo da Terra. Em um continente típico, o fluxo de calor vindo do centro da Terra pelo manto é cerca de 10 mW/m². O fluxo de calor na superfície é 50 mW/m². Então o decaimento radioativo adiciona 40 mW/m² extras ao fluxo de calor do centro.

Então em uma localidade típica, a potência máxima que nós podemos extrair por unidade de área é 50 mW/m². Mas esta potência não é potência de alto-nível, mas sim calor de baixo-nível que está indo para cima, chegando aqui em cima na temperatura ambiente. Nós presumivelmente queremos

Um miliwatt (1 mW) é 0,001 W.

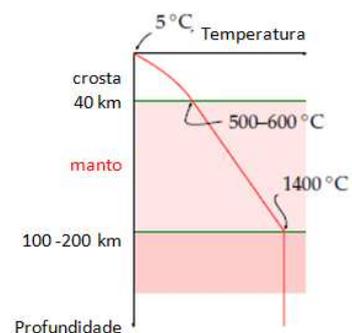


Figura 16.4. Perfil de temperatura em um continente típico.

produzir eletricidade, e é por isto que nós precisamos perfurar a terra. Calor só é útil quando vem de uma fonte a uma temperatura maior do que a temperatura ambiente. A temperatura aumenta com a profundidade, como mostrado na figura 16.4, atingindo uma temperatura de cerca de 500°C a uma profundidade de 40 km. Entre as profundidades de 0 km onde o fluxo de calor é maior, mas a temperatura da rocha é muito baixa, e 40 km, onde as rochas estão muito quentes mas o fluxo de calor é 5 vezes menor (porque nós estamos perdendo todo o calor gerado pelo decaimento radioativo) existe uma profundidade ótima através da qual nós devemos extrair calor. A exata profundidade ótima dependerá de que tipo de aparelhagem para sugar e de estação de potência nós usaremos. Nós podemos chegar na máxima potência sustentável ao achar a profundidade ótima assumindo que nós tenhamos uma máquina ideal para transformar calor em eletricidade, e que podemos perfurar até qualquer profundidade.

Para o perfil de temperatura mostrado na figura 16.4, eu calculei que a profundidade ótima é cerca de 15 km. Sob estas condições, uma máquina de calor ideal forneceria 17 mW/m². Com a densidade populacional de 43 pessoas por km², isto são 10 kWh/d por pessoa, se toda a área de terra fosse utilizada. No Reino Unido, a densidade populacional é cinco vezes maior, então a potência geotérmica em larga-escala desta variação sustentável para sempre poderia oferecer no máximo **2 kWh/dia por pessoa**.

Este é o valor de sustentabilidade para sempre, ignorando pontos quentes, assumindo estações de potência perfeitas, assumindo que cada metro quadrado do continente fosse explorado, e assumindo que não há custos com a perfuração. E que é possível perfurar buracos de 15 km de profundidade.

Potência geotérmica como mineração

A outra estratégia geotérmica é tratar o calor como um recurso a ser minerado. Na “extração geotérmica aprimorada” de pedras quentes secas (figura 16.5), nós primeiramente perfuramos a uma profundidade de 5 ou 10 km, e quebramos as rochas com o bombeamento de água. (Este passo pode ocasionar terremotos, o que não é bem aceito pela população local.) Então nós perfuramos um segundo poço na zona de fratura. Então nós bombeamos água para baixo por um poço e extraímos vapor superaquecido pelo outro. Este vapor pode

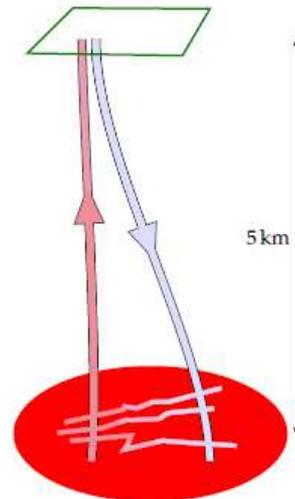


Figura 16.5. Extração geotérmica aprimorada de rochas secas e quentes. Um poço é perfurado e pressurizado para criar fraturas. Um segundo poço é perfurado do outro lado da zona de fratura. A água fria é então bombeada para baixo por um poço e a água quente (na verdade, vapor) é sugada do outro.



ser utilizado para produzir eletricidade ou para fornecer calor diretamente. Qual é a fonte de rochas quentes e secas do Reino Unido? Infelizmente, a Grã-Bretanha não é bem dotada. A maioria das rochas estão concentradas em Cornwall, onde alguns experimentos geotérmicos foram realizados em 1985 em uma instalação de pesquisa em Rosemanowes, agora fechada. Consultantes que acessaram esses experimentos concluíram que “a geração de eletricidade a partir de rochas quentes e secas era improvável de ser tecnicamente ou comercialmente viável em Cornwall, ou em qualquer outro lugar no Reino Unido, em curto ou médio prazo.” No entanto, qual é o recurso? A maior estimativa para recursos de rochas quentes e secas no Reino Unido é de uma energia total de 130 000 TWh, o que, de acordo com os consultantes, poderiam concebermente contribuir com **1,1 kWh por dia por pessoa** de eletricidade nos próximos 800 anos.

Outros locais no mundo possuem rochas quentes secas mais promissoras, então se você quer saber as respostas geotérmicas para outros países, esteja certo de perguntar o local. Mas infelizmente para a Grã-Bretanha, a geotérmica pagará apenas uma pequena parte.

Southampton já não usa a energia geotérmica? Quanto ela fornece?

Sim, o Plano de Aquecimento Geotérmico do Distrito de Southampton foi, em 2004, pelo menos, o único esquema de aquecimento geotérmico do Reino Unido. Ele alimenta a cidade com água quente. O poço geotérmico é parte de uma combinação de calor, potência e sistema de refrigeração que fornece água quente e resfriada para os consumidores, e vende eletricidade para a rede elétrica. A energia geotérmica contribui em 15% dos 70 Gwh de calor por ano fornecido por este sistema. A população de Southampton no último censo era de 217 445, então a potência geotérmica sendo fornecida em Southampton é de **0,13 kWh/d por pessoa**.

Observações e Leitura Complementar

Nº da página

123 O fluxo de calor na superfície é de 50 mW/m². O Instituto de Tecnologia de Massachussets (2006) disse que 59 mW/m² é uma média, com uma faixa, nos Estados Unidos da América, entre 25 mW/m² e 150 mW/m². Shepherd (2003) dá 63 mW/m².

123 “A geração de potência elétrica a partir de rochas quentes secas era improvável de ser tecnicamente ou

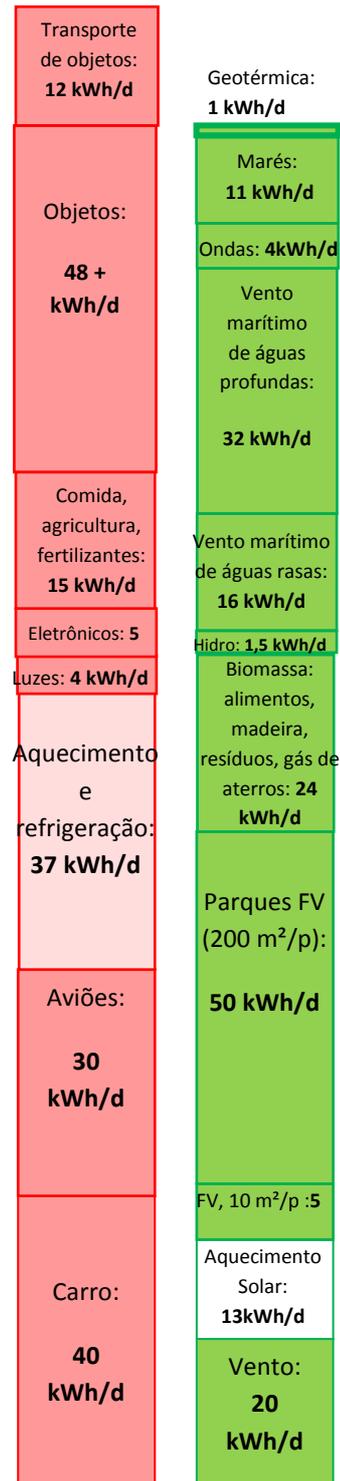


Figura 16.6. Geotérmica

- comercialmente viável no Reino Unido”. Fonte: MacDonald et al. (1992). Veja também Richards et al. (1994).
- A maior estimativa de recursos de rochas quentes secas no Reino Unido... poderia concebivelmente contribuir com 1,1 kWh por dia por pessoa de eletricidade pelos próximos 800 anos. Fonte: MacDonaldis et al. (1992).
 - Outros lugares no mundo possuem rochas quentes secas mais promissoras. Existe um bom estudo (Instituto de Tecnologia de Massachussets, 2006) descrevendo o recurso de rochas quentes secas dos Estados Unidos. Uma outra abordagem mais especulativa, pesquisada pelos Laboratórios Nacionais Sandia a década de 1970, é perfurar até chegar ao magma a temperaturas de 600-1300°C, talvez à 15 km de profundidade, e tirar a potência de lá. O *website* www.magma-power.com reconhece que o calor em piscinas de magma sobre os Estados Unidos poderiam cobrir o consumo energético dos Estados Unidos por 500 ou 5000 anos, e que poderia ser extraído de maneira econômica.
 - A Planta de Aquecimento do Distrito de Southampton. www.southampton.gov.uk.

17 Serviços Públicos

Cada arma que é feita, cada navio de guerra que é lançado, cada foguete que é lançado significa, em último sentido, um roubo daqueles que passam fome e não são alimentados, daqueles que passam frio e não possuem roupas.

As armas deste mundo não estão gastando apenas dinheiro. É o gasto de suor das pessoas que trabalham nelas, da genialidade dos cientistas, das esperanças de suas crianças.

Presidente Dwight D. Eisenhower – Abril de 1953.



O custo energético da “defesa”

Vamos tentar estimar quanta energia nós gastamos com os nossos militares.

Em 2007-8, a fração dos gastos do governo central britânico que foram para a defesa foi de £33 bilhões/ £587 bilhões = 6%. Se nós incluirmos os gastos do Reino Unido com anti-terrorismo e inteligência (2,5 bilhões por ano e aumentando), as atividades totais de defesa terão gasto £36 bilhões.

Como uma estimativa crua nós poderemos estimar que 6% destes £36 bilhões são gastos em energia a um custo de 2,7 p por kWh. (6% é a fração de GDP que é gasta em energia e 2,7 p é o preço médio da energia.) Isto nos dá cerca de 80 TWh por ano de energia indo para a defesa: fabricar balas, bombas, armas nucleares, fazer aparelhos para liberar essas balas, bombas e armas nucleares; e rugindo ao redor e mantendo-se engatilhada para o próximo jogo de bem-versus-mal. Nas nossas unidades preferidas, isto corresponde a **4 kWh por dia por pessoa**.

O custo da defesa nuclear

As despesas financeiras dos Estados Unidos na fabricação e implementação de armas nucleares de 1945 a 1996 foram de \$5,5 trilhões(em 1996 em dólares).

Os gastos com armas nucleares neste período excederam os gastos totais federais combinados para educação; agricultura; treinamento, emprego e serviços sociais; recursos naturais e meio ambiente; ciência geral, espacial e tecnologia; desenvolvimento regional e comunitário

(incluindo socorro); aplicação da lei; e produção e regulamentação de energia.

Se novamente nós assumirmos que 6% destes gastos foram para energia a um custo de 5¢ por kWh, nós descobrimos que o custo energético de possuímos armas nucleares foi de 26 000 kWh por norte-americano, ou **1,4 kWh por dia por norte-americano** (dividido entre 250 milhões de pessoas por 51 anos).

Que energia nós teríamos fornecida para os sortudos atingidos, se todas essas armas nucleares tivessem sido utilizadas? As energias das maiores armas termonucleares desenvolvidas pelos Estados Unidos e pela Rússia são medidas em megatoneladas de TNT. Uma tonelada de TNT são 1200 kWh. A bomba que destruiu Hiroshima tinha uma energia de 15 000 toneladas de TNT (18 milhões de kWh). Uma bomba *megatônica* fornece uma energia de 1,2 bilhões de kWh. Se lançada em uma cidade de um milhão de habitantes, uma bomba megatônica faz uma doação de energia de 1200 kWh por pessoa, o equivalente a 120 litros de petróleo por pessoa. O uso energético total do arsenal nuclear dos EUA hoje em dia é de 2400 megatoneladas, contidos em 10 000 ogivas. Nos bons e velhos dias, quando as pessoas realmente levavam a defesa a sério, o arsenal energético era de 20 000 megatoneladas. Estas bombas, se utilizadas, teriam uma energia liberada de cerca de 100 000 kWh por norte-americano. Isto é o equivalente a 7 kWh por dia por pessoa por uma duração de 40 anos – similar a toda a eletricidade fornecida aos Estados Unidos por energia nuclear.

O custo de produzir materiais nucleares para as bombas

Os principais materiais nucleares são plutônio, do qual os EUA produziram 104 ton, e urânio altamente enriquecido (UAE), dos quais os EUA produziram 994 ton. Fabricar estes materiais requer energia.

As indústrias de produção de plutônio mais eficientes usam 24 000 kWh de calor ao produzir 1 g de plutônio. Então o custo energético direto da produção das 104 toneladas de plutônio dos Estados Unidos (1945-1996) foi de pelo menos 2,5 trilhões de kWh o que é 0,5 kWh por dia por pessoa (se divididos entre os 250 milhões de americanos).

O principal custo energético na manufatura de UAE é o custo do enriquecimento. Trabalho é necessário para separar os átomos ^{235}U e o ^{238}U em urânio natural para criar um

produto final que seja mais rico no ²³⁵U. A produção dos EUA de 994 toneladas de urânio altamente enriquecido (o total dos Estados Unidos, de 1945 – 1996) possuiu um custo energético de cerca de 0,1 kWh por dia por pessoa.

“A Trident cria empregos.” Bem, revestir as nossas escolas com amianto também, mas isto não quer dizer que nós devamos fazer isto!
 Marcus Brigstocke

Universidades

De acordo com o *Times Higher Education Supplement* (30 de Março de 2007), as universidades do Reino Unido consomem 5,2 bilhões de kWh por ano. Dividindo-se isto entre toda a população, tem-se uma potência de **0,24 kWh por dia por pessoa**.

Então o ensino superior e a pesquisa parecem possuir um custo energético muito menor do que os jogos de guerra. Podem existir outros serviços públicos dos quais nós poderíamos falar, mas neste ponto eu gostaria de concluir a nossa corrida entre as pilhas vermelha e verde.

Observações e Leitura Complementar

N pg

127 **Orçamento militar.** O orçamento do Reino Unido pode ser encontrado em [yttg7p]; a defesa ganha £33,4 bilhões [fcqfw] e serviços de inteligência e anti-terrorismo £2,5 bilhões por ano [2e4fcs]. De acordo com a p14 dos Planos de Gastos do Governo de 2007/8 [33x5kc], o “orçamento de recursos total” do Departamento de Defesa é uma soma maior, £39 bilhões, dos quais £33,5 bilhões vão para a “provisão de capacidade de defesa” e £6 bilhões para o pagamento das forças armadas e pensões bem como pensões de guerra. Um detalhamento desse orçamento pode ser encontrada em: [35ab2c]. Veja também [yg5fsj], [yfgjna] e www.conscienceonline.org.uk.

O consumo energético do Exército do Reino Unido é publicado: “O Departamento de Defesa é o maior consumidor de energia nos Estados Unidos. Em 2006, ele gastou \$13,6 bilhões para comprar 110 barris de combustível de petróleo [aproximadamente 190 bilhões de kWh] e 3,8 bilhões de kWh de eletricidade” (Depto. de Defesa, 2008). Estes valores descrevem o uso direto de combustível e eletricidade e não inclui a energia embutida



Figura 17.1 O custo energético da defesa no Reino Unido é estimado como sendo cerca de 4 kWh por dia por pessoa.

nos brinquedos dos militares. Dividindo-se pela população dos EUA de 300 milhões, têm-se **1,7 kWh/d por pessoa**.

- As despesas financeiras dos Estados Unidos na fabricação e implementação de armas nucleares de 1945 a 1996 foram de \$5,5 trilhões (em 1996 em dólares). Fonte: Schwartz (1998).

128 O custo energético da produção de plutônio. [slbae]

- A produção dos EUA de 994 toneladas de UAE... Material enriquecido entre 4% e 5% de ^{235}U é chamado de urânio pouco enriquecido (UPE). Urânio enriquecido em 90% é chamado de urânio altamente enriquecido (UAE). Leva três vezes mais tempo para enriquecer urânio do seu estado natural para para 5% UPE do que para enriquecer UPE para 90% UAE. A indústria de potência nuclear mede estas necessidades energéticas em uma unidade chamada unidade de trabalho separado (*separative work unit* – SWU). Para produzir um quilograma de ^{235}U como UAE precisa-se de 232 SWU. Para produzir um quilograma de ^{235}U como UPE (em 22,7 kg de UPE) necessita-se de 151 SWU. Em ambos os casos o processo se inicia com o urânio natural (0,71% ^{235}U) e se descarta urânio esgotado contendo 0,25% ^{235}U .

O mercado de combustível nuclear comercial avalia o SWU em cerca de \$100. Precisa-se de cerca de 100 000 SWU para enriquecer urânio para combustível em um reator nuclear comercial típico de 1000 MW por um ano. Dois métodos de enriquecimento de urânio estão atualmente em uso comercial: difusão gasosa e centrífuga de gás. O processo de difusão gasosa consome cerca de 2500 kWh por SWU, enquanto plantas modernas de centrífugas de gás necessitam de apenas 50 kWh por SWU. [yh45h8], [t2948], [2ywzee]. Uma centrífuga moderna produz cerca de 3 SWU por ano.

A produção dos UAE de 994 toneladas de urânio altamente enriquecido (o total dos Estados Unidos, de 1945- 1996) custou 230 milhões de SWU, o equivalente a 0,1 kWh/d por pessoa (assumindo-se 250 milhões de norte-americanos, e usando 2500 kWh/SWU como o custo do enriquecimento por difusão).



18 Nós podemos viver com renováveis?

A pilha vermelha na figura 18.1 soma **195 kWh por dia por pessoa**. A pilha verde soma **180kWh/d/p**. Chegou perto! Mas por favor lembre-se: ao calcular a nossa pilha de produção nós desconsideramos todas as restrições econômicas, sociais e ambientais do vento. Além disso, alguns dos nossos contribuintes verdes provavelmente são incompatíveis uns com os outros: nossos painéis fotovoltaicos e painéis de água quente colidiriam uns com os outros nos nossos telhados; e os nossos parques solares fotovoltaicos utilizando 5% do país colidiriam com as plantações energéticas que cobririam 75% de todo o país. Se nós fossemos perder apenas um dos nossos maiores contribuintes verdes – por exemplo, se nós decidíssemos que a eólica marinha profunda não é uma opção, ou que ocupar 5% do país com fotovoltaicas a um custo de £200 000 por pessoa não é razoável – então a pilha de produção não seria mais próxima da pilha de consumo.

Além disso, mesmo se a nossa pilha vermelha de consumo fosse menor do que a nossa pilha de produção verde, isto não significaria necessariamente que as nossas somas energéticas estão se fechando. Você não pode alimentar uma TV com comida de gato, assim como você não pode alimentar a um gato através de uma turbina eólica. A energia existe em diferentes formas – química, elétrica, cinética e térmica, por exemplo. Para um plano energético sustentável se fechar, nós precisamos que ambas as formas e quantidades de consumo energético e produção sejam equivalentes. Converter energia de uma forma para outra – da química para elétrica, como em uma estação de potência movida a combustíveis fósseis, ou da elétrica para a química, como em uma fábrica produzindo hidrogênio a partir da água – geralmente envolve perdas substanciais de energia útil. Nós voltaremos para este importante detalhe no Capítulo 27, que descreverá alguns planos energético que realmente ajudam.

Aqui nós refletiremos nas nossas estimativas de consumo e produção, compará-los com as médias oficiais e com estimativas feitas por outras pessoas, e discutir quanta potência as renováveis poderiam realmente fornecer em um país como a Grã-Bretanha.

As questões que responderemos neste capítulo são:

1. O tamanho da pilha vermelha está aproximadamente correto? Qual é o consumo *médio* na Grã-Bretanha?

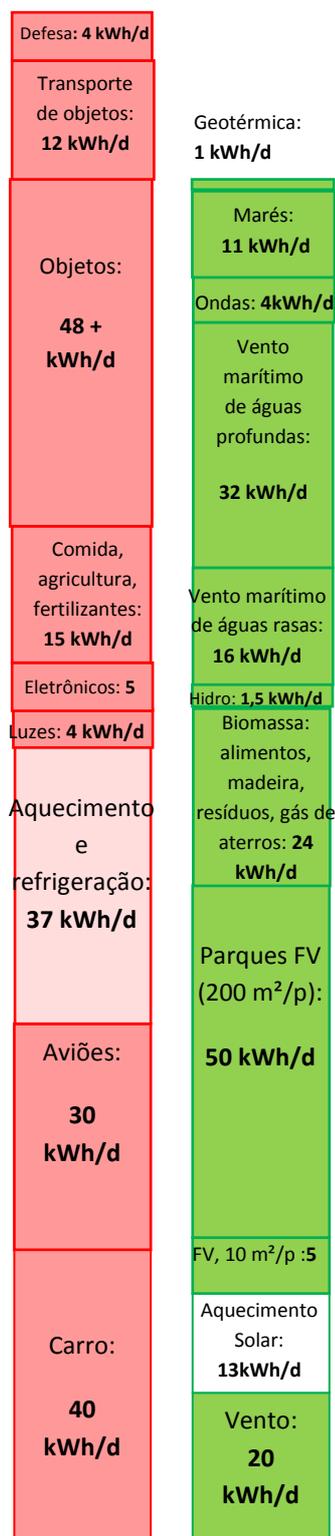


Figura 18.1. O resultado do jogo após nós adicionarmos as renováveis tradicionais.

Nós olharemos para os números oficiais de consumo energético para a Grã-Bretanha e para alguns outros países.

2. Eu fui injusto com as renováveis, subestimando o potencial delas? Nós compararemos as estimativas na pilha verde com estimativas publicadas por organizações como a Comissão de Desenvolvimento Sustentável, O Instituto de Engenharia Elétrica, e o Centro de Tecnologia Alternativa.
3. O que acontece à pilha verde quando nos levamos em conta restrições sociais e econômicas?

Reflexões Vermelhas

Nossa estimativa de consumo para uma pessoa de classe média (figura 18.1) atingiu **195 kWh por dia**. De fato, é verdade que muitas pessoas realmente usam essa quantidade de energia, e que muitas aspiram atingir este nível de consumo. Um norte-americano *de classe média* consome cerca de **250 kWh por dia**. Se todos nós aumentássemos o nosso nível de consumo para o nível de um norte-americano de classe média, a pilha verde de produção seria completamente tolhida pela pilha vermelha de consumo.

E quanto ao europeu de classe média e ao britânico de classe média? O consumo de “energia primária” (que significa a energia contida em combustíveis brutos, mais eólica e hidroeletricidade) de um europeu de classe média é cerca de **125 kWh por dia por pessoa**. A média do Reino Unido também é **125 kWh por dia por pessoa**.

Estas médias oficiais não incluem dois fluxos de energia. Primeiramente, a “energia embutida” em objetos *importados* (a energia gasta em produzir os objetos) não está inclusa. Nós estimamos no Capítulo 15 que a energia embutida dos objetos importados é de pelo menos 40 kWh/d por pessoa. Segundo, as estimativas oficiais de “consumo de energia primária” incluem apenas os fluxos industriais de energia – coisas como combustíveis fósseis e hidroeletricidade – e não rastreiam a real energia embutida nos alimentos: energia que foi originalmente aproveitada pela fotossíntese.

Outra diferença entre a pilha vermelha que nós montamos e o total nacional é que na maioria dos capítulos sobre consumo, nós tendemos a ignorar a perda de energia na conversão de uma forma de energia para outra, e no transporte de energia. Por exemplo, a estimativa do “carro” na Parte I cobriu apenas a energia no petróleo, não a energia

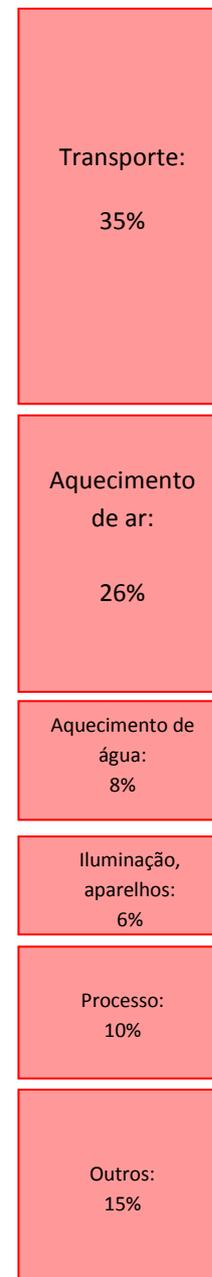


Figura 18.2. Consumo energético, dividido por finalidade de uso, de acordo com o Departamento da Indústria e do Comércio.

utilizada na refinaria de petróleo, nem a energia utilizada para levar o óleo e o petróleo de A para B. O total nacional contabiliza toda a energia, antes de qualquer perda por conversão. Perdas por conversão na verdade contabilizam por cerca de 22% do consumo energético nacional total. A maioria dessas perdas por conversão acontecem em estações de potência. Perdas na rede de transmissão de eletricidade tiram fora 1% do consumo nacional total de energia.

Ao construir a nossa pilha vermelha, nós tentamos imaginar quanta energia uma pessoa normal de classe média consome. Esta abordagem foi tendenciosa com relação à nossa percepção da importância das diferentes atividades? Vamos olhar para alguns números nacionais. A figura 18.2 mostra a divisão de consumo energético por finalidade de uso. As duas categorias do topo são transporte e aquecimento (ar quente e água quente). Estas duas categorias também dominam a pilha vermelha na Parte I. Ótimo.

Transporte rodoviário	Petróleo	22,5
Ferrovias	Petróleo	0,4
Transporte marítimo	Petróleo	1,0
Aviação	Petróleo	7,4
Todos os modos	Eletricidade	0,4
Toda energia usada para transporte		31,6

Figura 18.3. A divisão do consumo energético de 2006 pelo tipo de transporte, em kWh/d por pessoa.

Fonte: Depto de Transporte (2007).

Vamos olhar mais de perto para o transporte. Na nossa pilha vermelha, nós descobrimos que a pegada energética de dirigir um carro em 50 km por dia e de voar para a Cape Town uma vez por ano é praticamente a mesma. A Tabela 18.3 mostra a importância relativa dos diferentes modos de transporte no balanço nacional. Nas médias nacionais, a aviação é menor do que o transporte por rodovias.

Como o valor do consumo nacional da Grã-Bretanha se compara com aqueles de outros países? A figura 18.4 mostra os consumos de potência de vários países ou regiões, versus os seus produtos internos brutos (PIB). Há uma correlação evidente entre o consumo de potência e PIB: quanto maior o PIB de um país (per capita), maior a sua potência consumida per capita. O Reino Unido é um país com alto PIB, cercado pela Alemanha, França, Japão, Áustria, Irlanda, Suíça, e Dinamarca. A única exceção notável para a regra “grande PIB implica alto consumo de potência” é Hong Kong. O PIB per capita de Hong Kong é praticamente o mesmo da Grã-Bretanha, mas o consumo de potência de Hong Kong é de cerca de **80 kWh/d/p**.

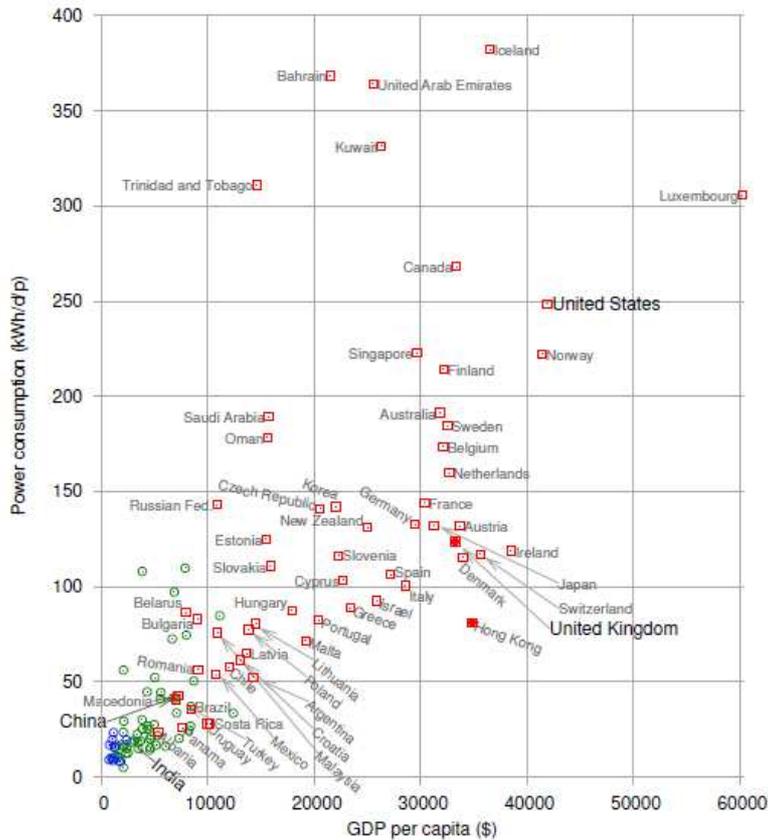


Figura 18.4. O consumo de potência per capita, versus PIB per capita, em poder de compra e, dólares americanos. Os quadrados mostram países que possuem “alto desenvolvimento humano”; os círculos, “médio” ou “baixo”. A figura 30.1 (p298) mostra os mesmos dados em escala logarítmica.



Figura 18.5. Hong Kong. Foto por Samuel Louie e Carol Spears.

A mensagem que eu absorvo destas comparações entre países é que o Reino Unido é um país bastante típico europeu, e então fornece um bom caso de estudo para a pergunta “como um país com alta qualidade de vida pode conseguir sua energia sustentavelmente?”

Reflexões Verdes

As pessoas dizem com frequência que a Grã-Bretanha possui muitas renováveis. Será que eu fui maldoso com a pilha verde? Será que os meus números estão muito errados? Será que eu subestimei a produção sustentável? Vamos comparar primeiro

os meus números verdes com várias estimativas feitas na publicação da Comissão de Desenvolvimento Sustentável *O Papel da Energia Nuclear em uma Economia de Baixo Carbono. Reduzindo as Emissões de CO₂ – Nuclear e as Alternativas*.¹⁶ Incrivelmente, mesmo que a Comissão de Desenvolvimento Sustentável seja bastante positiva sobre os recursos sustentáveis (“Nós temos grandes recursos de marés, ondas, biomassa e solar”), *todas as estimativas feitas no documento da Comissão de Desenvolvimento Sustentável são menores do que as minhas!* (Para ser preciso, todas as estimativas de energias renováveis são menores do que o meu total.) A publicação da Comissão de Desenvolvimento Sustentável fornece estimativas das nossas quatro fontes detalhadas abaixo (IEE, Tyndall, IAG e UDI). A figura 18.6 mostra as minhas estimativas junto com números destas quatro fontes e números do Centro de Tecnologia Alternativa¹⁷ (CAT). Aqui está uma descrição de cada fonte.

IEE O Instituto de Engenheiros Eletricistas¹⁸ publicou um relatório sobre energia renovável em 2002 – um sumário de contribuições possíveis das energias renováveis no Reino Unido. A segunda coluna da figura 18.6 mostra o “potencial técnico” de uma variedade de tecnologias renováveis para a geração de eletricidade do Reino Unido – “um limite superior que dificilmente será excedido mesmo com mudanças dramáticas na estrutura da nossa sociedade e economia”. De acordo com o IEE, o total de todo o potencial renovável tecnicamente possível é cerca de 27 kWh/d por pessoa.

Tyndall O Centro Tyndall estimou que o total de recurso energético útil é de 15 kWh/d por pessoa.

GAI O Grupo Interdepartamental de Análise¹⁹ estimou as o potencial das fontes renováveis, levando em conta as restrições econômicas. O total possível e econômico dos recursos (a um preço a varejo de 7 p/kWh) é 12 kWh por dia por pessoa.

UID A coluna da UID²⁰ mostra “os recursos indicativos de potencial para opções de geração de eletricidade

¹⁶ *The Role of Nuclear Power in a Low Carbon Economy. Reducing CO₂ Emissions – Nuclear and Alternatives.*

¹⁷ No original, *Center of Alternative Technology.*

¹⁸ No original, *Institute of Electrical Engineer.*

¹⁹ No original, IAG, *The Interdepartmental Analysis Group.*

²⁰ No original, PIU, *Performance and Innovation Unit.*

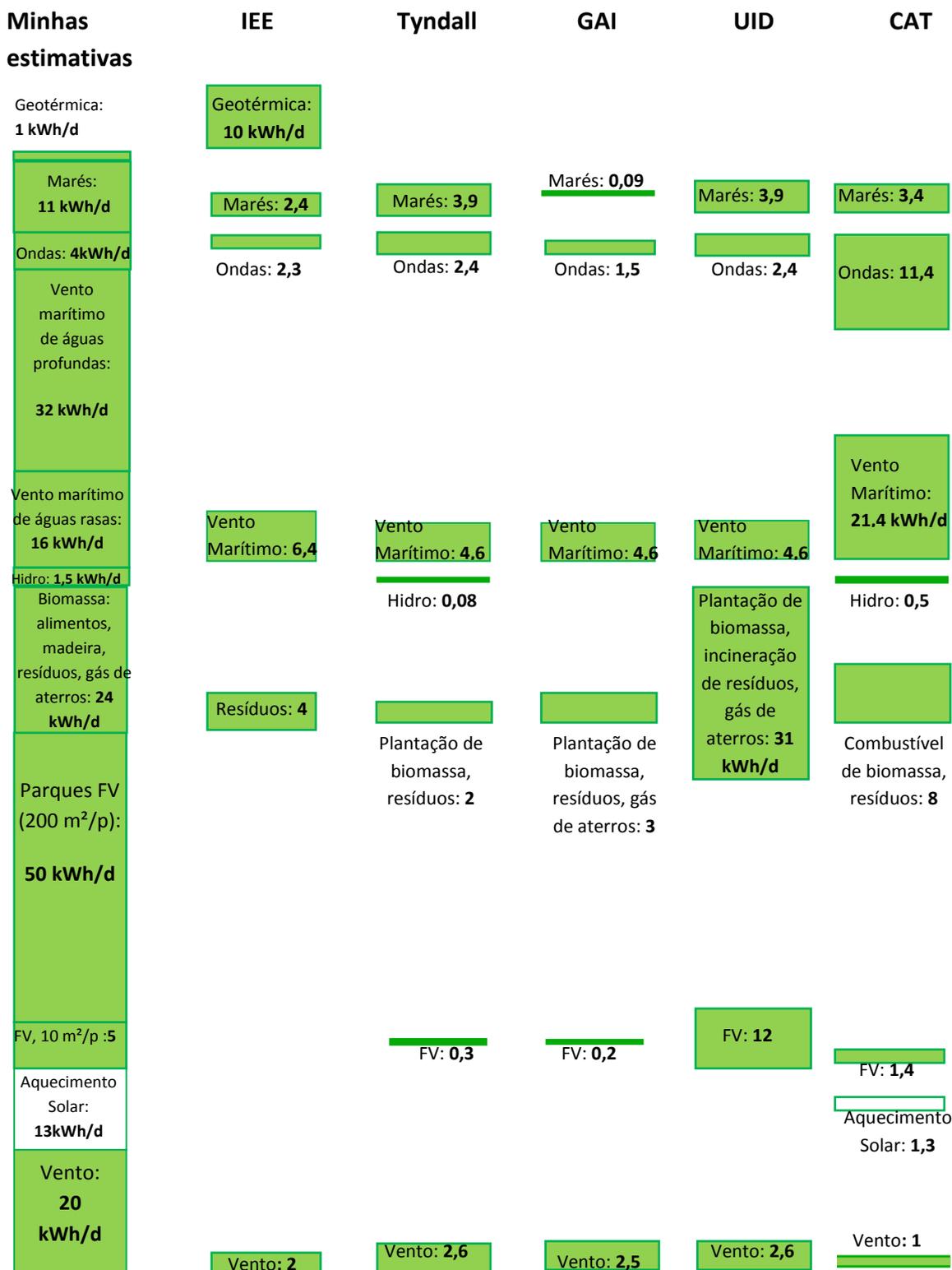


Figura 18.6. Estimativas teóricas ou praticamente viáveis sobre as fontes de energias renováveis no Reino Unido, de acordo com o Instituto de Engenheiros Eletricistas (IEE), o Centro Tyndall, o Grupo de Analistas Interdepartamental (GAI) e a Unidade de Inovação e Desempenho; e as propostas do plano para 2027 do Centro de Alternativas Tecnológicas (CAT) "Ilha Britânica".

renovável” a partir das contribuições do Departamento de Comércio e Indústrias e do boletim do UID em 2001.

Para cada tecnologia eu mostro o seu “máximo viável possível”, ou, se nenhum “máximo viável possível” é dado, o seu “máximo teórico”.

CAT A última coluna mostra os números do plano Helweg-Larsen e Bull, do Centro de Tecnologia Alternativa da “Ilha Britânica”.

Europa Bio-alimentada

Algumas vezes as pessoas me perguntam “mas nós com certeza poderíamos sobreviver apenas com renováveis antes da Revolução Industrial?” Sim, mas não se esqueça que duas coisas eram diferentes na época: os estilos de vida e as densidades populacionais.

Voltando o relógio para 400 anos atrás, a Europa sobrevivia quase que inteiramente a partir de recursos renováveis: principalmente madeira e plantações, complementados por um pouco de potência eólica, potência das marés e potência da água. Foi estimado que o estilo de vida de uma pessoa de classe média consumia uma potência de 20 kWh por dia. A madeira utilizada por pessoa era 4 kg por dia, o que necessitava 1 hectare (10 000 m²) de floresta por pessoa. A área de terra por pessoa na Europa nos anos 1700 era de 52 000 m². Nas regiões com maiores densidades populacionais, a área por pessoa era 17 500 m² de terra arável, pastos e madeira. Atualmente a área da Grã-Bretanha por pessoa é apenas 4000 m², então mesmo que nós revertêssemos o nosso estilo de vida para aquele da Idade Média e reflorestássemos completamente o país, nós não seríamos mais capazes de viver sustentavelmente. A nossa densidade populacional é muito alta.

Ambições verdes de encontro com a realidade social

A figura 18.1 é notícia antiga. Sim, tecnicamente a Grã-Bretanha possui “muitas” renováveis. Mas realisticamente, eu não acho que a Grã-Bretanha possa sobreviver por sua conta apenas com renováveis – pelo menos não do modo como nós vivemos atualmente. Eu parcialmente cheguei a essa conclusão pelo coro de oposição que vem de encontro a qualquer proposta grande de energia renovável. As pessoas amam energias renováveis, *a não ser que elas sejam maiores do que*

uma folha de figo. Se os britânicos são bons em alguma coisa, é em dizer “não”.

Parques eólicos? “Não, eles são feios e barulhentos.”

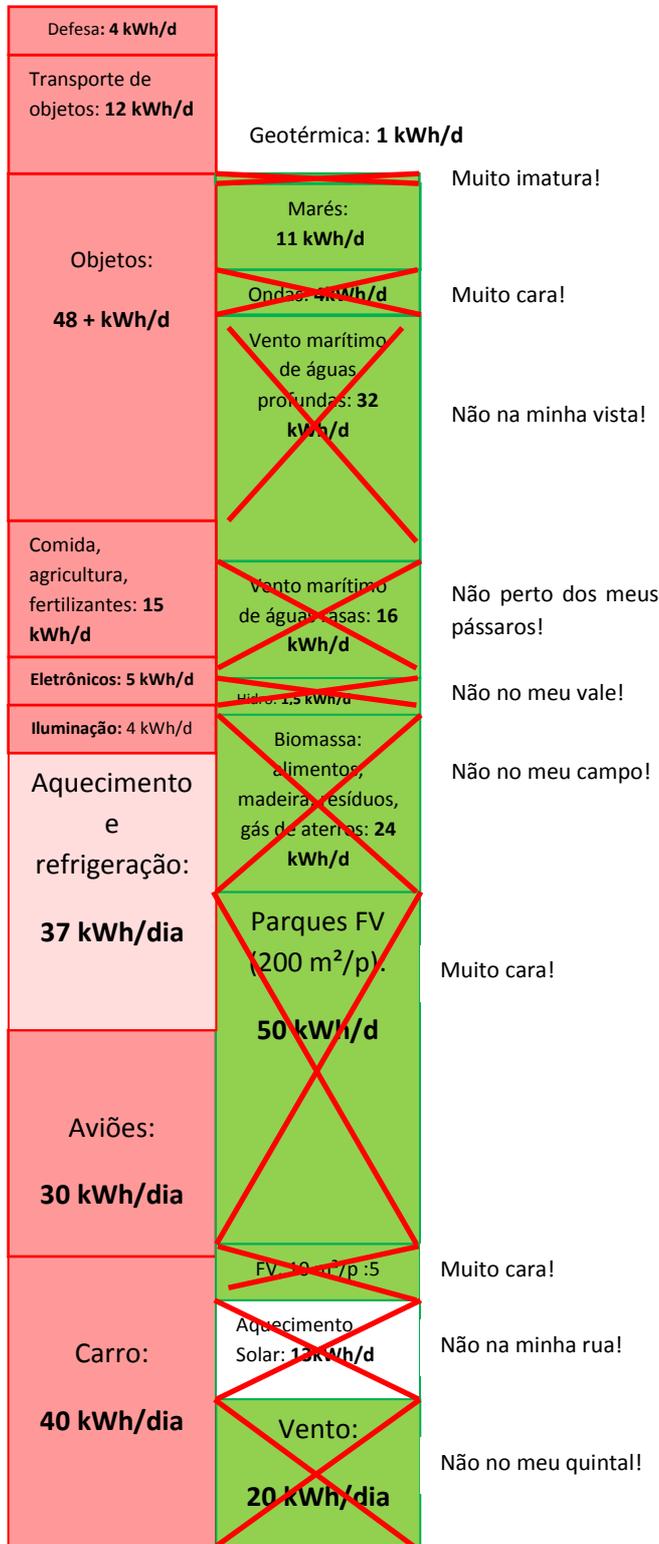
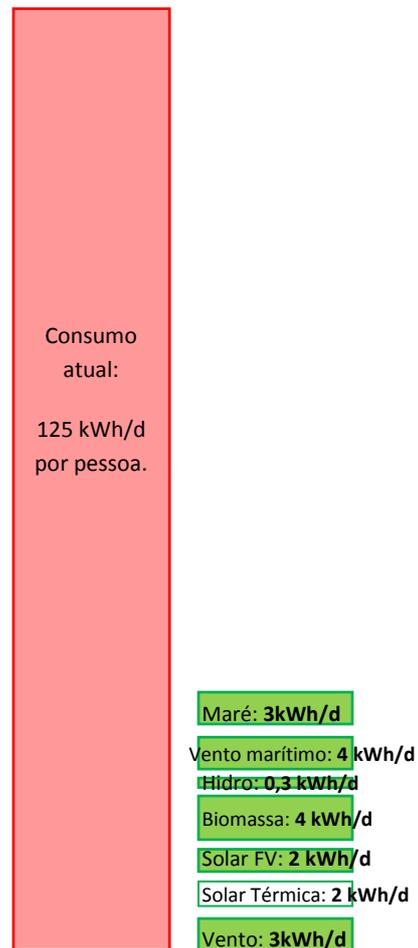


Figura 18.7. O resultado do jogo após nós adicionarmos as tradicionais renováveis, e então avaliarmos a opinião pública.



Após avaliação pública. Eu temo que o máximo que a Grã-Bretanha conseguirá extrair das renováveis seja de 18 kWh/d por pessoa (o número de consumo da coluna esquerda, 125 kWh/d por pessoa, por sinal, é o consumo médio britânico, excluindo as importações, e ignorando a energia solar absorvida na produção de alimentos.

Painéis solares nos telhados? “Não, eles estragariam a qualidade visual das ruas”

Mais florestas? “Não, isso destruiria os campos.”

Incineração de lixo? “Não, eu estou preocupado com os riscos à saúde, congestionamento no trânsito, poeira e barulho”

Hidroeletricidade? “Sim, mas desde que não seja *grande* – isto prejudica o meio ambiente”.

Eólica marítima? “Não, eu estou mais preocupado com as feias linhas de potência vindo para a costa do que com a invasão dos nazistas.”

Potência das ondas ou geotérmica? “Não, caro demais.”

Após todas essas objeções, eu temo que o máximo que a Grã-Bretanha conseguiria obter das renováveis seria algo como o que é mostrado no canto inferior direito da figura 18.7.

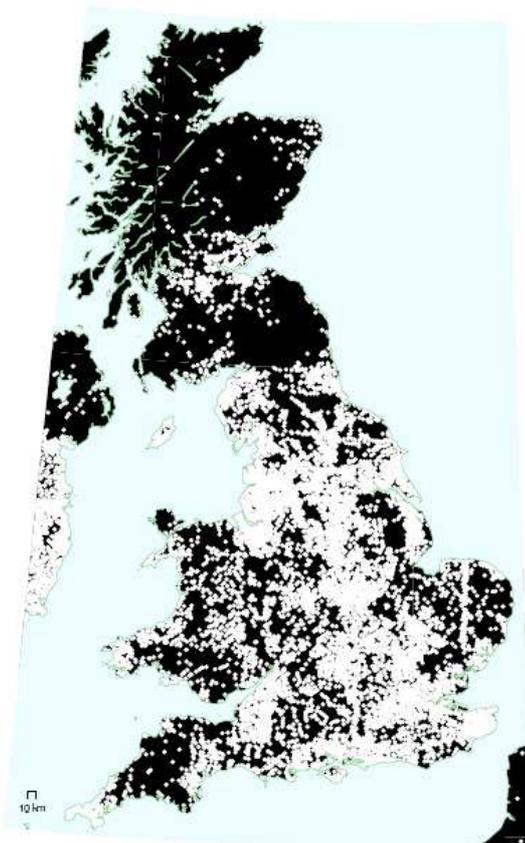


Figura 18.8. Onde as coisas selvagens estão. Um dos argumentos para vetar os parques eólicos é o barulho que eles fazem. Eu cortei fora deste mapa da ilha principal da Grã-Bretanha um raio de exclusão de 2 km que esteja rodeando qualquer vilarejo, vila, e cidade. Estas áreas brancas seriam presumivelmente excluídas do desenvolvimento de parques eólicos. As áreas remanescentes pretas seriam em grande partes exclusas, talvez, pelo fato de que são necessários lugares tranquilos da industrialização. Dados de alocação do www.openstreetmap.org.

A figura 18.8 serve como um guia para qualquer um que esteja tentando erguer parques eólicos na Grã-Bretanha. No mapa das principais terras britânicas eu mostro em branco uma zona de exclusão de raio de 2 km circundante a cada aldeia, vila e cidade. Estas zonas brancas seriam presumivelmente excluídas do desenvolvimento de parques eólicos porque elas estão muito próximas dos humanos. Eu pintei de preto todas as regiões que estão *a mais de 2 km* de distância de qualquer instalação humana. Estas áreas estão largamente excluídas do desenvolvimento de parques eólicos porque elas são *tranquilas*, e é essencial proteger áreas tranquilas da industrialização. Se você quer evitar objeções contra os seus parques eólicos, escolha qualquer pedaço de terra que não esteja pintado de preto ou branco.

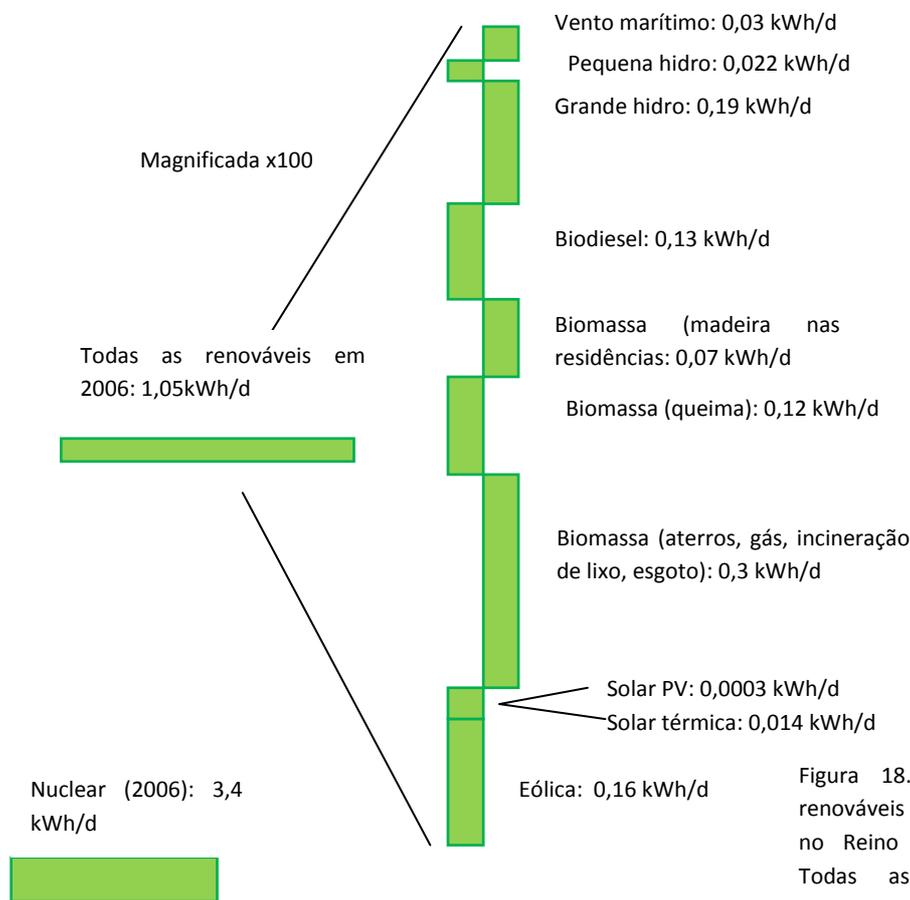


Figura 18.9. Produção das renováveis e energia nuclear no Reino Unido em 2006. Todas as potências são expressas por pessoa, como sempre. O detalhamento das renováveis no lado direito tem escala de 100x verticalmente.

Alguns destes ambientalistas que possuem boas corações mas mentes confusas são quase uma barreira para o combate às mudanças climáticas.

Malcom Wicks, Ministro do Estado para Energia.

Nós estamos chegando ao final da Parte I. A suposição era de que nós queremos nos livrar dos combustíveis fósseis, por uma ou mais das razões listadas no Capítulo 1 – mudanças climáticas, segurança de fornecimento, e assim em diante. A figura 18.9 mostra quanta potência nós retiramos atualmente das renováveis e nuclear. Elas somam apenas 4% do nosso consumo total.

As duas conclusões que nós podemos retirar dessa Parte I, são:

1. *Para fazer alguma diferença, as instalações de renováveis deveriam ser do tamanho do país.*

Para que qualquer instalação de renovável faça uma contribuição comparável ao nosso consumo atual, *ela precisa ser do tamanho de um país*. Para conseguir uma grande contribuição do vento, nós utilizamos parques eólicos do tamanho do País de Gales. Para conseguir uma grande contribuição da solar fotovoltaica, nós precisamos de metade da área do País de Gales. Para conseguir uma grande contribuição das ondas, nós imaginamos ter parques cobrindo 500 km de linha de costa. Para retirar energia de plantações de maneira significativa, nós pegamos 75% do país inteiro.

As instalações de renováveis precisam ser do tamanho de um país porque todas as renováveis são muito difusas. A Tabela 18.10 resume a maioria das potências por unidade de área que nós encontramos na Parte I.

Para sustentar o estilo de vida britânico apenas com as suas renováveis seria muito difícil. Uma solução baseada em energias renováveis será definitivamente em larga escala e intrusiva.

2. *Não será fácil fazer um plano que faça a diferença utilizando-se apenas renováveis. Se nós realmente queremos nos livrar dos combustíveis fósseis, a Grã-Bretanha terá que aprender a dizer “sim” para algumas coisas. Na verdade, para várias coisas.*

Na Parte II eu perguntarei, “assumindo que nós não consigamos que a produção das renováveis cubra o nosso consumo, quais são as outras opções?”

POTÊNCIA POR UNIDADE DE ÁREA DE TERRA OU ÁGUA	
Vento	2 W/m ²
Vento marinho	3 W/m ²
Piscinas de marés	3 W/m ²
Correntes de marés	6 W/m ²
Painéis solares FV	5-20 W/m ²
Plantas	0,5 W/m ²
Água da chuva (terras altas)	0,24 W/m ²
Instalações Hidroelétricas	11 W/m ²
Geotérmica	0,017 W/m ²

Tabela 18.10. Instalações de renováveis devem ser do tamanho de um país porque todas as renováveis são muito difusas.

Observações e Leitura Complementar

N pg

132 Consumo de energia médio do Reino Unido é 125 kWh por dia por pessoa. Eu peguei este número do Relatório de Desenvolvimento Humano UNDP, 2007.

O DTI (agora conhecido como DBERR) publica todo ano um Resumo das Estatísticas Energéticas do Reino Unido. [uzek2] Em 2006, de acordo com DUKES, a demanda total de energia primária era 244 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, o que corresponde a 130 kWh por dia por pessoa.

E desconheço a razão para essa pequena diferença existente entre os números de UNDP e de DUKES, mas eu posso explicar porque eu escolhi o número levemente menor. Como eu mencionei na página 32 , DUKES utiliza a mesma convenção de soma de energia que eu, declarando 1 kWh de energia química como sendo igual a 1 kWh de eletricidade. Mas existe uma pequena exceção: DUKES define a “energia primária” produzida em estações de potência nucleares como energia térmica, que em 2006 eram 9 kWh/d/p; esta foi convertida (com uma eficiência de 38%) para 3,4 kWh/d/p de energia fornecida; nas minhas contas eu foquei na eletricidade produzida pela hidroeletricidade, outras renováveis, e potência nuclear; esta pequena mudança na convenção reduz a contribuição nuclear para cerca de 5 kWh/d/p.

- Perdas na rede de transmissão jogam fora 1% do consumo energético nacional total. Para dizer isto de outra forma, as perdas são 8% da energia gerada. Estas perdas de 8% podem ser separadas: aproximadamente 1,5% é perdido em sistemas de alta voltagem de longa distância, e 6% no sistema de fornecimento público. Fonte: MacLeay et al. (2007)

134 Figura 18.4. Dados do Boletim de Desenvolvimento Humano UNDP, 2007. [3av4s9]

137 Na Idade Média, o estilo de vida de uma pessoa de classe média consumia uma potência de 20 kWh por dia. Fonte: Malanima (2006).

139 “Eu estou mais preocupado com as feias linhas de transmissão vindo para a costa do que com a invasão dos Nazistas”. Fonte: [6frj55]

Parte II

Fazendo a Diferença

19 Todo **MUITO** ajuda

Nós estabelecemos que o atual estilo de vida do Reino Unido não pode ser sustentado com as próprias renováveis do Reino Unido (a não ser com a instalação de usinas de produção de energia utilizando áreas de terra e mar do tamanho de um país). Então quais são as nossas opções, se nós queremos parar de utilizar combustíveis fósseis e viver sustentavelmente? Nós podemos mover o nosso balanço energético tanto de forma a reduzir a demanda, ou aumentando o fornecimento, ou, obviamente, através dos dois.

Não se iluda. Para atingir os nossos objetivos de parar de utilizar combustíveis fósseis, essas reduções na demanda e aumentos no fornecimento devem ser *grandes*. Não se distraia com o mito de que “todo pouco ajuda”. *Se todo mundo fizer um pouco, nós alcançaremos apenas um pouco*. Nós devemos fazer muito. *Grandes* mudanças são necessárias na demanda e no fornecimento.

“Mas com certeza se cada uma das 60 milhões de pessoas fizesse um pouco, isto mudaria bastante coisa?” Não. Este mecanismo de multiplicação “se cada um” é apenas uma forma de fazer algo pequeno *parecer* grande. O mecanismo multiplicador “se cada um” incentiva argumentos inspirativos do tipo “se *todo mundo* fizesse X, então teríamos energia/água/gás o suficiente para fazer Y”, onde Y parece impressionante. É tão surpreendente que Y soe grande? É claro que não. Nós obtemos Y multiplicando X pelo número de pessoas envolvidas – mais ou menos 60 milhões! Aqui está um exemplo da franqueza do Partido Conservador *Modelo para uma Economia Verde*:

“O carregador de celular tem em média... 1 W de consumo, mas se cada um dos 25 milhões de carregadores de celulares do país fossem deixados ligados eles consumiriam energia elétrica (219 GW) o suficiente para alimentar 66 000 residências por um ano”.

66 000? Uau! Isto são muitas residências! Desligue os carregadores das tomadas! 66 000 parece muito, mas a coisa certa a se fazer é comparar este número com o número total de residências que nós estamos imaginando que participariam desta façanha de conservação, ou seja, *25 milhões de residências*. 66 000 é apenas *um quarto de um por cento* de 25



"Nós íamos ter uma turbina eólica, mas elas não são muito eficientes."

Figura 19.1. Reproduzida com a gentil permissão do PRIVATE EYE / Robert Thompson www.private-eye.co.uk.

milhões. Então mesmo que a afirmação acima seja verdadeira, eu acho que um modo mais sensato de colocar isto seria:

Se você deixar o seu carregador de celular ligado na tomada, ele consome **um quarto de um por cento** da eletricidade da sua casa.

E se todo mundo fizer isto?

Se *todo mundo* deixar os seus carregadores ligados nas tomadas, estes carregadores consumirão **um quarto de um por cento** da eletricidade consumida nessas residências.

O mecanismo de multiplicação “se todo mundo” é uma coisa ruim porque ele deflete a atenção das pessoas para os 25 milhões de peixinhos ao invés dos 25 milhões de tubarões. O mantra “*pequenas mudanças podem fazer a diferença*” é patético, quando aplicado a mudanças climáticas e potência energética. Pode ser verdade que “muitas pessoas fazendo pouco acrescenta muito”, se todos estes “poucos” forem focados em um único “muito” - por exemplo, se um milhão de pessoas doassem £10 para *uma* vítima de acidente, então essa vítima receberia £10 milhões. Isto é bastante. Mas potência energética é uma coisa muito diferente. Todos nós consumimos esse tipo de potência. Então para atingir uma “grande diferença” na potência total consumida, você precisa que quase todo mundo faça uma “grande” mudança no seu próprio consumo de potência.

Então, são necessárias *grandes* mudanças na demanda e no fornecimento. A demanda de potência pode ser reduzida de três formas:

1. Reduzindo a nossa população (figura 19.2);
2. Mudando o nosso estilo de vida;
3. Mantendo o nosso estilo de vida, mas reduzindo sua intensidade energética através de “eficiência” e de “tecnologia”.

O fornecimento pode ser aumentado de três maneiras:

1. Nós podemos parar de utilizar combustíveis fósseis investindo em tecnologia de “carvão limpo”. Oops. Carvão é um combustível fóssil. Bem, esqueça isso – vamos dar uma olhada

Enquanto a pegada de cada indivíduo não pode ser reduzida a zero, a ausência de um indivíduo o faz.

Chris Rapley, ex diretor do Exame Britânico da Antártica.

Nós precisamos de menos pessoas, não de pessoas mais verdes.

Daily Telegraph, 24 de julho de 2007.

A democracia não pode sobreviver à superpopulação. A dignidade humana não pode sobreviver à superpopulação.

Isaac Asimov.



"Bem, nós precisamos reduzir as suas emissões".

Figura 19.2. O aumento populacional e das emissões. Desenho como cortesia do Colin Wheeler.

nesta ideia. Se nós pudéssemos usar o carvão “sustentavelmente” (uma noção que nós definiremos daqui um pouco), quanta potência ele ofereceria? Se nós não ligamos para sustentabilidade e apenas queremos “segurança de fornecimento”, o carvão poderia oferecer isto?

2. Nós poderíamos investir em fissão nuclear. A atual tecnologia nuclear é “sustentável”? Ela é pelo menos um tapa-buracos que pode durar pelo menos por 100 anos?
3. Nós poderíamos comprar, implorar, ou roubar energia renovável de outros países – tendo em mente que a maioria dos países estará no mesmo barco que a Grã-Bretanha e não terá energias renováveis de sobra; e também tendo em mente que buscar energias renováveis de outros países não diminui magicamente as instalações de potência necessárias. Se nós importarmos energias renováveis de outros países com o intuito de evitar construir instalações renováveis do tamanho do País de Gales no *nosso* país, alguém vai ter que construir instalações quase do tamanho do País de Gales em algum outro país.

Os próximos sete capítulos discutem primeiramente como reduzir a demanda substancialmente, e depois como aumentar o fornecimento para abastecer aquela reduzida, porém ainda “enorme”, demanda. Nestes capítulos, eu não mencionarei *todas* as boas ideias. Eu discutirei apenas as *grandes* ideias.

Grã-Bretanha simplificada

Para simplificar a nossa discussão de redução de demanda, eu proponho simplificar o consumo energético da Grã-Bretanha, omitindo muitos detalhes de forma a ter uma visão ampla. A minha Grã-Bretanha simplificada consome energia apenas de três formas: aquecimento, transporte e eletricidade. O aquecimento da Grã-Bretanha simplificada é 40 kWh por dia por pessoa (atualmente tudo fornecido por combustíveis fósseis); o consumo com transporte também é 40kWh por dia por pessoa (atualmente tudo fornecido por combustíveis fósseis); e o consumo de eletricidade é 18 kWh(e) por dia por pessoa; a eletricidade é, atualmente, quase toda gerada a partir de combustíveis fósseis; a conversão da energia dos combustíveis fósseis para eletricidade possui uma eficiência de 40%, então fornecer 18 kWh(e) de eletricidade na Grã-Bretanha simplificada de hoje em dia necessita uma entrada de

combustíveis fósseis de 45 kWh por dia por pessoa. Estas simplificações ignoram alguns detalhes bem razoáveis, tal como a agricultura e a indústria, e a energia embutida de produtos importados! Mas eu gostaria de estar apto a ter uma conversa *rápida* sobre as principais coisas que nós precisamos fazer para parar de utilizar os combustíveis fósseis. Aquecimento, transporte e eletricidade somam mais do que a metade do nosso consumo energético, então se nós pudermos bolar um plano que forneça aquecimento, transporte e eletricidade sustentavelmente, então nós teremos dado um ótimo passo em direção a um plano mais detalhado que realmente faça a diferença.

Tendo adotado esta Grã-Bretanha simplificada, as nossas discussões de redução de demanda terão apenas três pedaços. Primeiramente, como nós podemos reduzir a demanda energética para o transporte e eliminar todo o combustível fóssil utilizado no transporte? Este é o tópico do Capítulo 20. Em segundo lugar, como nós podemos reduzir a demanda energética para aquecimento e eliminar todo o combustível fóssil utilizado para aquecimento? Este é o tópico do Capítulo 21. E terceiro, como fica a eletricidade? O Capítulo 22 discute a eficiência no consumo de eletricidade.

Três opções de fornecimento – carvão limpo, nuclear, e renováveis de outras pessoas – são então discutidas nos Capítulos 23, 24 e 25. Finalmente, o Capítulo 26 discute como trabalhar com as flutuações na demanda e flutuações na produção de potência renovável.

Tendo discutido as opções de redução de demanda e de aumento de fornecimento, os Capítulos 27 e 28 discutem várias maneiras de colocar estas três opções juntas para fazer planos que acrescentem, para fornecer o transporte, o aquecimento e a eletricidade da Grã-Bretanha simplificada.

Eu poderia gastar muitas páginas discutindo “50 coisas que você pode fazer para fazer a diferença”, mas eu acho que essa abordagem simplificada, perseguindo os três peixes maiores, deve levar à políticas mais efetivas.

E sobre os “objetos”? De acordo com a Parte I, a energia embutida nos objetos importados pode ser o maior peixe de todos! Sim, talvez este peixe seja o mamute na sala. Mas vamos deixar a desfossilização deste mamute de lado e nos focar nos animais sobre os quais nós realmente temos controle direto.

Então, aqui vamos nós: vamos falar sobre transporte, aquecimento e eletricidade.

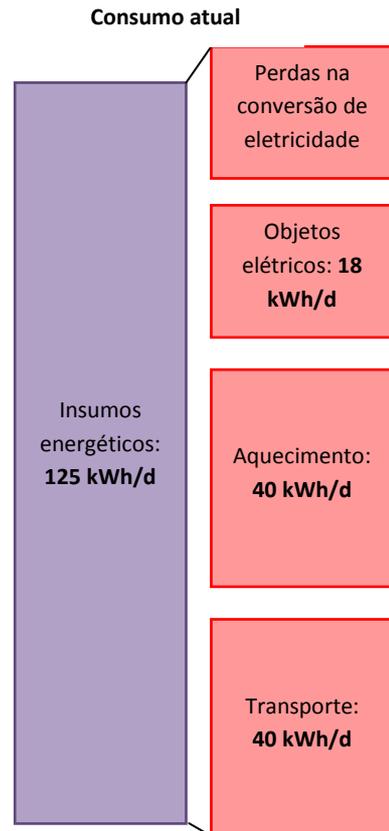


Figura 19.3. Consumo atual na "Grã-Bretanha simplificada em 2008"

Para o leitor impaciente

Você está ansioso para saber logo o final desta história? Aqui está um pequeno resumo, uma prévia da Parte II.

Primeiramente, nós eletrificamos o transporte. A eletrificação tanto retira o transporte dos combustíveis fósseis como também o deixa mais eficiente energeticamente. (Obviamente a eletrificação aumentará a nossa demanda de eletricidade verde.)

Em segundo lugar, para suplementar o aquecimento solar térmico, nós eletrificamos a maior parte do aquecimento de ar e água em edificações com o uso de *bombas de calor*, que são quatro vezes mais eficientes do que os aquecedores elétricos comuns. Esta eletrificação do aquecimento aumenta ainda mais a quantidade de eletricidade verde necessária.

Em terceiro lugar, nós pegamos toda a nossa eletricidade de uma mistura de quatro fontes: nas nossas próprias renováveis; talvez do “carvão limpo”; talvez da nuclear; e finalmente, e com grande educação, das renováveis de outros países.

Entre as renováveis dos outros países, a potência solar no deserto é uma das opções mais abundantes. Desde que nós possamos construir colaborações internacionais pacíficas, a potência solar no deserto de outras pessoas certamente tem o potencial técnico de fornecer para nós, para eles, e para todos 125 kWh por dia por pessoa.

Perguntas? Continue lendo.

20 Melhor Transporte

A tecnologia de veículos modernos pode reduzir as emissões que afetam o clima, sem alterar a aparência, conforto ou desempenho que os proprietários esperam.

Conselho de Recursos do Ar da Califórnia.

Aproximadamente um terço da nossa energia vai para transporte. A *tecnologia* pode fornecer uma redução no consumo? Neste capítulo nós exploramos as opções para atingir dois objetivos: fornecer a maior redução possível no uso energético para transporte, e eliminar o uso de combustíveis fósseis no transporte.

O transporte foi apresentado em três dos nossos capítulos de consumo: Capítulo 3 (carros), Capítulo 5 (aviões), e o Capítulo 15 (transporte rodoviário e marítimo de objetos). Então existem dois tipos de transporte para discutir: o transporte de passageiros, e o frete. Nossa unidade de transporte de passageiros é o passageiro-quilômetro (p-km). Se um carro carrega uma pessoa por uma distância de 100 km, ele fornece 100 p-km de transporte. Se ele carrega quatro pessoas pela mesma distância, ele forneceu 400 p-km. Similarmente, a nossa unidade de transporte de frete é a tonelada-quilômetro (ton-km). Se um caminhão carrega 5 toneladas de carga por uma distância de 100 km, então ele forneceu 500 t-km de transporte de carga. Nós mediremos o consumo energético do transporte de passageiros em “kWh por 100 passageiros-quilômetros”. Observe que estas medidas são o contrário do “milhas por galão de combustível”: enquanto nós queremos que os veículos forneçam *muitas* milhas por galão, nós queremos que o consumo energético seja de *poucos* kWh por 100 p-km.

Nós começaremos este capítulo discutindo como reduzir o consumo energético do transporte de superfície. Para entender como reduzir o consumo energético, nós precisamos compreender onde a energia é consumida no transporte de superfície. Aqui estão três conceitos chave, que são explicados com mais detalhes no Apêndice A.

1. Em *viagens de curta-distância* com várias paradas e recomeços, a energia é gasta principalmente em acelerar o veículo e seus componentes. A estratégia chave para consumir menos neste tipo de transporte são, então, *pesar menos e andar*



Figura 20.1. O ponto inicial deste capítulo: uma camionete urbana de luxo. O carro médio britânico possui um consumo de combustível de 33 milhas por galão, o que corresponde a um consumo energético de 80 kWh por 100 km. Nós podemos fazer melhor que isso?

mais entre as paradas. Freios regenerativos, que capturam energia do desaceleração, podem ajudar também. Além disso, ajuda mover-se *mais devagar* e mover-se *menos*.

2. Em *viagens de longa-distância* em velocidade constante, por trem ou automóvel, a maior parte da energia é gasta ao fazer o ar passar em volta do veículo, porque você precisa acelerar o veículo apenas uma vez. As estratégias chaves para consumir menos com este tipo de transporte são se mover *mais devagar*, e se mover *menos*, e também utilizar *veículos mais longos e finos*.
3. Em todas as formas de viagem existe uma cadeia de conversão de energia, que pega a energia em algum tipo de combustível e utiliza parte dela para movimentar o veículo. Inevitavelmente esta cadeia de conversão possui ineficiências. Em um carro padrão movido a combustível fóssil, por exemplo, apenas 25% da energia é utilizada para mover o veículo, e 75% dela é perdida aquecendo o radiador e o motor. Então uma estratégia final para consumir menos energia é tornar esta cadeia de conversão mais eficiente.

Estas observações nos levam a seis princípios do design e do uso de veículos para um transporte de superfície mais eficiente: *a)* reduzir a área frontal por pessoa; *b)* reduzir o peso do veículo por pessoa; *c)* ao viajar, andar com velocidade constante e evitar usar os freios; *d)* viajar com menor velocidade; *e)* viajar menos; e *f)* tornar a cadeia de energia mais eficiente. Agora nós discutiremos uma variedade de maneiras de aplicar estes princípios.

Como rodar melhor

Uma estatística bastante citada diz algo parecido com “apenas 1 *por cento* da energia utilizada por um carro é gasta em locomover o motorista” – a implicação sendo que, com certeza, sendo um pouco inteligentes, nós conseguiríamos fazer carros 100 *por cento* mais eficientes? A resposta é sim, quase isso, mas apenas aplicando os princípios de design e uso de veículos, listados acima, a níveis *extremos*.

Uma ilustração do design extremo de veículos é um eco-carro, que possui uma pequena área frontal e baixo peso,

e – se qualquer recorde está para ser quebrado – é cuidadosamente dirigido a uma velocidade baixa e constante. O eco-carro do *Team Crocodile* (figura 20.2) faz 2184 milhas por galão (1,3 kWh por 100 km) a uma velocidade de 15 mph (24 km/h). Pesando 50 kg e sendo menor em altura do que um cone de trânsito, ele acomoda confortavelmente um motorista adolescente.

Hmm. Eu acho que o motorista da caminhonete urbana da figura 20.1 pode detectar uma mudança no “visual, conforto e desempenho” se nós o mudássemos para o eco-carro e o instruíssimos a manter a velocidade abaixo de 15 milhas por hora. Então, a ideia de que carros poderiam facilmente ser 100 vezes mais eficientes é um mito. Nós voltaremos para os desafios de fazer um carro energeticamente eficiente em um momento. Mas antes disto, vamos ver outras maneiras de satisfazer os princípios do transporte de superfície mais eficiente.

A figura 20.3 mostra um veículo de múltiplos passageiros que é pelo menos 25 vezes mais eficiente energeticamente do que o carro padrão gasolina: a bicicleta. O desempenho da bicicleta (em termos de energia por distância) é cerca do mesmo que o do eco-carro. Sua velocidade é a mesma, sua massa é menor do que a do eco-carro (porque um humano substitui o motor e o tanque de combustível) e a sua área frontal efetiva é maior, porque o ciclista não é tão afinado quanto o eco-carro.

A figura 20.4 mostra outro possível substituto para o carro à gasolina: um trem, com um custo energético, caso cheio, de 1,6 kWh por 100 passageiro-km. Em contraste com o eco-carro e a bicicleta, o trem consegue alcançar uma eficiência sensacional sem viajar devagar, e sem ter baixo peso por pessoa. O trem compensa a alta velocidade e sua pesada carcaça pela exploração do princípio de baixa área frontal por pessoa. Enquanto um ciclista e um eco-carro possuem áreas frontais efetivas de cerca de 0,8 m² e 0,5 m² respectivamente, um trem de cercanias lotado de Cambridge a Londres possui uma área frontal por passageiro de 0,02 m².

Mas ops, agora nós chegamos em um tópico feio – a perspectiva de dividir um veículo com “todas essas pessoas horríveis”. Bem, suba à bordo, e vamos perguntar: quanto o consumo poderia ser reduzido pela troca dos beberrões de gasolina particulares por um excelente transporte público integrado?



Figura 20.2. O eco-carro da *Team Crocodile* consome 1,3 kWh por 100 km. Foto gentilmente fornecida pela Equipe Crocodilo. www.teamcrocodile.com



Figura 20.3 “Bebês a bordo”. Este modo de transporte possui um custo energético de 1 kWh por 100 pessoas-km.



Figura 20.4. Este trem de 8 compartimentos, na sua velocidade máxima de 100 mph (161 km/h), consome 1,6 kWh por 100 passageiros-km, se lotado.



4,4 kWh por 100 p-km, caso lotado.



3 - 9 kWh por 100 p-km, caso lotado.



7 kWh por 100 p-km, caso lotado.



21 kWh por 100 p-km, caso lotado.

Figura 20.5. Alguns transportes públicos, a suas eficiências energéticas, no melhor comportamento.

Metros, externos e internos. Dois trens de alta velocidade. O elétrico consome 3 kWh por 100 acentos-km; o a diesel consome 9 kWh.

Ônibus elétricos em São Francisco. Barca de Vancouver. Foto de Larry.

Transporte Público

Nas suas melhores condições, o transporte público compartilhado é muito mais eficiente energeticamente do que dirigir o carro individual. Um ônibus movido a diesel, carregando 49 passageiros e fazendo 10 milhas por galão a 65 milhas por hora, consome 6 kWh por 100 p-km – 13 vezes melhor do que o carro para uma pessoa. Os **ônibus elétricos** de Vancouver consomem 270 kWh por veículo-km e possuem uma velocidade média de 15 km/h. Se o **ônibus elétrico** possui 40 passageiros à bordo, então seu custo para transporte de passageiro é 7 kWh por 100 p-km. A barca de Vancouver possui um custo de transporte de 83 kWh por veículo-km a uma velocidade de 13,5 km/h. Ele pode acomodar 400 pessoas, então seu custo de transporte de passageiro é de 21 kWh por 100 p-km, quando cheio. Os **trens subterrâneos** de Londres, em tempos de pico, utilizam 4,4 kWh por 100 p-km – 18 vezes melhor do que os carros individuais. Até **trens de alta velocidade**, que violam dois dos nossos princípios de economia de energia ao andarem duas vezes mais rápidos do que um carro e pesarem muito, são muito mais eficientes energeticamente: se o trem elétrico de alta velocidade está cheio, seu custo energético é 3 kWh por 100 p-km – isto são 27 vezes menor do que o do carro!

Contudo, nós devemos ser realistas no nosso planejamento. Alguns trens e ônibus não estão lotados (figura 20.6). Então o custo energético *médio* do transporte público é maior do que os valores de melhor caso mencionados. Qual é o

consumo energético *médio* dos sistemas de transporte público, e qual a avaliação realística do quão bom eles podem ser?

Em 2006-7, o custo energético total de todos os trens subterrâneos de Londres, incluindo iluminação, elevadores, depósitos e oficinas foi **15 kWh por 100 p-km** – cinco vezes melhor do que o nosso carro de linha de base. Em 2006-7 o custo energético de todos os ônibus de Londres foi **32 kWh por 100 p-km**. O custo energético não é a única coisa que importa, é claro. Passageiros se importam com a velocidade: e os trens subterrâneos forneceram velocidades mais elevadas (uma média de 33 km/h) do que os ônibus (18 km/h). Os administradores se importam com os custos financeiros: os custos com trabalhadores, por passageiro-km, dos trens subterrâneos são menores do que dos ônibus.



Figura 20.6. Alguns trens não estão lotados. Três homens e um violão - os únicos ocupantes deste vagão do trem de alta velocidade das 10.30 de Edinburgo para Kings Cross.



32 kWh por 100 p-km



9 kWh por 100 p-km

Figura 20.7. Alguns transportes públicos, e seus consumos *médios* de energia. À esquerda: alguns ônibus vermelhos. À direita: Croydon Tramlink. Foto de Stephen Parascandolo.

O consumo energético total do sistema Croydon Tramlink (figura 20.7) em 2006-7 (incluindo iluminação, armazenamento e as instalações de paradas de bondes) foi **9 kWh por 100 p-km**, com uma velocidade média de 25 km/h.

Quão bom pode ser o transporte público? Talvez nós consigamos uma indicação aproximada ao olhar os dados do Japão na tabela 20.8. Com **19 kWh por 100 p-km** e **6 kWh por 100 p-km**, ambos o ônibus e o trem parecem promissores. O trem possui a vantagem de que ele pode solucionar ambos os nossos objetivos - redução no consumo energético e independência de combustíveis fósseis. Ônibus possuem a vantagem óbvia da simplicidade e flexibilidade, porém manter essa flexibilidade e ao mesmo tempo fazer com que os ônibus parem de utilizar combustíveis fósseis pode ser um desafio.

Para resumir, o transporte público (especialmente trens elétricos, bondes e ônibus) parecem uma maneira promissora de fornecer transporte a passageiros - melhores em termos de energia por passageiro-km, talvez cinco ou dez vezes melhor do que os carros. Contudo, se as pessoas demandam a flexibilidade de um veículo privado, quais são as nossas outras opções?

Consumo energético (kWh por 100 p-km)	
Carro	68
Ônibus	19
Ferrovias	6
Ar	51
Mar	57

Tabela 20.8. As eficiências globais dos modos de transporte no Japão (1999).

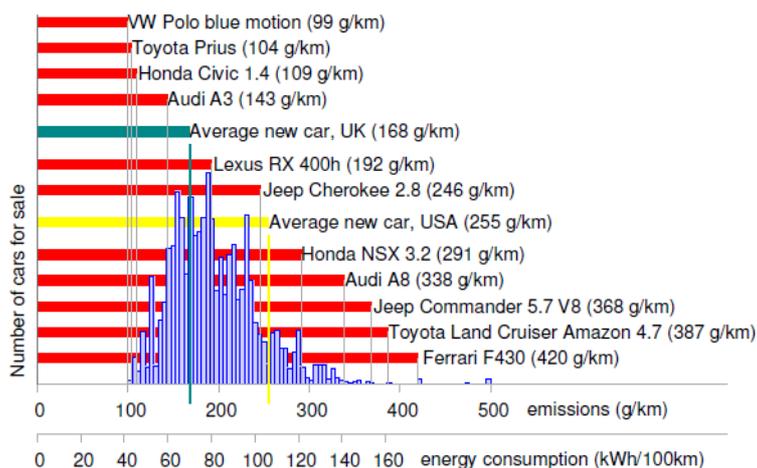


Figura 20.9. A poluição de carbono, em gramas de CO₂ por km, de uma seleção de carros à venda no Reino Unido. O eixo horizontal mostra a taxa de emissão, e a altura do histograma azul indica o número de modelos à venda com estas emissões em 2006. Fonte: www.newcarnet.co.uk.

A segunda escala horizontal indica os consumos energéticos aproximados, pressupondo que 240 g de CO₂ é associado a 1 kWh de energia química.

Veículos Privados: tecnologia, legislação e incentivos

O consumo energético de carros individuais *pode* ser reduzido. A vasta gama de eficiência energética de carros à venda pode provar isto. Em um único salão de exposição em 2006 você pode comprar um Honda Civic 1.4 que consome aproximadamente 44 kWh por 100 p-km, ou um Honda NSX 3.2 que consome 116 kWh por 100 p-km (figura 20.9). O fato de que as pessoas *compram* alegremente desta ampla gama também é uma prova de que nós precisamos de investimentos e legislação para encorajar o feliz consumidor a *escolher* carros mais eficientes energeticamente. Existem várias formas de ajudar o consumidor a preferir o Honda Civic no lugar do beerrão de gasolina Honda NSX 3.2: aumentando o preço do combustível; aumentando a taxa dos carros novos proporcionalmente ao consumo previsto para o tempo de vida do veículo; implementando impostos rodoviários para os beerrões de gasolina; privilégios de estacionamento para os carros econômicos (figura 20.10); ou racionamento de combustível. Todas estas medidas são impopulares com pelo menos alguns dos eleitores. Talvez uma melhor tática legislativa seria *impor* eficiência energética razoável, ao invés de continuar a permitir escolha sem restrição; por exemplo, nós poderíamos simplesmente *banir*, a partir de uma certa data, a venda de *qualquer* carro cujo consumo energético seja maior do que 80 kWh por 100 km; e então, com o tempo, reduzir este teto para 60 kWh por 100 km, então 40 kWh por 100 km, e assim por diante. Alternativamente, para dar mais escolha ao consumidor, as regulamentações poderiam forçar os fabricantes de carros a reduzir a energia *média* consumida



Figura 20.10. Privilégios de estacionamento especial para carros elétricos em Ann Arbor, Michigan.



Figura 20.11. Monstercars são apenas altos o suficiente para obscurecer completamente a vista do pedestre.

de todos os carros que eles vendem. Legislação adicional limitando o peso e a área frontal dos veículos também reduziria simultaneamente o consumo de combustível e aumentaria a segurança para outros usuários de estradas (figura 20.11). As pessoas hoje em dia escolhem os seus carros para estarem na moda. Com uma forte legislação de eficiência, ainda seria possível existir uma vasta gama de estilos; eles apenas seriam eficientes energeticamente. Você poderia escolher qualquer cor, desde que fosse verde.

Enquanto nós esperamos que os eleitores e os políticos entrem num acordo sobre a legislação de eficiência de carros, quais outras opções estão disponíveis?



Figura 20.12. Uma rotatória em Enschede, nos Países Baixos.

Bicicletas

A minha sugestão favorita é a provisão de excelentes instalações de ciclovias, juntamente com legislação apropriada (menores limites de velocidade, e regulamentações de colisões que favoreçam os ciclistas, por exemplo). A figura 20.12 mostra uma rotatória em Enschede, nos Países Baixos. Existem dois círculos: o para carros fica dentro daquele para bicicletas, com o confortável comprimento equivalente a um carro separando os dois. As regras de prioridade são as mesmas que as rotatórias britânicas, com exceção de que os carros saindo do círculo central devem dar passagem aos ciclistas circulando (assim como na Grã-Bretanha os carros dão passagem aos pedestres na faixa de segurança). Onde são fornecidas excelentes instalações de ciclovias, as pessoas as utilizam, como evidenciado pelo infinito número de bicicletas "estacionadas" na frente da estação de trem de Enschede (figura 20.13).

De alguma forma, a provisão de ciclovias britânicas (figura 20.14) não atingem o padrão holandês.



Figura 20.13. Algumas bicicletas holandesas.



Figura 20.14. Enquanto isso, de volta à Grã-Bretanha...

Foto à direita por Mike Armstrong.

Na cidade francesa de Lyon, a gestão privada da rede de bicicletas públicas, Vélo'v, foi introduzida em 2005 e se tornou popular. A população de 470 000 habitantes de Lyon é servida com 2000 bicicletas distribuídas por 175 ciclo-estações em uma área de 50 km² (figura 20.15). No centro da cidade, você geralmente está a 400 metros de uma ciclo-estação. Os usuários entram no programa pagando uma taxa de inscrição de €10 por ano e podem então pegar bicicletas de graça para quaisquer viagens que durem menos do que 30 minutos. Para contratar por períodos mais longos, o usuário paga um extra de €1 por hora. Visitantes de curto-período na cidade de Lyon podem comprar um pacote de uma semana por €1.



Figura 20.15. Uma estação Vélo'v em Lyon.

Outras oportunidades legislativas

Os limites de velocidade são um botão que facilmente poderia ser apertado. Como uma regra, os carros que viajam mais devagar consomem menos energia (veja o Apêndice A). Com prática, os motoristas podem aprender a dirigir de forma mais econômica: usando menos o acelerador e os freios e sempre dirigindo na maior marcha possível pode dar uma redução de 20% do consumo de combustível.

Outra forma de reduzir o consumo de combustível é reduzir os congestionamentos. Parar e voltar a andar, acelerar e reduzir a velocidade, é uma forma muito menos eficiente de andar por aí do que dirigir de forma constante. Ficar em marcha lenta no trânsito parado é uma maneira extremamente precária de fornecer milhas por galão!

Congestionamento ocorre quando existem muitos veículos nas estradas. Então uma maneira simples de reduzir o congestionamento seria agrupar os viajantes em menos

veículos. Uma boa forma de pensar na conversão de carros para ônibus é calcular a área de estrada necessária para as duas formas. Pegue uma rodovia federal à beira do congestionamento, onde a velocidade requerida é de 60 mph²¹. A distância de segurança de um carro para o outro à 60 mph é de 77 m. Se nós assumirmos que existe um carro a cada 80 m e que há 1,6 pessoas em cada carro, então empurrar 40 pessoas por uma única rodovia necessita de *dois quilômetros* de rodovia!

Congestionamento pode ser reduzido com o fornecimento de boas alternativas (ciclovias, transporte público) e por cobrar a mais dos usuários da estrada caso eles contribuam para o congestionamento. Nas notas deste capítulo eu descrevo um método justo e simples para lidar com a cobrança de congestionamento.

O aumento de carros

Assumindo que o caso amoroso do mundo com os carros não esteja perto de terminar, quais são as tecnologias que podem fornecer economias significativas de energia? Economias de 10% ou 20% são fáceis - nós já discutimos algumas formas de atingi-las, tais como fazer os carros menores e mais leves. Outra opção é trocar a gasolina pelo diesel. Os motores à diesel são mais caros para serem produzidos, mas eles tendem a ser mais eficientes com o combustível. Mas existem tecnologias que podem aumentar radicalmente a eficiência na cadeia de conversão de energia? (Lembre-se que em um carro movido a gasolina padrão, 75% da energia é transformada em calor e jogada fora no radiador!) E quanto ao objetivo de parar de utilizar combustíveis fósseis?



Figura 20.16. Com um congestionamento destes, e mais rápido ir à pé.

Figura 20.17. Uma BMW 530i modificada por *Artemis Intelligent Power* para utilizar hidráulica digital. Canto inferior esquerdo: Um acumulador de 6-litros (a vasilha vermelha), capaz de armazenar cerca de 0,05 kWh de energia em nitrogênio comprimido. Canto inferior direito: dois motores hidráulicos de 200 kW, um para cada roda traseira, os quais ambos aceleram e desaceleram o carro. O carro ainda é alimentado pelo seu motor de petróleo padrão de 190 kW, mas graças à transmissão hidráulica digital e à frenagem regenerativa, ele consome 30% menos combustível.

²¹ Aproximadamente 100 km/h.

Nesta seção, nós discutiremos cinco tecnologias: frenagem regenerativa; carros híbridos; carros elétricos; carros movidos a hidrogênio; e carros por compressão de ar.

Frenagem regenerativa

Existem quatro maneiras de capturar energia no que um veículo diminui sua velocidade:

1. Um gerador elétrico acoplado às rodas podem carregar uma bateria ou um supercapacitor.
2. Motores hidráulicos comandados pelas rodas podem produzir ar comprimido, armazenado em uma pequena vasilha.
3. A energia pode ser armazenada em um rotor.
4. A energia da frenagem pode ser armazenada como energia gravitacional ao dirigir o veículo na subida de uma rampa sempre que você quiser diminuir a velocidade. Esta opção de armazenamento de energia gravitacional é bastante inflexível, uma vez que sempre deve existir uma rampa no lugar certo. Esta é uma opção que é bastante útil para trens, e ela é ilustrada pela linha *London Underground's Victoria*, que possui estações corcundas. As chegadas dos trens é automaticamente diminuída pela colina, e a saída de trens é acelerada no que eles vão para além da colina. O design de estação corcunda fornece uma economia de energia de 5% e faz o trem andar 9% mais rápido.

A frenagem regenerativa (utilizando uma bateria para armazenar energia) salva aproximadamente 50% da energia do carro em um evento de frenagem, levando a talvez uma redução de 20% na redução do custo energético de dirigir na cidade.

Sistemas regenerativos utilizando rotores e componentes hidráulicos parecem funcionar melhor do que sistemas baseados a baterias, salvando pelo menos 70% da energia de frenagem. A figura 20.17 descreve um carro híbrido com um motor a gasolina com acionamentos hidráulicos digitalmente controlados. Em um ciclo de condução padrão, este carro consome 30% menos combustível do que o carro original a gasolina. Na condução urbana, seu consumo



Figura 20.18. Um sistema de travagem regenerativa com volante. Fotos fornecidas pela cortesia da *Flybrid Systems*.

energético é reduzido pela metade, de 131 kWh por 100 km para 62 kWh por 100 km (20 mpg para 43 mpg). (O crédito desta melhora de desempenho deve ser dividido entre a frenagem regenerativa e o uso de tecnologia híbrida). Componentes hidráulicos e os rotores são ambas maneiras promissoras de lidar com a frenagem regenerativa porque pequenos sistemas podem lidar com grandes potências. Um sistema de rotor pesando apenas 24 kg (figura 20.18) projetado para armazenamento de energia em um carro de corrida, pode armazenar 400 kJ (0,1 kWh) de energia - energia suficiente para acelerar um carro normal até 60 milhas por hora (97 km/h); e ele pode receber ou fornecer 60 kW de potência. Baterias elétricas capazes de fornecer tamanha potência pesariam 200 kg. Então, a não ser que você já esteja carregando este tanto de baterias à bordo, um sistema de frenagem regenerativa provavelmente deveria utilizar capacitores para armazenar a energia da frenagem. Super-capacitores possuem parâmetros de armazenamento de energia e fornecimento de potência similares aos dos volantes.

Carros híbridos

Carros híbridos tais como o Toyota Prius (figura 20.19) possuem motores mais eficientes e frenagem regenerativa elétrica, mas para ser honesto, os veículos híbridos de hoje em dia não se destacam realmente na multidão (figura 20.9).

As barras horizontais na figura 20.9 destacam alguns carros incluindo dois híbridos. Enquanto um carro novo padrão no Reino Unido emite 168g, o Prius híbrido emite cerca de 100 g de CO₂ por km, assim como fazem vários outros veículos não-híbridos - o VW Polo blue motion emite 99 g/km, e há o carro Smart que emite 88 g/km.

O Lexus RX 400h é o segundo híbrido, cujo slogan da campanha de publicidade diz "BAIXA POLUIÇÃO. NENHUMA CULPA". Mas suas emissões de CO₂ são 192 g/km - pior do que um carro padrão do Reino Unido! As autoridades de padrões de marketing afirmaram que este anúncio violava os códigos de marketing em Verdades, Comparações e Reivindicações Ambientais. "Nós consideramos que ... os leitores seriam levados a entender que o carro causava pouco ou nenhum dano ao meio ambiente, o que não é o caso, e que tinha baixas emissões em comparação com todos os outros carros, o que também não era o caso".

Na prática, tecnologias híbridas parecem ter uma economia de combustível de 20 ou 30%. Então nenhum destes



Figura 20.19. Toyota Prius - de acordo com Jeremy Clarkson, "uma maneira muito cara, muito complexa, não tão verde, vagarosa, de fabricação barata, e sem sentido de se mover por aí.

híbridos gasolina/eletricidade, nem o híbrido gasolina/motor hidráulico apresentado na figura 20.17 parece ter realmente acabado com o desafio do transporte. Uma redução de 30% no consumo de combustíveis fósseis é impressionante, mas não é o suficiente para os padrões deste livro. A nossa suposição de abertura foi que nós queremos acabar com os combustíveis fósseis, ou pelo menos reduzir o uso de combustíveis fósseis em 90%. Este objetivo pode ser atingido sem que tenhamos que reverter para as bicicletas?



Figura 20.20. Veículos elétricos. Da esquerda para a direita: o G-Wiz; a carcaça apodrecendo de um Sinclair C5; um Citroën Berlingo; e um Elettrica.

Veículos elétricos

O carro elétrico REVA foi lançado em junho de 2001 em Bangalore e é exportado para o Reino Unido como o G-Wiz. O motor elétrico do G-Wiz possui uma potência de pico de 13 kW, e pode produzir e sustentar potência de 4,8 kW. O motor fornece frenagem regenerativa. Ele é alimentado por oito baterias de chumbo-ácido de 6 volts, que quando completamente carregadas trabalham numa faixa de "até 77 km". Uma carga completa consome 9,7 kWh de eletricidade. Estes valores implicam num custo de transporte de 13 kWh por 100 km.

Os fabricantes sempre citam os melhores valores de seus produtos. O que acontece na vida real? O desempenho real de um G-Wiz em Londres é mostrado na figura 20.21. Ao longo do curso de 19 recarregamentos, o custo de transporte médio deste G-Wiz é 21 kWh por 100 km - cerca de quatro vezes melhor do que um carro movido a combustível fóssil padrão. O melhor resultado foi 16 kWh por 100 km, e o pior foi 33 kWh por 100 km. Se você está interessado nas emissões de carbono, 21 kWh por 100 km é equivalente a 105 g CO₂ por km, assumindo-se que a eletricidade possui uma pegada de 500 g de CO₂ por kWh.

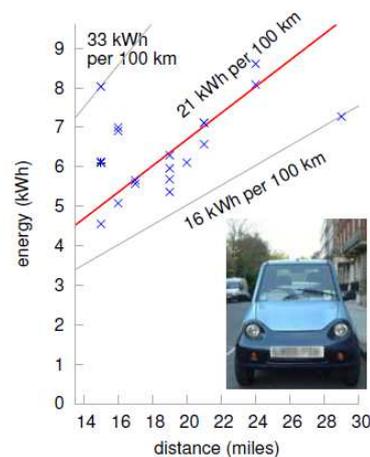


Figura 20.21. Eletricidade necessária para recarregar um G-Wiz versus a distância dirigida. Medidas foram feitas na alimentação.

Agora, o G-Wiz fica em uma ponta do espectro de desempenho. O que acontece se nós demandarmos mais - mais aceleração, mais velocidade, e uma maior alcance? No outro lado do espectro está o Tesla Roadster. O Tesla Roadster 2008 possui um alcance de 220 milhas (354 km); sua bateria de lítio-íon armazena 53 kWh e pesa 450 kg (120 Wh/kg). O veículo pesa 1220 kg e a potência máxima do seu motor é de 185 kW. Qual é o consumo energético deste carro musculoso? Incrivelmente, é melhor do que o do G-Wiz: 15 kWh por 100 km. A evidência de que um alcance de 354 km deve ser o suficiente para a maioria das pessoas vem do fato de que apenas 8,3% dos viajantes diários viajam mais do que 30 km para o seu lugar de trabalho.

Eu procurei pelos valores de desempenho de muitos veículos elétricos - eles estão listados nas notas de rodapé deste capítulo - e eles parecem ser consistentes com este resumo: veículos elétricos podem fornecer energia de transporte a um custo de aproximadamente 15 kWh por 100 km. Isto é cinco vezes melhor do que a nossa base dos carros movidos a combustíveis fósseis, e significativamente melhor do que qualquer carro híbrido. Uhu! Para alcançar o transporte econômico, nós não precisamos nos espremer juntos no transporte público - nós ainda podemos nos mover por aí, aproveitando todos os prazeres e liberdades de viajar sozinhos, graças aos veículos elétricos.

Este momento de comemoração parece um bom momento para desvelar o grande diagrama de resumo deste capítulo, a figura 20.23, que mostra as necessidades energéticas de todas as formas de transporte de passageiros que nós discutimos e mais algumas que ainda serão discutidas.

Ok, para acelerar isto, eu anuncio dois vencedores - transporte público e os veículos elétricos. Mas existem outras opções cruzando a linha de chegada? Nós ainda precisamos falar sobre o carro por ar comprimido e o carro a hidrogênio. Se qualquer um destes for melhor do que o carro elétrico, isto não afetará muito a longo prazo: qualquer uma destas três tecnologias que nós escolhamos, o combustível virá de uma fonte "verde".



Figura 20.22. Tesla Roadster: 15 kWh por 100 km. www.teslamotors.com.

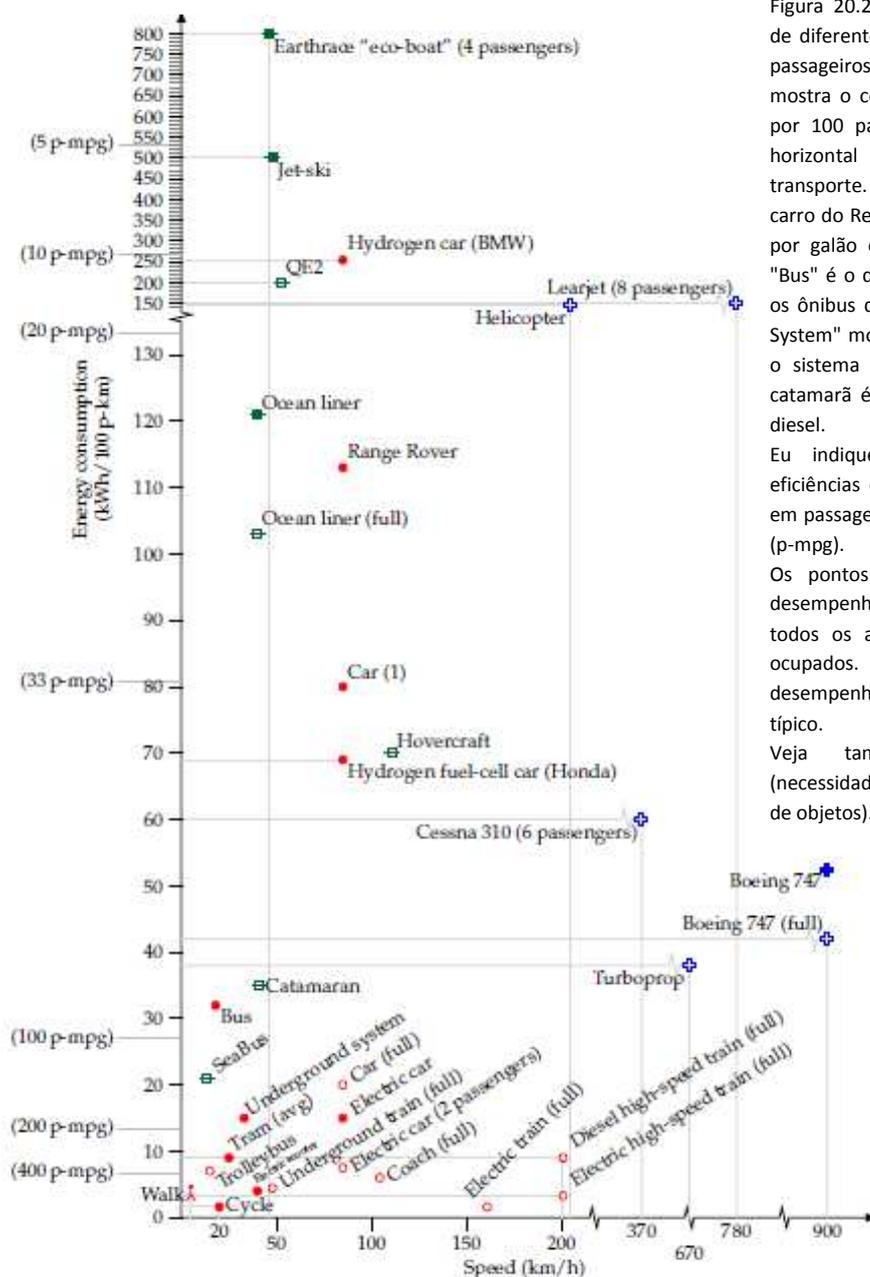


Figura 20.23. Necessidades energéticas de diferentes formas de transportes de passageiros. A coordenada vertical mostra o consumo energético em kWh por 100 passageiro-km. A coordenada horizontal indica a velocidade do transporte. O "Car (1)" é uma média do carro do Reino Unido fazendo 33 milhas por galão com um único ocupante. O "Bus" é o desempenho médio de todos os ônibus de Londres. O "Underground System" mostra o desempenho de todo o sistema subterrâneo de Londres. O catamarã é uma embarcação movida a diesel. Eu indiquei no lado esquerdo as eficiências equivalentes de combustível em passageiro-milhas por galão imperial (p-mpg). Os pontos ocios mostram o melhor desempenho de prática, assumindo que todos os assentos do veículo estejam ocupados. Pontos pintados indicam desempenho real do veículo em uso típico. Veja também a figura 15.8 (necessidades energéticas do transporte de objetos).

Carros por ar comprimido

Veículos movidos com ar comprimido não são uma ideia nova. Centenas de bondes movidos com ar comprimido e água quente passavam pelas ruas de Nantes e Paris de 1879 a 1911. A figura 20.24 mostra uma locomotiva pneumática alemã de 1958. Eu acredito que em termos de eficiência energética a técnica de ar comprimido para armazenar energia não é tão boa quanto baterias elétricas. O problema é que a compressão do ar gera *calor* que dificilmente será utilizado de forma eficiente; e a expansão do ar gera *frio*, outro subproduto que dificilmente será utilizado de forma eficiente. Mas a tecnologia

de compressão de ar pode ser superior à de baterias elétricas de outras formas. Por exemplo, o ar pode ser comprimido milhares de vezes e ele nunca acaba! É interessante observar, no entanto, que o primeiro produto vendido pela companhia Aircar é na verdade uma scooter elétrica. [www.theaircar.com/acf]

Existem histórias sobre a Tata Motors na Índia estarem fabricando carros pneumáticos, mas é difícil ter certeza se o por ar comprimido será revivido, uma vez que ninguém publicou as especificações de qualquer protótipo moderno. Aqui está a limitação fundamental: a densidade energética de armazenamento de energia do ar comprimido é de apenas 11-28 Wh por kg, que é similar a das baterias de chumbo-ácido, e aproximadamente cinco vezes menor do que a das baterias de lítio-íon. (Veja a figura 26.13, na página 256, para detalhes de outras tecnologias de armazenamento.) Então o alcance de um carro a ar comprimido será apenas tão bom quanto o alcance dos carros elétricos discutidos anteriormente. Sistemas de armazenamento de ar comprimido possuem, no entanto, três vantagens em comparação com as baterias: maior vida útil, construção mais barata, e menos químicos desagradáveis.

Carros a hidrogênio - tal como um dirigível

Eu acho que o "culto" ao hidrogênio é um movimento muito sensacionalista. Eu estaria satisfeito que provassem que eu estou errado, mas eu não vejo como o hidrogênio nos ajudará com nossos problemas energéticos. O hidrogênio não é uma fonte milagrosa de energia; ele é apenas um carregador de energia, como uma bateria recarregável. E é um carregador de energia bastante ineficiente, com uma gama de defeitos práticos.

A "economia de hidrogênio" recebeu apoio da revista *Nature* em uma coluna elogiando o governador da Califórnia Arnold Schwarzenegger por encher um Hummer movido a hidrogênio (figura 20.25). O artigo da *Nature* elogiou a visão de Arnold de carros movidos a hidrogênio substituírem os "modelos poluidores" com a citação "o governador é um herói real em ação a favor do clima". Mas a questão crítica que precisa ser feita quando tal heroísmo de hidrogênio está à mostra é "onde está a energia que vem para produzir o hidrogênio?" Além disso, converter energia para e do hidrogênio pode apenas ser feita de forma ineficiente - pelo menos com as tecnologias atuais.

Aqui estão alguns números:



Figura 20.24. Topo: um bonde pneumático utilizando ar e vapor em Nantes. Alimentar os bondes de Nantes consumia 4,4 kg de carvão (36 kWh) por veículo-km, ou 115 kWh por 100 p-km, se os bondes estivessem lotados. [5qhvcb]

Baixo: uma locomotiva pneumática; peso 9,2 t, pressão 175 bar, potência de 26 W; foto fornecida cortesmente por Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert, e Frankfurter Feldbahnmuseum.



Figura 20.25. O Hummer H2H: abraçando a revolução verde, da maneira norte-americana. Foto gentilmente fornecida pela General Motors.



Figura 20.26. BMW Hydrogen 7. Consumo energético: 254 kWh por 100 km. Foto da BMW.

- No projeto CUTE²² (*Clean Urban Transport for Europe*²³), que foi realmente demonstrar a viabilidade e confiabilidade de ônibus a células a combustível e tecnologia de hidrogênio, alimentar os ônibus a hidrogênio necessitava entre 80% e 200% *mais* energia do que o ônibus base à diesel.
- Encher o *Hydrogen 7*, o carro movido a hidrogênio feito pela BMW, requer 254 kWh por 100 km - 220% *mais* energia do que a média do carro europeu.



Figura 20.27. O "eco-barco" Earthrace. Foto de David Castor.



Figura 20.28. O sedan movido a hidrogênio Honda FCX Clarity, com um Jamie Lee Curtis como escala.

Foto fornecida como cortesia da automobiles.honda.com

Se a sua tarefa era "por favor pare de utilizar combustíveis fósseis para transporte, permitindo-se supor que *infinitas* quantidades de eletricidade verde estão à disposição de graça", então é claro que uma solução de transporte perdulária em energia como o hidrogênio poderia ser uma candidata (apesar de que o hidrogênio enfrenta outros problemas). Mas a *energia verde não é gratuita*. De fato, conseguir energia verde na escala do nosso consumo atual será bastante desafiador. O desafio do combustível fóssil é um desafio energético. O problema das mudanças climáticas é um problema energético. Nós precisamos nos focar em soluções que consumam menos energia, não "soluções" que usem mais! *Eu desconheço forma de transporte em terra cujo consumo energético seja pior do que este carro a hidrogênio.* (Os únicos métodos de transporte que eu conheço que são piores são os jet-skis - usando cerca de 500 kWh por 100 km - o barco de velocidade movido a biodiesel *Earthrace*, absurdamente chamado de eco-barco, que consome 800 kWh por 100 p-km.)

Os advogados do hidrogênio podem dizer "o BMW Hydrogen 7 é apenas um protótipo inicial, e é um carro de luxo com muita força - a tecnologia se tornará mais eficiente". Bem, eu espero que sim, porque ela tem muito o que correr atrás. O Tesla Roadster (figura 20.22) é um protótipo inicial também, e também é um carro de luxo com muita força. E é mais do que dez vezes mais eficiente energeticamente do que o Hydrogen 7! Sinta-se à vontade para investir o seu dinheiro no cavalo do hidrogênio se você quiser, e se ele vencer no final, tudo bem. Mas parece loucura apostar num cavalo que está tão atrás na corrida. Apenas olhe para a figura 20.23 - se eu não tivesse

²² N.T. Gracioso

²³ N.T. Transporte Urbano Limpo para a Europa

espremido o topo do eixo vertical, o carro a hidrogênio não teria nem cabido na página!

Sim, o carro a célula de combustível da Honda, o FCX Clarity, é melhor - ele anda por aí com 69 kWh por 100 km - mas a minha previsão é que depois que todo o alarde de "nenhuma emissão" termine, nós descobriremos que os carros a hidrogênio utilizam tanta energia quanto os carros a combustíveis fósseis atuais.

Aqui estão outros problemas com o hidrogênio. O hidrogênio é um modo menos conveniente de armazenamento de energia do que a maioria dos combustíveis líquidos, por causa da sua massa, independente se está armazenado como um gás à alta pressão ou como líquido (o que requer uma temperatura de -253 °C). Mesmo a uma pressão de 700 bar (o que requer um vaso de pressão robusto) sua densidade energética (energia por unidade de volume) é 22% da gasolina. O tanque criogênico da BMW Hydrogen 7 pesa 120 kg e armazena 8 kg de hidrogênio. Além disso, o hidrogênio gradualmente vaza de qualquer container prático. Se você estacionar o seu carro à hidrogênio na estação ferroviária com um tanque cheio e voltar uma semana depois, você deve esperar que a maior parte do hidrogênio tenha se ido.

Algumas questões sobre veículos elétricos

Você mostrou que carros elétricos são mais eficientes energeticamente do que carros a combustíveis fósseis. Mas eles são melhores se o nosso objetivo é reduzir as emissões de CO₂, e a eletricidade ainda é gerada por estações de potência fósseis?

Este é um cálculo bastante fácil de realizar. Assuma que o custo energético do veículo elétrico é 20 kWh(e) por 100 km. (Eu acho que 15 kWh(e) por 100 km é perfeitamente possível, mas vamos nos manter céticos neste cálculo.) Se a eletricidade da rede possui uma pegada de carbono de 500 g por kWh(e) então as emissões efetivas deste veículo são **100 g CO₂ por km**, o que é tão bom quanto o melhor dos carros a combustíveis fósseis (figura 20.9). Então eu concluo que mudar para carros elétricos *já* é uma boa ideia, mesmo antes que nós tornemos o nosso fornecimento de eletricidade mais verde.

Carros elétricos, assim como combustíveis fósseis possuem custos para manufatura e uso. Carros elétricos podem custar menos para serem usados, mas se as baterias não duram

muito tempo, você não deveria prestar mais atenção aos custos de produção?

Sim, este é um bom ponto. O meu diagrama de transporte mostra apenas o custo de utilização. Se carros elétricos necessitam de baterias novas a cada poucos anos, meus números podem ser subestimados. Espera-se que as baterias em um Prius durem 10 anos, e um novo conjunto de baterias custaria £3500. Alguém gostaria de possuir um Prius de 10 anos de idade e pagar este custo? Prevê-se que a maioria dos Prius sejam sucata com 10 anos de idade. Esta é com certeza uma preocupação para todos os veículos elétricos que contém baterias. Eu acho que eu estou otimista que, no que nós mudemos para os veículos elétricos, a tecnologia das baterias melhores.

Eu vivo em um local quente. Como eu poderia dirigir um carro elétrico? Eu exijo potência para o ar condicionado!

Há uma solução elegante para esta demanda: coloque 4 m² de painéis fotovoltaicos nas superfícies voltadas para cima do carro. Se o ar condicionado for necessário, o sol com certeza deve estar brilhando. Painéis com 20% de eficiência gerarão até 800 W, o que é o suficiente para o ar condicionado do carro. Os painéis até podem fazer uma contribuição útil para carregarem os carros quando eles estiverem estacionados, também. A refrigeração de veículos alimentada por energia solar foi inclusa no Mazda em 1993; as células solares foram embutidas na superfície de vidro do teto.

Eu vivo em um local frio. Como eu poderia dirigir um carro elétrico? Eu exijo potência para o aquecimento!

O motor de um veículo elétrico, quando estiver em funcionamento, utilizará em média algo como 10 kW com uma eficiência de 90-95%. Parte da potência perdida, os outros 5-10%, serão dissipados na forma de calor no motor. Talvez os carros elétricos que serão utilizados em locais frios possam ser cuidadosamente desenvolvidos de modo que esse calor gerado pelo motor, que pode somar de 250 a 500 W, possa ser canalizado do motor para dentro do carro. Tanta potência assim forneceria um desembaçador significativo ou serviria para aquecimento dentro do carro.

As baterias de lítio-íons são seguras no caso de um acidente?

Algumas baterias lítio-íons não são seguras quando curto-circuitadas ou superaquecidas, mas a indústria de baterias está agora produzindo baterias mais seguras, como as

de fosfato de lítio. Existe um vídeo divertido sobre segurança no www.valence.com.

Existe lítio suficiente para fabricar todas as baterias para uma grande frota de carros elétricos?

Estima-se que as reservas mundiais de lítio sejam de 9,5 milhões de toneladas em depósitos de minério (p227). Uma bateria de lítio-íon é 3% de lítio. Se nós assumirmos que cada veículo possui uma bateria de 200 kg, então nós precisamos de 6 kg de lítio por veículo. Então as reservas estimadas são o suficiente para produzir baterias para 1,6 bilhões de veículos. Isto é mais do que o número de carros no mundo atualmente (aproximadamente 1 bilhão) - mas não muito mais, então a quantidade de lítio pode se tornar uma preocupação, especialmente quando nós levamos em consideração as ambições competitivas da posse da fusão nuclear (Capítulo 24) para empanturrar seus reatores com lítio. Existem muitas vezes mais lítio na água do mar, então talvez os oceanos nos forneçam uma reserva útil. Contudo, o especialista em lítio R. Keith Evans diz "preocupações sobre a disponibilidade do lítio para baterias de veículos híbridos ou elétricos ou outras aplicações que possam surgir são infundadas". E de qualquer maneira, outras tecnologias de baterias sem lítio tais como as recarregáveis de zinco-ar estão sendo desenvolvidas [www.revolttechnology.com]. Eu acho que o carro elétrico é o futuro!

O futuro da aviação

Diz-se que o Airbus superjumbo A380 é "uma aeronave altamente eficiente com o combustível". De fato, ela queima apenas 12% menos combustível por passageiro do que um 747.

A Boeing anunciou avanços similares: o novo intercontinental 747-8 deles, alardeado por suas propriedades para salvar o planeta, é (de acordo com os marqueteiros da Boeing) apenas 15% mais eficiente com o combustível do que um 747-400.

Esta delgada taxa de progresso (em contraste com os carros, cujos avanços na tecnologia fornecem melhoras na eficiência de duas vezes ou até dez vezes) é explicada no Apêndice Técnico C. Os aviões estão lutando contra um limite fundamental imposto pelas leis da física. Qualquer avião, independente de seu tamanho, *precisa* gastar uma energia de cerca de 0,4 kWh por ton-km para manter-se no ar e manter-se



Figura 20.29. Airbus A380.

em movimento. Os aviões já foram otimizados fantasticamente, e não existe prospecto de quaisquer melhoras significativas na eficiência dos aviões.

Por um tempo, eu pensei que a maneira de resolver o problema de transporte de longa distância era reverter para a forma como ele era feito antes dos aviões: transatlânticos. Então eu olho para os números. A triste verdade é que os transatlânticos usam mais energia por passageiro-km do que jatos jumbo. O QE2 consome quatro vezes mais energia por passageiro-km do que um jumbo. Ok, é uma embarcação de luxo; será que nós podemos fazer melhor com linhas de classe turística mais lentas? De 1952 a 1968, a maneira econômica de cruzar o Atlântico era em dois navios holandeses conhecidos como "Os Gêmeos Econômicos", o Maasdam e o Rijnsdam. Estes viajavam à 16,5 nós (30,5 km/h), então a travessia entre a Grã-Bretanha até Nova York levava oito dias. Seus consumos energéticos, caso eles estivessem com todos os seus 893 passageiros, eram de 103 kWh por 100 p-km. Com uma ocupação típica de 85%, o consumo energético era de **121 kWh por 100 p-km** - mais do que duas vezes o do jato jumbo. Para ser justo com os barcos, eles não estão apenas fornecendo transporte: eles também fornecem aos passageiros e tripulação ar quente, água quente, iluminação e entretenimento por vários dias; mas a energia economizada ao voltar para casa por ficar enfiado no barco é ofuscada pelo consumo energético do barco, o que, no caso do QE2, é cerca de 3000 kWh por dia por passageiro.

Então, infelizmente, eu não acho que os barcos vencerão os aviões no consumo energético. Se eventualmente nós queremos uma maneira de viajar longas distâncias sem combustíveis fósseis, talvez navios movidos à energia nuclear sejam uma opção interessante (figuras 20.31 & 20.32).

E o transporte de carga?

Navegações internacionais são um usuário surpreendentemente eficiente de combustíveis fósseis; então acabar com o uso de combustíveis fósseis dos fretes rodoviários é uma prioridade maior do que acabar com o uso de combustíveis fósseis nos navios. Mas combustíveis fósseis são um recurso finito, e eventualmente os navios podem ser alimentados por alguma outra coisa. Biocombustíveis *podem* funcionar. Outra opção seria a energia nuclear. O primeiro navio movido a energia nuclear para o transporte de carga e



Figura 20.30. TSS Rijnsdam.



Figura 20.31. NS Savannah, o primeiro navio comercial de carga movido à energia nuclear, passando por baixo da ponte Golden Gate em 1962.

passageiros foi o NS Savannah, inaugurado em 1962 como parte da iniciativa Átomos Para a Paz²⁴ do presidente Dwight D. Eisenhower (figura 20.31). Alimentado por um reator nuclear de 74-MW dirigindo um motor de 15-MW, o Savannah tinha uma velocidade de serviço de 21 nós (39 km/h) e podia carregar 60 passageiros e 14 000 toneladas de carga. Isto é um custo de transporte de carga de 0,14 kWh por ton-km. Ela podia viajar 500 000 km sem reabastecer. Já existem muitos navios movidos a energia nuclear, tanto militares quanto civis. A Rússia possui dez quebradores de gelo movidos à energia nuclear, por exemplo, dos quais sete ainda estão ativos. A figura 20.32 mostra o quebrador de gelo Yamal, que possui dois reatores de 171-MW, e motores que podem fornecer 55 MW.



Figura 20.32. O quebrador de gelo movido à energia nuclear Yamal, carregando 100 turistas para o Pólo Norte em 2001. Foto de Wofratz.

"Espere aí! Você não mencionou a levitação magnética!"

A companhia alemã, Transrapid, que fez o trem maglev de Xangai, na China (figura 20.33), diz: "o Sistema Transrapid Superspeed Maglev é incomparável quando se trata de emissão de ruído, consumo energético, e uso de terra. O sistema inovador sem-contato fornece mobilidade sem o meio ambiente caindo na beira da estrada."



Figura 20.33. Um trem maglev no Aeroporto Internacional Pudong, em Xangai.

"dirigir sem rodas;
voar sem asas."

Foto de Alex Needham.

A levitação magnética é uma das muitas tecnologias que fica sensacionalista quando as pessoas estão discutindo questões energéticas. Em termos de consumo energético, a comparação com outros trens rápidos é na realidade não tão lisonjeira quanto o sensacionalismo indica. O site da Transrapid compara o Transrapid com o InterCityExpress (ICE), um trem de alta velocidade elétrico.

Trens rápidos comparados à 200 km/h (125 mph)	
Transrapid	2,2 kWh por 100 assentos-km
ICE	2,9 kWh por 100 assentos-km

As principais razões para o maglev ser levemente melhor do que o ICE são: o motor de propulsão magnética possui alta eficiência; o trem em si possui pouca massa, já que a maior parte do sistema de propulsão está nos trilhos ao invés de no trem em si; e mais passageiros estão dentro do trem



Figura 20.34. Nove em dez veículos em Londres são G-Wizes. (E 95% dos dados estatísticos são inventados.)

²⁴ *Atoms for Peace*

uma vez que não se consome espaço com os motores. Oh, e talvez por que os dados do website da companhia do maglev, estão colocados para que o maglev pareça melhor!

Incidentalmente, as pessoas que já viram o trem Transrapid em Xangai me dizem que na sua velocidade máxima ele "é tão silencioso quanto um avião a jato".

Observações e Leitura Complementar

N pg

150 Uma estatística bastante citada diz algo parecido com "apenas 1 por cento da energia utilizada por um carro é gasta em locomover o motorista". De fato, a porcentagem deste mito varia em tamanho no que ele se desloca ao longo da comunidade urbana. Algumas pessoas dizem "5% da energia vai para mover o motorista". Outras dizem "meramente três décimos de 1 por cento da energia do combustível é usada para mover o motorista". [4qgg8q] Minha opinião, por sinal, é que nenhuma destas porcentagens está correta ou ajuda de alguma forma.

- O desempenho das bicicletas é mais ou menos o mesmo dos eco-carros. Andar em uma bicicleta de uma pessoa custa cerca de 1,6 kWh por 100 km, assumindo uma velocidade 20 km/h. Para detalhes e referências, veja o Apêndice A, na página 326.

- O trem de 8 compartimentos de Cambridge para Londres (figura 20.4). pesa 275 toneladas, e pode carregar 584 passageiros sentados. Sua velocidade máxima é 100 mph (161 km/h), e a potência de saída é 1,5 MW. Se todos os acentos estiverem ocupados, este trem na sua velocidade máxima consome no máximo 1,6 kWh por 100 passageiros-km.

151 O metrô de Londres. Uma linha de trem Victoria consiste de quatro 30,5-ton e quatro 20,5-ton vagões (o primeiro carregando o motor). Carregado, um trem padrão pesa 228 tons. A velocidade máxima é de 45 milhas/h. A velocidade média é de 31 mph. Um trem com a maioria dos seus acentos ocupados carrega cerca de 350 passageiros; quando as pessoas estão esmagadas umas pelas outras no trem, o trem carrega cerca de 620 passageiros. O consumo energético em horário de pico é cerca de 4,4 kWh por 100 passageiros-km (Catling, 1966).

152 Trens de alta velocidade.

Um trem do tipo "Intercity 125²⁵" movido a diesel (à direita na figura 20.5) pesa 410 toneladas, quando viaja a 125 mph, a potência fornecida "no trilho" é 2,6 MW. O número de passageiros em um trem lotado é 500. O consumo médio de combustível é 0,84 litros de diesel por 100 acentos-km [5o5x5m], o que dá um custo de transporte de cerca de **9 kWh por 100 acentos-km**. O trem elétrico Class 91 (na esquerda na figura 20.5) viaja a 140 mph (225 km/h) e consome 4,5 MW. De acordo com Roger Kemp, o consumo médio de energia deste trem é **3 kWh por 100 acentos-km** [5o5x5m]. O documento do governo [5fbeg9] diz que os trens da linha principal da costa leste e da linha principal da costa oeste consomem cerca de 15 kWh por km (o trem inteiro). O número de acentos em cada trem é de 526 ou 470 respectivamente. Então isto equivale a **2,9-3,2 kWh por 100 acentos-km**.

- o custo energético total de todos os trens subterrâneos de Londres foi 15 kWh por 100 p-km ... o custo energético de todos os ônibus de Londres foi 32 kWh por 100 p-km. Fonte: [679rpc]. Fonte para velocidades de trem e de ônibus: Ridley e Catling (1982).
- Croydon Tramlink.
www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf,
www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf,
www.croydon-tramlink.co.uk.
- 155 a provisão de excelentes instalações de ciclovias... O guia de design de ruas do Reino Unido [www.manualforstreets.org.uk] encoraja o design de ruas para que se faça 20 milhas por hora em velocidade natural. Veja também Franklin (2007).
- 157 Um método justo e simples para lidar com a cobrança de congestionamento. Eu aprendi uma forma brilhante de automatizar a cobrança de congestionamento com Stephen Salter. Uma cobrança diária simples, como cobrada em Londres, envia apenas um sinal cru para os motoristas; uma vez que o proprietário do carro tenha decidido pagar a cobrança diária e dirigir na zona de congestionamento, ele não tem incentivo para dirigir pouco na zona. Assim como ele não é recompensado com qualquer desconto se ele escolher

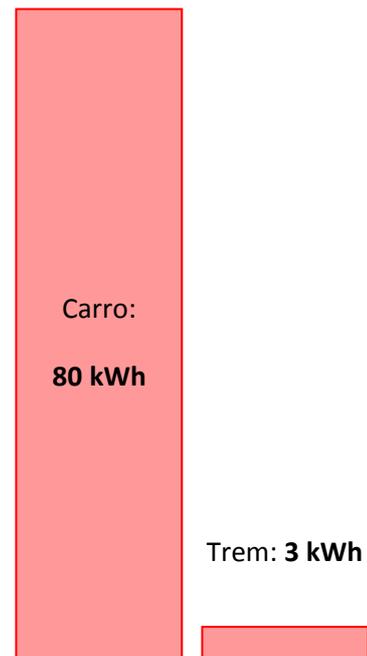


Figura 20.35. 100 km em um carro com uma única pessoa, comparados com 100 km em um trem elétrico em alta velocidade completamente ocupado.

²⁵ Viaja entre cidades a uma velocidade de 125 milhas por hora.

cuidadosamente rotas na zona que não estiver congestionada.

Ao invés de ter uma autoridade centralizada que decide em adiantamento quando e onde as zonas de cobrança de congestionamento são, com monitoramento caro e intrusivo e gravando o movimento dos veículos dentro de todas estas zonas, Salter possui um método anônimo mais simples e descentralizado, de cobrar dos motoristas por dirigirem em trânsito lento e pesado, sempre e onde quer que ele exista. O sistema operaria no país inteiro. Aqui está como ele funciona. Nós queremos um aparelho que responda a questão "quão congestionado está o trânsito no qual eu estou dirigindo?" Uma boa medida de congestionamento é "quantos outros veículos ativos estão perto do meu?" Em trânsito rápido, o espaçamento entre os veículos é maior do que em trânsito lento. O tráfego que está resultando em linhas tediosas é o mais denso. O número de veículos próximos que são ativos podem ser sentidos anonimamente ao colocar em cada veículo um transmissor/receptor de rádio (como um telefone móvel barato) que transmita bips de rádio constantes sempre que o motor estiver funcionando e que conte o número de bips que ele ouve dos outros veículos. A taxa de congestionamento seria proporcional ao número de bips recebidos; esta taxa poderia ser paga em estações de reabastecimento sempre que o veículo for reabastecido. O transmissor/receptor de rádio substituiria o atual selo do imposto de circulação do Reino Unido.

- 158 **Rotores e hidráulica salvam pelo menos 70% da energia de frenagem.** Ar comprimido é utilizado para frenagem regenerativa em caminhões; eaton.com diz "a partida hidráulica ajuda" na captura de 70% da energia cinética. [5cp27j]

O sistema de rotor da flybridsystems.com também captura 70% da energia cinética. www.flybridsystems.com/F1System.html

Frenagem Regenerativa elétrica economiza 50%. Fonte: E4tech (2007).

- **Baterias elétricas capazes de fornecer 60 kW pesariam cerca de 200 kg.** Boas baterias lítio-íons possuem uma potência específica de 300 W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).



Figura 20.36. Bondes funcionando perfeitamente em Istanbul e em Praga também.

- O carro padrão no Reino Unido emite 168 g CO₂ por km. Este é o valor para 2006 (King, 2008). As emissões médias de um novo veículo de passageiros nos EUA era de 255 g por km (King, 2008).
 - O Toyota Prius possui um motor mais eficiente. O motor a gasolina do Prius utiliza o ciclo Atkinson, em contraste com o convencional ciclo Otto. Por misturar astutamente a energia elétrica e a gasolina de acordo com a vontade do motorista, o Prius fica com um motor menor do que o de um carro com o seu peso, e converte gasolina em trabalho de forma mais eficiente do que o motor convencional a gasolina.
 - Tecnologias híbridas fornecem uma economia de combustível de 20 ou 30%. Por exemplo, do relatório de pesquisa de Hitachi descrevendo trens híbridos (Kaneko et al., 2004): geração de potência de alta eficiência e frenagem regenerativa são "esperados a fornecer economias de aproximadamente 20% se comparados com os convencionais trens movidos a diesel".
- 161 Apenas 8,3% dos viajantes diários viajam mais do que 30 km para o seu lugar de trabalho. Fonte: Eddington (2006). A dependência do alcance de um carro elétrico no tamanho de sua bateria é discutido no Apêndice A (p326).
- Muitos veículos elétricos. Eles estão todos listados abaixo, sem ordem em particular. Os valores de desempenho são principalmente dos fabricantes. como nós vimos na p160, desempenhos na vida real nem sempre conferem com aqueles fornecidos pelos fabricantes.

Carro elétrico Th!nk Electric da Noruega. O Th!nk Ox de cinco portas possui um alcance de 200 km. Suas baterias pesam 350 kg. E o carro pesa 1500 kg no total. Seu consumo energético é aproximadamente 20 kWh por 100 km. www.think.no



Figura 20.37. Th!nk Ox. Foto do www.think.no.

Electric Smart Car "A versão elétrica é alimentada por um motor de 40 bhp, tem autonomia de até 70 milhas, e possui uma velocidade máxima de 70 mph. A recarga é feita através de um ponto de potência elétrica padrão e custa cerca de £1,20, produzindo o equivalente a 60 g/km de emissões de dióxido de carbono na estação de potência. [cf. o equivalente ao Smart movido a

gasolina: 116 g/km.] Uma recarga completa leva cerca de oito horas, mas a bateria pode ser usada de modo que se drene até 80% dela- carregue-se até 80% dela em cerca de três horas e meia." [www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488]

Berlingo Electrique 500E, uma van de entregas urbana (figura 20.20), possui 27 baterias nicad e um motor de 28 kW. Ele pode transportar uma carga de 500 kg. Velocidade máxima: 100 km/h; alcance: 100 km. 25 kWh por 100 km. (Estimativa gentilmente fornecida pelo proprietário da Berlingo). [4wm2w4]

iMiEV Este carro elétrico é projetado para ter um alcance de 160 km com uma bateria de 16 kWh. Isto são 10 kWh por 100 km - melhor do que o G-Wiz - e se é difícil encontrar dois europeus adultos em um G-Wiz, o protótipo da Mitsubishi possui quatro portas e quatro assentos grandes (figura 20.38). [658ode]

EV1 O General Motors EV1 de dois assentos possui um alcance de 120 a 240 km por carga, com baterias híbridas de níquel-metal contendo 26,4 kWh. Este é um consumo energético entre 11 e 22 kWh por 100 km.

Lightning (figura 20.39) - possui quatro motores sem escovas de 120 kW, um em cada roda, frenagem regenerativa, e baterias rapidamente carregáveis Nanosafe de titanato de lítio. Uma capacidade de 36 kWh fornece um alcance de 200 milhas (320 km). Isto são 11 kWh por 100 km.

Aptera Este fantástico e escorregadio peixe é um veículo de dois assentos, que dizem possuir um custo energético de 6 kWh por 100 km. Ele possui um coeficiente de arrasto de 0,11 (figura 20.40). Modelos elétricos e híbridos estão sendo desenvolvidos.

Loremo Como o Aptera, o Loremo (figura 20.41) possui uma pequena área frontal e pequeno coeficiente de arrasto (0,2) e estará disponível nas versões de combustível fóssil e elétrica. Ele possui dois assentos para adultos e dois assentos para crianças de frente um para o outro. O Loremo EV terá baterias de lítion-ion e prevê-se que



Figura 20.38. O iMiEV da Mitsubishi Motors Corporation. Ele possui um motor de 47 kW, pesa 1080 kg, e possui uma velocidade máxima de 130 km/h.



Figura 20.39. Lightning: 11 kWh por 100 km. Foto da www.lightningcarcompany.co.uk.



Figura 20.40. O Aptera. 6 kWh por 100 km. Foto da www.aptera.com.



Figura 20.41. O Loremo. 6 kWh por 100 km. Foto da evolution.loremo.com.

terá um custo energético de 6 kWh por 100 km, na velocidade máxima de 170 km/h, e um alcance de 153 km. Ele pesa 600 kg.

eBox O eBox possui uma bateria de lítio-íon com uma capacidade de 35 kWh e um peso de 280 kg; e um alcance de 140-180 milhas. Seu motor possui uma potência de pico 120 kW e pode manter uma potência constante de 50 kW. Consumo energético: 12 kWh por 100 km.

Ze-0 Um carro de cinco acentos, e de cinco portas. Velocidade máxima: 50 mph. Alcance: 50 milhas. Peso, incluindo baterias: 1350 kg. Baterias de chumbo-ácido com capacidade de 18 kWh. Motor: 15 kW. 22,4 kWh por 100 km.

e500 Um carro italiano no estilo Fiat, com duas portas e 4 acentos. Velocidade máxima: 60 mph. Alcance dirigindo na cidade: 75 milhas. Bateria: polímero de lítio-íon.

MyCar O MyCar é um carro de design italiano com dois acentos. Velocidade máxima: 40 mph. Alcance máximo: 60 milhas. Bateria de chumbo-ácido.

Mega City Um carro de dois acentos com uma potência máxima contínua de 4 kW e velocidade máxima de 40 mph: 11,5 kWh por 100 km. Peso sem carga (incluindo as baterias) - 725 kg. As baterias possuem uma capacidade de 10 kWh.

Xebra Proclama-se que tenha um alcance de 40 km com uma carga de 4,75 kWh. 12 kWh por 100 km. Velocidade máxima de 65 km/h. Baterias de chumbo-ácido.

TREV O Veículo de Energia Renovável de Dois Acentos (*Two-Seater Renewable Energy Vehicle*) (TREV) é um protótipo desenvolvido pela University of South Australia (figura 20.42). Este triciclo possui um alcance de 150 km, uma velocidade máxima de 120 km/h, uma massa de 300 kg, e baterias a base de polímero de lítio-íon pesando 45 kg. Durante uma viagem real de 3000 km, o consumo energético foi de 6,2 kWh por 100 km.



Figura 20.42. O TREV. 6 kWh por 100 km. Foto do www.unisa.edu.au.

Venturi Fetish Possui uma bateria de 28 kWh, pesando 248 kg. O carro pesa 1000 kg. Alcance 160-250 km. Isto são 11-17 kWh por 100 km.
www.venturifetish.fr/fetish.html

Toyota RAV4 EV Este veículo - uma SUV toda elétrica - foi vendida pela Toyota entre 1997 e 2003 (figura 20.43). O RAV4 EV possui 24 baterias NiMH de 12-volts 95 Ah capazes de armazenar 27,4 kWh de energia; e um alcance de 130 a 190 km. Então isto dá um consumo energético de 14-21 kWh por 100 km. O RAV4 EV era popular na força policial de Jersey.



Figura 20.43. Toyota RAV4 EV. Foto por Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com.

Phoenix SUT - uma "camionete esportiva" de cinco acentos feita na Califórnia - possui um alcance de "até 130 milhas" de um banco de baterias de lítio-íon de 35 kWh (isto são 17 kWh por 100 km). As baterias podem ser recarregadas por uma saída especial em 10 minutos.
www.gizmag.com/go/7446

Modec Delivery Vehicle A Modec transporta duas toneladas a uma distância de 100 milhas. Tara pesa 3000 kg.
www.modec.co.uk.

Smith Ampere Uma van pequena de entrega, baterias de lítio-íon de 24 kWh. Alcance de "mais do que 100 km". www.smithelectricvehicles.com.

Electric minibus Do www.smithelectricvehicles.com:

Banco de baterias lítio-íon de 40 kWh. Motor de 90 kW com frenagem regenerativa. Alcance de "até 100 milhas". 15 acentos. Tara de 3026 kg. Capacidade de carga de 1224 kg. Isto é um desempenho do veículo de no máximo 25 kWh por 100 km. Se o veículo estiver totalmente ocupado, ele poderia fornecer transporte a um custo impressionante de 2 kWh por 100 km.

Electric coach O ônibus Thunder Sky possui um alcance de 180 milhas e um tempo de recarga de três horas. www.thunder-sky.com

Scooters Elétricas A Vectrix é uma scooter substancial (figura 20.44). Sua bateria (híbrida de níquel metal) possui uma capacidade de 3,7 kWh. Ela pode ser dirigida até 68 milhas a 25 milhas/h (40 km/h), com



Figura 20.44. Vectrix: 2,75 kWh por 100 km. Foto do www.vectrix.com.

uma carga de duas horas de uma tomada elétrica normal. Isto são 110 km por 3 kWh, ou 2,75 kWh por 100 km. Ela possui uma velocidade máxima de 62 mph (100 km/h). Seu peso é de 210 kg e possui uma potência de pico 20 kW. www.vectrix.com.

O "Oxygen Cargo" é uma scooter menor. Ele pesa 121 kg, possui um alcance de 38 milhas, e leva 2-3 horas para recarregar. Potência de pico: 3,5 kW; velocidade máxima 28 mph. Ela possui duas baterias de lítio-íons e frenagem regenerativa. O alcance pode ser estendido com a adição de baterias extras, que armazenam cerca de 1,2 kWh e pesam 15 kg cada. Consumo energético: 4 kWh por 100 km.

163 A densidade energética de armazenamento de energia do ar comprimido é de apenas 11-28 Wh por kg. O limite teórico, assumindo compressão isotérmica perfeita: se 1 m³ de ar ambiente é lentamente comprimido em um container de 5 litros a 200 bar, a energia potencial armazenada é de 0,16 kWh em 1,2 kg de ar. Na prática, o container de 5 litros apropriado para este tipo de pressão pesa cerca de 7,5 kg se feito de aço, ou 2 kg se feito de kevlar ou fibra de carbono, e a densidade energética global atingida seria cerca de 11-28 Wh por kg. A densidade energética teórica é a mesma, qualquer que seja o volume do container.

163 Arnold Schwarzenegger... encher uma Hummer movida a hidrogênio. *Nature* **438**, 24 de novembro de 2005. Eu não estou dizendo que o hidrogênio nunca será útil para o transporte; mas eu esperaria que uma revista tão distinta quanto a *Nature* falasse sobre as questões do hidrogênio com algum pensamento crítico, não euforia.

Hidrogênio e células a combustível não são o caminho a seguir. A decisão pela administração de Bush e pelo Estado da Califórnia para seguir o caminho do hidrogênio é a pior decisão dos últimos anos.

James Woolsey, Presidente do Conselho Consultivo da Fundação Combustíveis Limpos EUA, 27 de novembro de 2007.

Em setembro de 2008, o *The Economist* escreveu "Quase ninguém compete com isso... eventualmente a maioria dos carros será alimentada apenas por baterias."

Por outro lado, ouvir mais dos advogados do transporte a base de hidrogênio, veja as páginas do Instituto Rocky Mountain sobre o "HyperCar" www.rmi.org/hypercar/.

- No projeto *Clean Urban Transport for Europe* a energia necessária para alimentar os ônibus a hidrogênio necessitava entre 80% e 200% maior do que para alimentar os ônibus base à diesel. Fonte: CUTE (2006); Binder et al. (2006).

- Abastecer o carro movido a hidrogênio feito pela BMW necessita três vezes mais energia do que um carro normal. Metade da inicialização do "Hydrogen 7" da BMW é levado no tanque de 170 litros de hidrogênio, que guarda 8 kg de hidrogênio, conferindo um alcance de 200 km com o hidrogênio [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. O poder calorífico do hidrogênio é 39 kWh por kg, e o custo do melhor processo para produzir o hidrogênio é 63 kWh por kg (feito de 52 kWh de gás natural e 11 kWh de eletricidade) (CUTE, 2006). Então encher um tanque de 8 kg possui um custo energético de pelo menos 508 kWh; e se este tanque realmente fornecer 200 km, o custo energético é 254 kWh por 100 km.

O Hydrogen 7 e seus primos com células a combustível são, de diversas formas, simples distrações chamativas.

David Talbot, Revisão de Tecnologia do MIT.

www.technologyreview.com/Energy/18301

- O carro de célula a combustível da Honda, o FCX Clarity, pesa 1625 kg, armazena 4,1 kg de hidrogênio a uma pressão de 345 bar, e diz-se que tem um alcance de 280 milhas, fazendo 57 milhas por kg de hidrogênio (91 km por kg) em condições de direção mista [czjjo], [5a3ryx]. Utilizando o custo para criar o hidrogênio, mencionado previamente, e assumindo que o gás natural é utilizado como principal fonte energética, este carro possui um custo de transporte de 69 kWh por 100 km.

A Honda pode estar habilitada a ludibriar os jornalistas a pensarem que os carros a hidrogênio possuem "zero emissão" mas infelizmente eles não podem enganar o clima.

Merrick Godhaven

- 167 Uma bateria de lítio-íon é 3% de lítio. Fonte: Fisher et al. (2006)

- O especialista em lítio R. Keith Evans diz "preocupações sobre a disponibilidade do ... são infundadas". - Evans (2008).
- 168 Dois navios holandeses conhecidos como "Os Gêmeos Econômicos". www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
QE2: www.qe2.org.uk
- 169 O trem de levitação magnética Transrapid. www.transrapid.de.

21 Aquecimento Inteligente

No último capítulo, nós aprendemos que a eletrificação pode reduzir o consumo energético com transporte para um quinto dos níveis atuais; e que o transporte público e a bicicleta são 40 vezes mais eficientes energeticamente do que dirigir um carro. E para o aquecimento? Que tipo de economias de energia a mudança de tecnologia ou no estilo de vida pode oferecer?

A potência usada para aquecer uma edificação é dada pela multiplicação de três quantidades:



Figura 21.1. Minha casa.

$$\text{Potência usada} = \frac{\text{diferença média de temperatura} \times \text{permeabilidade da edificação}}{\text{eficiência do sistema de aquecimento}}$$

Deixe-me explicar esta fórmula (que é discutida em detalhes no Apêndice E) com um exemplo. A minha casa é uma casa geminada de três quartos construída por volta de 1940 (figura 21.1). A diferença média de temperatura entre o interior e o exterior depende do ajuste do termostato e do clima. Se o termostato está permanentemente a 20°C, a diferença média de temperatura pode ser 9°C. A permeabilidade da edificação descreve quão rapidamente o calor passa pelas paredes, janelas e rachaduras, em resposta à diferença de temperatura. A permeabilidade é algumas vezes chamada de *coeficiente de perda de calor* da edificação. No Apêndice E, eu calculo que a permeabilidade da minha casa em 2006 foi 7,7 kWh/d/°C. O produto

diferença média de temperatura x permeabilidade da edificação

é a taxa na qual o calor flui da casa pela condução e ventilação. Por exemplo, se a diferença média de temperatura é 9°C então a perda de calor é

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \sim 70 \text{ kWh/d}$$

Finalmente, para calcular a potência necessária, nós dividimos esta perda de calor pela eficiência do sistema de aquecimento. Na minha casa, a caldeira de condensação de gás possui uma eficiência de 90%, então nós obtemos:

$$\text{Potência usada} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/d}$$

Isto é maior do que as necessidades de aquecimento de ambientes que nós estimamos no Capítulo 7. É maior por duas razões: primeiro, esta fórmula assume que todo o calor é fornecido pela caldeira, quando de fato alguma parcela do calor é fornecida dos ocupantes, equipamentos, e do sol; segundo, no Capítulo 7 nós assumimos que uma pessoa mantém apenas dois ambientes à 20°C o tempo todo; manter uma casa inteira à esta temperatura o tempo todo necessitaria mais.

Ok, como nós podemos reduzir a potência utilizada para aquecimento? Bem, obviamente, existem três linhas de ataque.

1. Reduzir a diferença média de temperatura. Isto pode ser atingido com a diminuição da temperatura do termostato (ou, se você possui amigos em lugares altos, mudando de clima).
2. Reduzindo a permeabilidade da edificação. Isto pode ser feito com a melhoria do isolamento da edificação - pense em vidros triplos, projetos de impermeabilização, e mantas isolantes no sótão - ou, mais radicalmente, pela demolição da edificação e substituição dela por uma edificação melhor isolada; ou talvez vivendo em uma edificação com menos espaço por pessoa. (A permeabilidade tende ser maior, quanto maior a área edificação, porque a área de parede externa, janela, e telhado tende a ser maior também.)
3. Aumentar a eficiência do sistema de aquecimento. Você pode achar que 90% será um valor difícil de bater, mas na verdade nós podemos fazer muito melhor que

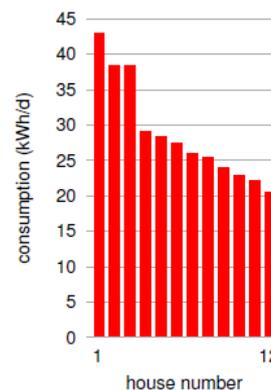


Figura 21.2. Consumo real de calor em 12 residências idênticas com sistemas de aquecimento idênticos. Todas as casas possuíam uma área de andar de 86 m² e foram projetadas para ter uma permeabilidade de 2,7 kWh/d/°C. Fonte: Carbon Trust (2007).

Tecnologia quente: o termostato

O termostato (seguido pelos casacos de lã) são difíceis de bater, quando se fala em tecnologia de valor para o dinheiro. Você o diminui, e a sua edificação está consumindo menos energia. Mágica! Na Grã-Bretanha, para qualquer grau que você diminui no seu termostato, a perda de calor diminui em 10%. Reduzir o termostato de 20°C para 15 °C diminuiria aproximadamente pela metade a perda de calor. Graças aos

ganhos incidentais de calor pela edificação, as economias na potência de aquecimento serão ainda maiores do que estas reduções na perda de calor.

Infelizmente, contudo, esta tecnologia sensacional de economia de energia possui efeitos colaterais. Alguns humanos acham que diminuir o termostato é uma mudança no estilo de vida, e não estão felizes com isto. Eu farei algumas sugestões mais tarde sobre como contornar esta questão do estilo de vida. Enquanto isso, como prova de que "o componente inteligente mais importante em uma edificação com aquecimento inteligente é o ocupante", a figura 21.2 mostra dados de um estudo do Carbon Trust, observando o consumo de calor em doze residências idênticas. Este estudo nos permite observar a família no número 1, cujo consumo de calor é duas vezes maior do que o do Sr. e Sra. Wolly no número 12. Contudo, nós devemos prestar atenção aos números: a família no número 1 está consumindo 43 kWh por dia. Mas se isto é chocante, espere um pouco - um momento atrás, eu não estimei que a *minha* casa poderia estar consumindo mais do que isto? De fato, meu consumo médio de gás de 1993 até 2003 foi um pouco mais do que 43 kWh por dia (figura 7.10, página 65) e eu pensei que eu fosse uma pessoa comedida! O problema é a *casa*. Todas as casas modernas no estudo do Carbon Trust possuem uma permeabilidade de 2,7 kWh/d/°C, mas a minha casa possui uma permeabilidade de 7,7 kWh/d/°C! Ah, pessoas que vivem nessas casas permeáveis...

A guerra contra a permeabilidade

O que pode ser feito com estas casas velhas com alta permeabilidade, além de ligar para os tratores de demolição? A Figura 21.3 mostra estimativas de aquecimento de espaço necessárias em velhas casas comuns, geminadas e *terraced*²⁶ no que progressivamente mais esforço é colocado em remendá-las.

²⁶ N.T. Um tipo de casa, comum na Inglaterra, que é parte de um grupo de casas idênticas que compartilham suas paredes externas.



Figura 21.3. Estimativas de aquecimento de ambientes necessário para uma gama de casas do Reino Unido. De Eden e Bending (1985).

Adicionar isolamento no sótão e nas paredes reduz a perda de calor em uma típica casa antiga em cerca de 25%. Graças aos ganhos incidentais de calor, esta redução de 25% na perda de calor se traduz em aproximadamente 40% de redução no consumo de aquecimento.

Vamos testar estas ideias.

Um estudo de caso

Eu apresentei a minha casa para vocês na página 66. Vamos revisar a história. Em 2004 eu tive uma caldeira de condensação instalada, substituindo a velha caldeira a gás.

(Caldeiras de condensação utilizam trocadores de calor para transferir calor dos gases de exaustão para o ar que está entrando.) Ao mesmo tempo eu removi o tanque de água quente da casa (então a água quente agora é feita apenas sob demanda), e eu instalei termostatos nos radiadores de todos os quartos. Junto com o novo boiler de condensação, veio um novo controlador de aquecimento que me permite configurar diferentes temperaturas para diferentes horários do dia. Com estas mudanças, o meu consumo diminuiu de uma média de 50 kWh/d para cerca de 32 kWh/d.

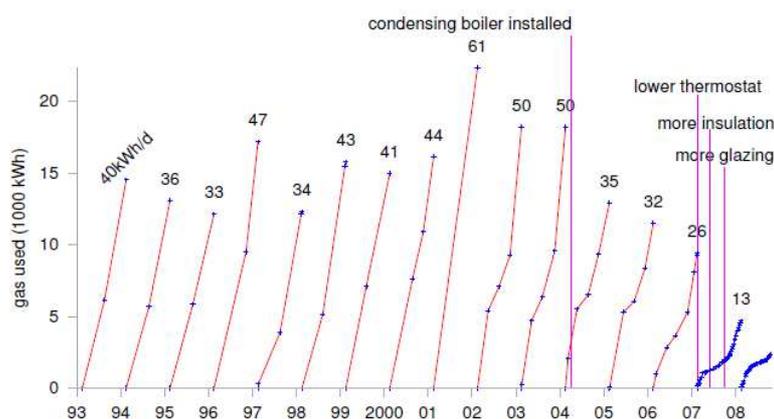


Figura 21.4. Meu consumo doméstico de gás, a cada ano, de 1993 até 2007. Cada linha mostra o consumo cumulativo durante um ano em kWh.

O número no final de cada ano é a taxa média de consumo para aquele ano, em kWh por dia.

Leituras no medidor são indicadas pelos pontos azuis. Evidentemente, quanto maior a frequência com que eu leio meu medidor, menos gás eu utilizo!

Esta redução de 50 para 32 kWh/d é bastante satisfatória, mas não é o suficiente, se o objetivo é reduzir a pegada de combustíveis fósseis para baixo de uma tonelada de CO₂ por ano. 32 kWh/d de gás corresponde a mais de 2 toneladas de CO₂ por ano.

Em 2007, eu comecei a prestar mais atenção nos meus medidores de energia. Eu instalei isolamento nas paredes (figura 21.5) e melhorei o isolamento do meu sótão. Eu substituí a porta traseira de vidro simples por uma porta com vidro duplo, e adicionei uma porta extra com isolamento duplo para a varanda da frente (figura 21.6). O mais importante de tudo, eu prestei mais atenção nos ajustes do meu termostato. Esta atenção levou a mais uma redução para a metade do consumo. O consumo do ano passado foi de 13 kWh/d!

Como este estudo é uma miscelânea de modificações na edificação e de comportamento, é difícil ter certeza de quais alterações foram as mais importantes. De acordo com os meus cálculos (no Apêndice E), as melhorias no isolamento reduziram a permeabilidade em 25%, de 7,7 kWh/d/°C para 5,8 kWh/d/°C. Isto ainda é muito mais permeabilidade do que a de qualquer casa moderna. É frustrantemente difícil reduzir a permeabilidade de qualquer casa já construída!



Figura 21.5. Preenchimento das cavidades da parede com isolante.

Então, a minha dica principal é trabalhar com a administração do termostato. Qual seria um ajuste razoável do termostato para nos focarmos? Hoje em dia, muitas pessoas parecem pensar que 17°C é insuportavelmente frio. Contudo, a temperatura média do período de inverno nas casas da Europa em 1970 era de 13°C! A percepção humana de se eles se sentem com calor depende do que se está fazendo, e do que eles têm estado fazendo na última hora, mais ou menos. Minha sugestão é, *não pense em termos de ajustes de termostato*. Melhor do que ajustar o termostato para um valor fixo, tente apenas deixá-lo em um valor realmente pequeno a maior parte do tempo (digamos 13 ou 15°C), e o ligue num valor mais elevado sempre que você se sentir com frio. É como as luzes em uma biblioteca. Se você se permite perguntar a questão "qual é o nível correto de iluminação nas prateleiras?" então você responderá sem dúvidas "claro o suficiente para ler os títulos dos livros", e você terá luzes brilhando o tempo todo. Mas esta questão presume que nós precisamos corrigir o nível de iluminação; e nós não precisamos. Nós podemos instalar interruptores, para que o leitor possa acender as luzes, e que se desliguem após um período apropriado. De maneira similar, os termostatos não precisam ficar ligados à 20°C o tempo todo.

Antes de encerrar o tópico sobre os ajustes de termostatos, eu deveria mencionar o ar condicionado. Não te deixa louco entrar em um edifício no verão onde o termostato do ar condicionado está ajustado para 18°C? Estes loucos administradores de edifícios estão sujeitando todo mundo a temperaturas que no período de inverno eles considerariam muito frias! No Japão, as diretrizes de "Cool-Biz" do governo indicaram que o ar condicionado fosse ajustado para 28°C (82 F).

Melhores edificações

Se você tiver a chance de construir uma nova edificação, então existem diversas maneiras de garantir que o consumo com aquecimento seja muito menor do que o de uma edificação antiga. A figura 21.2 evidencia que casas modernas são construídas para padrões de isolamento muito melhores do que aqueles de 1940. Mas os padrões de edificações na Grã-Bretanha ainda poderiam ser melhores, como o Apêndice E discute. As três ideias chaves para estes melhores resultados são: (1) ter isolamento realmente grosso nos pisos, paredes e telhados; (2) garantir que a edificação esteja completamente fechada e que use ventilação forçada para introduzir ar fresco



Figura 21.6. Uma nova porta de entrada.

e remover o ar velho e úmido; (3) projetar a edificação para explorar a luz do sol tanto quanto possível.

O custo energético do calor

Até agora, este capítulo se focou no controle de temperatura e na permeabilidade. Agora nós nos focaremos para o terceiro fator da equação:

$$\text{Potência usada} = \frac{\text{diferença média de temperatura} \times \text{permeabilidade da edificação}}{\text{eficiência do sistema de aquecimento}}$$

Quão eficientemente o calor pode ser produzido? Nós podemos obter calor de forma barata? Atualmente, o aquecimento de edificações na Grã-Bretanha é fornecido principalmente através da queima de combustíveis fósseis, gás natural, em boilers com eficiências de 78%-90%. Nós podemos parar de utilizar combustíveis fósseis e ao mesmo tempo aquecer as nossas edificações de maneira mais eficiente?

Uma tecnologia que é tida como uma resposta para o problema de aquecimento da Grã-Bretanha é chamada de "combinação de calor e potência" (CHP²⁷), ou o seu primo, "micro CHP". Eu explicarei a combinação de calor e potência agora, mas eu cheguei à conclusão de que é uma má ideia, porque existe uma tecnologia melhor para aquecimento, chamada bomba de calor, que eu descreverei em algumas páginas.



Figura 21.7. Eggborough. Não é um exemplo de estação de potência participando do aquecimento de forma inteligente.

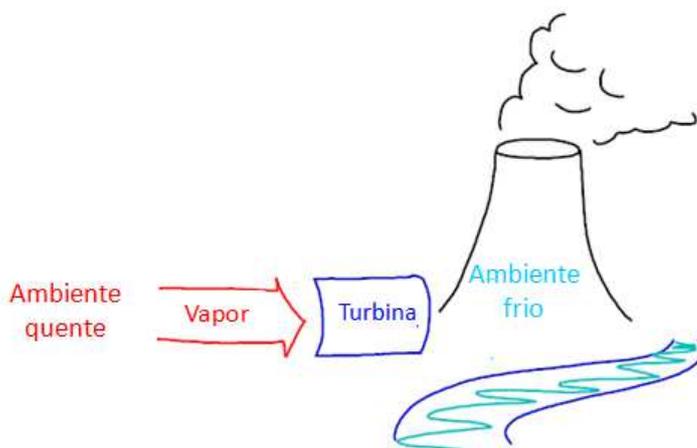


Figura 21.8. Como uma estação de potência funciona. Tem que haver um local frio para condensar o vapor para fazer a turbina girar. O local frio é geralmente uma torre de resfriamento ou um rio.

²⁷ Do Inglês, *Combined Heat and Power*.

Calor e potência combinados

A visão padrão de uma grande estação de potência centralizada convencional é que elas são terrivelmente ineficientes, arremessando calor à toa até as chaminés e torres de resfriamento. Uma visão mais sofisticada reconhece que para transformar energia térmica em eletricidade, nós inevitavelmente precisamos mandar calor para um local frio (figura 21.8). Assim é que os motores funcionam. *Tem* que haver um local frio. Mas com certeza, é discutido, nós poderíamos utilizar as edificações como lugar de despejo para este calor "perdido" ao invés de usar torres de resfriamento ou água do mar? Esta ideia é chamada de "combinação de calor e potência" (CHP) ou cogeração, e tem sido amplamente utilizada na Europa continental por décadas - em muitas cidades, uma grande estação de potência é integrada com um sistema de aquecimento distrital. Proponentes da moderna encarnação da combinação de calor e potência, "micro CHP", sugerem que pequenas estações de potência devem ser criadas dentro de edificações únicas, ou de pequenas coleções de edificações, fornecendo calor e eletricidade para estas edificações, e exportando alguma eletricidade para a rede.



Figura 21.9. Combinação de calor e potência. Aquecimento do distrito absorve o calor que teria sido descartado em uma torre de resfriamento.

Certamente existe alguma no ponto de vista de que a Grã-Bretanha está bastante para trás quando se fala no aquecimento distrital combinando calor e potência, mas a discussão é dificultada pela falta de números, e por dois erros em particular. Primeiro, quando comparando diferentes maneiras de utilizar combustíveis fósseis, a medida errada de "eficiência" é usada, ou seja, uma que compara eletricidade como tendo o mesmo valor que calor. A verdade é, a eletricidade é mais valiosa que o calor. Segundo, é amplamente sabido que o calor "perdido" em uma estação de potência tradicional pode ser capturado para propósitos úteis *sem prejudicar o poder de produção de eletricidade da estação*. Isto infelizmente não é verdade, como os números mostrarão. Fornecer calor útil a um consumidor sempre reduz a eletricidade produzida em algum nível. Os verdadeiros ganhos da rede da combinação de calor e potência são geralmente muito menores do que o produto levaria você a acreditar.

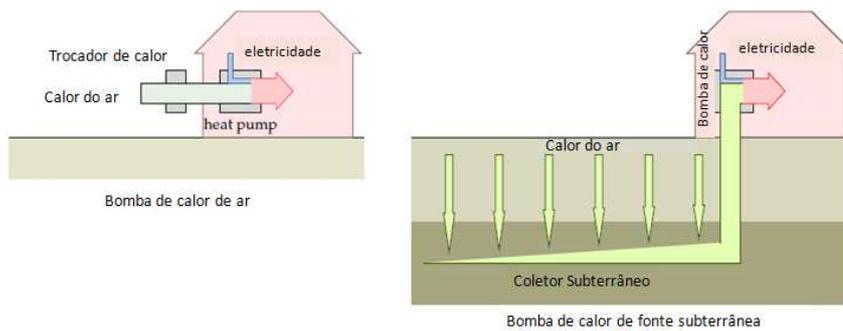


Figura 21.10. Bombas de calor.

Um impedimento final para uma discussão racional sobre a combinação de calor e potência é um mito que surgiu nos últimos tempos, de que descentralizar a tecnologia de alguma forma a deixa mais verde. Então enquanto grandes estações de potência centralizadas de combustíveis fósseis são "ruins", flocos de micro-estações de potência locais são imbuídas com louvor. Mas se a descentralização é na verdade uma boa ideia então "pequeno é bonito" deveria ser evidente nos números. A descentralização deve ser apta a se manter sobre seus próprios pés. E o que os números mostram, na verdade, é que a geração de energia *centralizada* possui muitos benefícios no âmbito econômico e em termos energéticos. Apenas em grandes edificações é que há benefício na geração local, e geralmente este benefício é apenas 10% ou 20%.

O governo possui uma meta a capacidade elétrica de combinação de calor e potência para 10 GW até 2010, mas eu acredito que aumentar uma combinação de calor e potência movida a gás é um erro. Tal combinação não é verde: ela utiliza combustível fóssil, e ela nos prende a continuar utilizando combustível fóssil. Uma vez que bombas de calor são uma tecnologia melhor, eu acredito que nós deveríamos saltitar por cima da cogeração e ir direto para a bomba de calor.

Bombas de calor

Assim como o aquecimento distrital e cogeração, bombas de calor já estão sendo amplamente utilizadas na Europa continental, mas estranhamente são raras na Grã-Bretanha. Bombas de calor são refrigeradores ao contrário. Sinta a parte de trás do seu refrigerador: ela está *quente*. Um refrigerador move calor de um lugar (a sua parte de dentro) para outro (seu painel traseiro). Então uma forma de aquecer uma edificação seria inverter um refrigerador - colocar a parte de *dentro* de um refrigerador no jardim, e refrigerar o jardim; e deixar o

painel do refrigerador na nossa cozinha, aquecendo a nossa casa. O que não é óbvio sobre esta ideia maluca é que esta é uma maneira realmente eficiente de aquecer a sua casa. Para cada quilowatt de potência retirada da rede elétrica, o refrigerador ao contrário pode bombear três quilowatts de calor do jardim, de modo que um total de quatro quilowatts entre na sua casa. Então as bombas de calor são aproximadamente quatro vezes mais eficientes do que o sistema convencional de aquecimento por resistência elétrica. Enquanto a eficiência da resistência elétrica é de 100%, a da bomba de calor é 400%. A eficiência de uma bomba de calor é geralmente chamada de *coeficiente de desempenho*, ou COP²⁸. Se a eficiência é de 400%, o coeficiente de desempenho é 4.

Bombas de calor podem ser configuradas de diversas formas (figura 21.10). Uma bomba de calor pode refrigerar o ar no seu jardim utilizando um trocador de calor (geralmente uma grande caixa branca de 1 metro de altura, figura 21.11), que no caso será chamado de bomba de calor de fonte de ar. Alternativamente, a bomba de calor pode refrigerar o solo utilizando grandes circuitos de canos subterrâneos (com muitas dezenas de comprimento), que no caso é chamado de bomba de calor de fonte subterrânea. O calor também pode ser bombeado de rios e lagos.

Algumas bombas de calor podem bombear calor em ambas as direções. Quando uma bomba de calor a ar é operada no ciclo reverso, ela consome eletricidade para aquecer o ar do lado *de fora* e refrigerar o ar do *lado de dentro* da sua edificação. Isto é chamado de ar condicionado. Muitos equipamentos de ar condicionado são precisamente bombas de calor operando desta forma. Bombas de calor de fonte subterrânea também podem trabalhar como ar condicionados. Então uma simples peça de equipamento pode ser utilizada para fornecer aquecimento no inverno e refrigeração no verão.

As pessoas algumas vezes podem dizer que bombas de calor de fonte subterrânea utilizam "energia geotérmica", mas este não é o nome certo. Como nós vimos no Capítulo 16, a energia geotérmica oferece apenas uma pequena quantidade de potência por unidade de área (cerca de 50 mW/m²), na maior parte do mundo; bombas de calor não têm nada a ver com esta energia, e elas podem ser usadas tanto para aquecimento como para refrigeração. Bombas de calor simplesmente utilizam o solo como um local da onde sugar



Figura 21.11. As partes de entrada e saída de uma bomba de calor de fonte de ar que possui um coeficiente de desempenho de 4. A parte de entrada é acompanhada por uma caneta esferográfica, como escala. Uma destas unidades Fujitsu pode fornecer 3,6 kW de aquecimento enquanto consome apenas 0,845 kW de eletricidade. Ela também pode funcionar ao contrário, fornecendo 2,6 kW de refrigeração quando consumindo 0,655 kW de eletricidade.

²⁸ N.T. do inglês, *coefficient of performance*.

calor, ou para onde liberar calor. Quando elas constantemente sugam calor, este calor está na verdade sendo repostado pelo sol.

Existem duas coisas a fazer neste capítulo. Nós precisamos comparar as bombas de calor com a cogeração. Então nós precisamos discutir quais são os limites das bombas de calor subterrâneas.

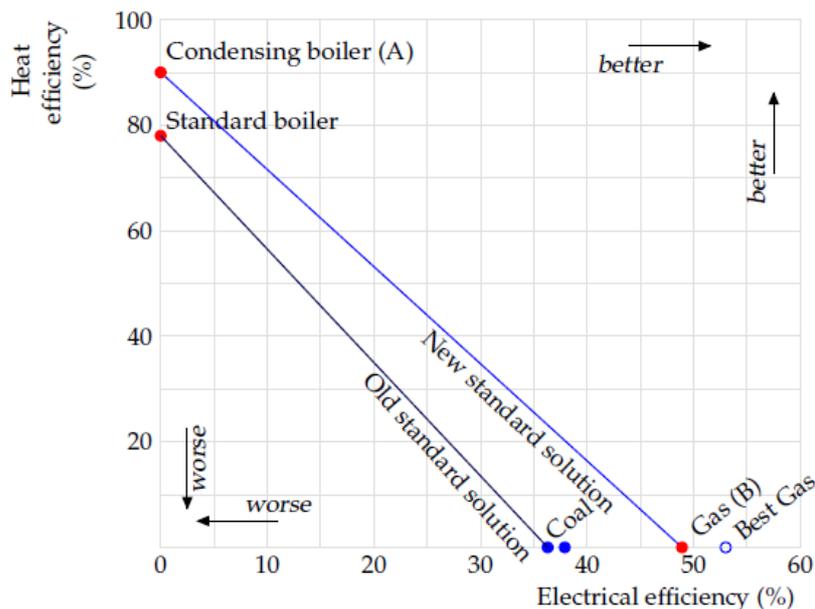
Bombas de calor, comparadas com cogeração

Eu costumava pensar que a cogeração não tinha mistério. "Obviamente, nós deveríamos usar o calor descartado das estações de potência para aquecer edificações ao invés de apenas jogá-lo fora em uma torre de resfriamento!" Contudo, olhando atentamente para os números que descrevem o desempenho de verdadeiros sistemas CHP, eu concluí que existem melhores formas de fornecer eletricidade e de aquecer as edificações.

Eu construírei um diagrama em três passos. O diagrama mostra quanta energia elétrica ou energia térmica pode ser fornecida da energia química. O eixo horizontal mostra a eficiência energética e o eixo vertical a eficiência térmica.

A solução padrão sem CHP

No primeiro passo, nós mostramos estações de potência e sistemas de aquecimento mais simples, que forneçam eletricidade pura e puro calor.

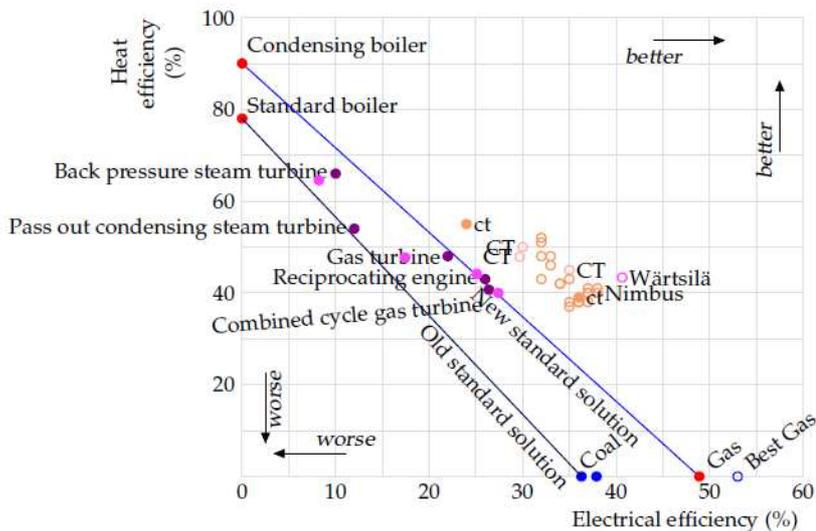


Os boilers de condensação (no canto superior esquerdo, A) são 90% eficientes porque 10% do calor sai pela chaminé. As estações de potência a gás da Grã-Bretanha (canto inferior direito, B) são atualmente 49% eficientes na conversão de energia química do gás em eletricidade. Se você quer qualquer mistura de eletricidade e calor do gás natural, você pode obter isto ao queimar quantidades apropriadas de gás na estação de potência e no boiler. Assim a nova solução padrão pode fornecer qualquer eficiência elétrica e eficiência térmica na linha A-B ao fazer eletricidade e calor utilizando dois equipamentos separados.

Para fornecer uma perspectiva histórica, o diagrama também mostra o antigo padrão de solução de aquecimento (um boiler sem condensação normal, com uma eficiência de 79%) e o modo padrão de produzir eletricidade algumas décadas atrás (uma estação de potência de carvão com uma eficiência elétrica de 37%, mais ou menos).

Cogeração

No próximo passo, nós adicionaremos a combinação de calor e sistemas de potência ao diagrama. Estes simultaneamente fornecem, da energia química, eletricidade e calor.



Cada um dos pontos pintados mostram a média real de desempenho de sistemas CHP no Reino Unido, agrupados por tipo. Os pontos ociosos marcados como "CT" mostram os desempenhos de sistemas CHP ideias citados pelo Carbon Trust; Os pontos ociosos marcados como "Nimbus" são das especificações dos produtos de um fabricante. Os pontos

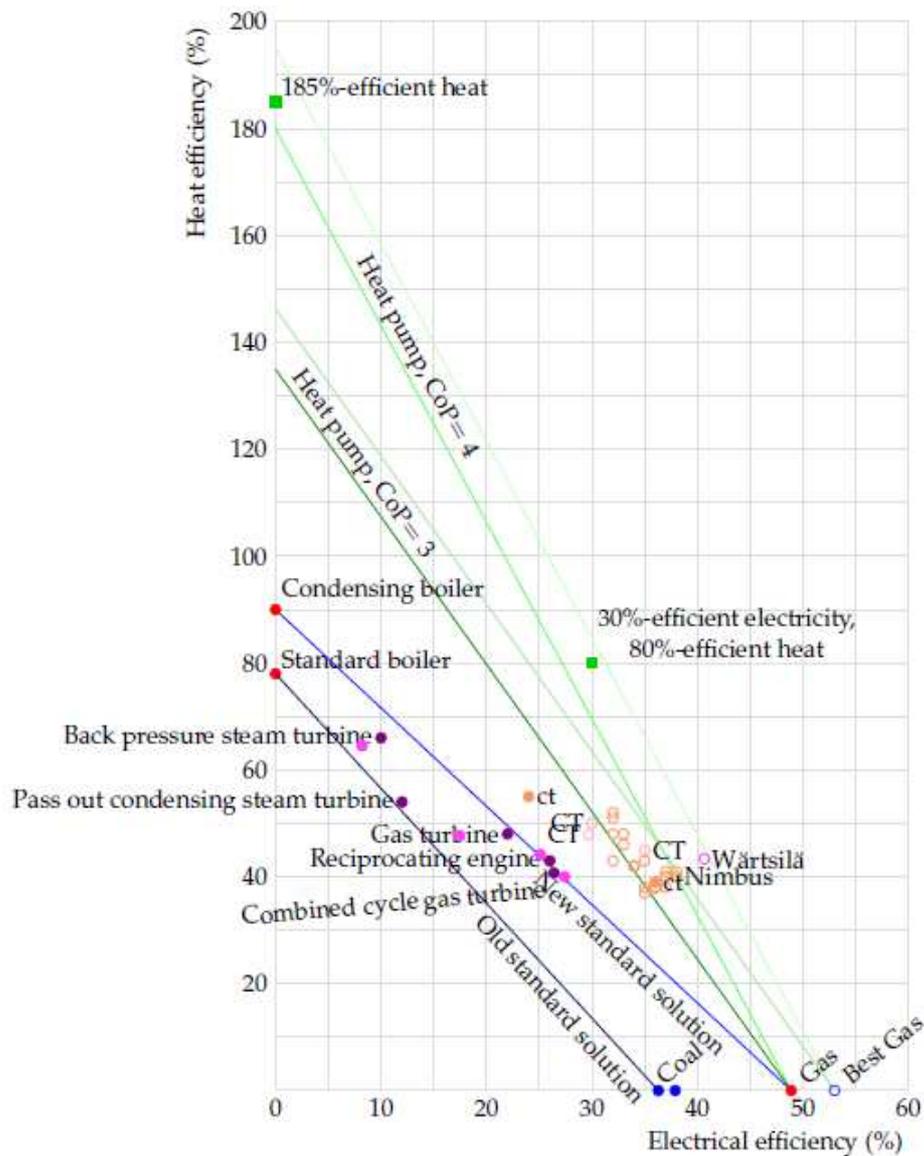
marcados "ct" são os desempenhos citados pelo Carbon Trust para dois sistemas reais (no Hospital Freeman e no Elizabeth House).

O principal ponto a se notar neste diagrama é que as eficiências elétricas dos sistemas CHP são significativamente menores do que as eficiências de 49% fornecidas por estações de potência a gás com o objetivo da produção apenas de eletricidade. Então o calor não é um "subproduto gratuito". Aumentar a produção de calor prejudica a produção de eletricidade.

É uma prática comum embolar os dois números (a eficiência da produção de eletricidade e da produção de calor) em uma "eficiência total" única - por exemplo, as turbinas a vapor de contrapressão fornecendo 10% de eletricidade e 66% de calor seriam chamadas de "76% eficientes", mas eu acho que este é um resumo enganoso do desempenho. No fim das contas, por esta medida, o boiler com condensação 90% eficiente é "mais eficiente" do que todo o sistema CHP! O fato é, energia elétrica é mais valiosa do que calor.

Muitos dos pontos da CHP nesta imagem são superiores à "antiga maneira padrão de fazer as coisas" (conseguir eletricidade do carvão e calor dos boilers padrões). E os sistemas CHP ideais são levemente superiores ao "novo padrão de fazer as coisas" (conseguir eletricidade do gás e aquecimento dos boilers de condensação). Mas nós devemos manter em mente que esta leve superioridade vem com algumas desvantagens - um sistema CHP fornece calor apenas para os locais onde estiver conectado, enquanto os boilers de condensação podem ser instalados em qualquer lugar com um gás principal; e comparado com o modo padrão de fazer as coisas, sistemas CHP não são tão flexíveis na mistura de eletricidade e calor que eles fornecem; Um sistema CHP funcionará melhor apenas quando fornecer uma mistura particular; esta inflexibilidade leva a ineficiências em momentos quando, por exemplo, excesso de calor é produzido; em uma residência típica, muita da demanda de eletricidade vem em picos relativamente breves, tendo pouca relação com a demanda de calor. Um problema final com alguns micro-sistemas CHP é que quando eles têm excesso de eletricidade para liberar, eles podem fazer um trabalho fraco em liberar potência para a rede elétrica.

Finalmente, nós adicionamos as bombas de calor, que utilizam eletricidade da rede para bombear calor do ambiente para as edificações.



As íngremes linhas verdes mostram as combinações de eletricidade e calor que você pode obter assumindo que bombas de calor possuem um coeficiente de desempenho de 3 ou 4, assumindo que a eletricidade extra para as bombas de calor é gerada por uma estação de potência a gás normal ou por uma estação de potência a gás top de linha, e permitindo 8% de perda na rede elétrica nacional entre a estação de potência e a edificação que a bomba de calor está aquecendo. A eficiência da estação de potência a gás top de linha é 53%, assumindo que ela esteja trabalhando no seu melhor desempenho. (Eu imagino que a Carbon Trust e a Nimbus fizeram suposições similares quando forneceram os números usados neste diagrama para sistemas CHP.) No futuro, as bombas de calor serão ainda melhores do que eu assumi aqui. No Japão, graças à forte legislação favorecendo melhoras de

eficiência, bombas de calor estão agora disponíveis com um coeficiente de desempenho de 4,9.

Note que as bombas de calor oferecem um sistema que pode ser "melhor do que 100% eficiente". Por exemplo, a "melhor" estação de potência a gás, alimentando a bomba de calor com eletricidade pode fornecer uma combinação de eletricidade 30% eficiente e calor 80% eficiente, com uma "eficiência total" de 110%. Nenhum sistema normal de CHP poderia algum dia bater esse desempenho.

Deixe-me colocar isto para fora. Bombas de calor são superiores em eficiência do que boilers de condensação, mesmo que as bombas de calor sejam alimentadas pela eletricidade de uma estação de potência queimando gás natural. Se você quer aquecer várias edificações utilizando gás natural, você pode instalar boilers de condensação, que são "90% eficientes", ou você pode mandar o mesmo gás para uma estação de potência produzindo eletricidade e instalar bombas de calor movidas a eletricidade em todas as edificações; a segunda solução de eficiência estaria entre 140% e 185%. Não é necessário cavar grandes buracos no jardim e instalar aquecimento subterrâneo para ter os benefícios das bombas de calor; as melhores bombas de calor de fonte de ar (que necessitam apenas uma pequena caixa externa, como em um ar condicionado) podem fornecer água quente para radiadores normais com um coeficiente de desempenho acima de 3. A bomba de calor de fonte de ar da figura 21.11 (P189) fornece diretamente ar quente para um escritório.

Eu então concluo que a cogeração, mesmo que pareça uma boa ideia, provavelmente não é a melhor maneira de aquecer edificações e produzir eletricidade usando gás natural, assumindo que as bombas de calor de fontes de ar e subterrâneas possam ser instaladas nas edificações. A solução das bombas de calor possui mais vantagens que deveriam ser enfatizadas: bombas de calor podem ser alocadas em quaisquer edificações onde haja fornecimento de eletricidade; elas podem ser movidas por qualquer fonte de eletricidade, então elas podem continuar trabalhando quando o gás terminar ou o preço do gás subir muito; e as bombas de calor são flexíveis: elas podem ser ligadas e desligadas dependendo da demanda dos usuários da edificação.

Eu enfatizo que esta comparação crítica não significa que o CHP seja sempre uma má ideia. O que eu estou comparando aqui são os métodos para aquecimento edificações normais, o que requer calor de baixíssimo nível. CHP pode também ser usado para fornecer calor de alto-nível para usuários

industriais (à 200 °C, por exemplo). Em tais ajustes industriais, as bombas de calor dificilmente competirão tão bem porque o coeficiente de desempenho delas será menor.

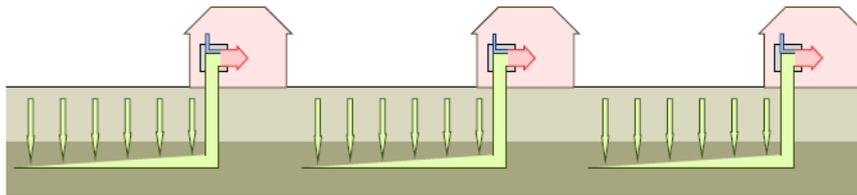


Figura 21.12. Quão próximas podem ficar as bombas de calor umas das outras?

Limites para o crescimento (das bombas de calor)

Por causa da temperatura do solo, alguns metros para baixo, permanece bastante próximo dos 11 °C, seja verão ou inverno, o solo é um lugar teoricamente melhor para que a bomba de calor puxe seu calor do que o ar, que no meio do inverno deve estar uns 10 ou 15°C mais frio do que o solo. Então os conselheiros de bomba de calor encorajam a escolha das de fonte subterrânea ao invés das de fonte de ar, sempre que possível. (Bombas de calor trabalham com menor eficiência quando existe uma grande diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo.)

Contudo, o solo não é uma fonte ilimitada de calor. O calor tem que vir de algum lugar, e o solo não é um condutor térmico muito bom. Se nós sugarmos calor muito rapidamente do solo, ele ficará tão frio quanto gelo, e a vantagem da bomba de calor de fonte subterrânea será diminuída.

Na Grã-Bretanha, o principal propósito das bombas de calor seria colocar calor para dentro das edificações no inverno. A última fonte deste calor é o sol, que repõe o calor no solo por radiação direta e pela condução pelo ar. A taxa com a qual o calor é sugado do solo deve satisfazer duas restrições: ela não deve fazer com que a temperatura do solo caia demais durante o inverno; e o calor sugado durante o inverno deve ser totalmente repostado durante o verão. Se houver qualquer risco de que a recepção *natural* de calor no verão não compense o calor removido no inverno, então essa reposição deve ser feita de forma *ativa* - por exemplo, ligando o sistema reverso no verão, mandando calor para o solo (e ainda fornecendo condicionamento de ar).

Vamos acrescentar alguns números nesta discussão. Qual o tamanho de solo que uma bomba de calor de fonte subterrânea necessita? Assuma que nós tenhamos uma vizinhança com uma densidade populacional bem elevada -

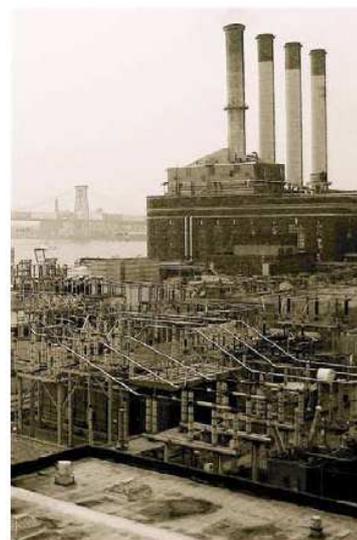
	Área por pessoa (m ²)
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tóquio	72
Moscou	97
Taipei	104
Haia	152
São Francisco	156
Singapura	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Tabela 21.13. Algumas áreas urbanas por pessoa.

digamos 6200 pessoas por km² (160 m² por pessoa), a densidade de um subúrbio britânico típico. *Todos* podem utilizar bombas de calor de fonte subterrânea, sem utilizar a reposição ativa no verão? Um cálculo no Apêndice E (p372) dá uma resposta tentativa de *não*: se nós quisermos que todo mundo na vizinhança seja capaz de tirar do solo um fluxo de calor de 48 kWh/d por pessoa (minha estimativa da nossa demanda de calor no inverno), nós acabaríamos congelando o solo no inverno. Evitar um resfriamento excessivo do solo faz com que a taxa de sucção de calor dele seja menor do que 12 kWh/d por pessoa. Então se nós mudarmos para bombas de calor de fonte subterrânea, nós deveríamos planejar incluir um despejo substancial de calor no verão no projeto, como refil para o solo pelo calor extraído no inverno. Este despejo de calor poderia utilizar calor do ar condicionado, ou calor de um painel de aquecimento solar de água instalado no telhado. (Aquecimento solar no verão é armazenado no solo para uso subsequente no inverno pela Drake Landing Solar Community no Canadá [www.dlsc.ca].) Alternativamente, nós devemos esperar utilizar algumas bombas de calor de fonte de ar também, e então nós seremos capazes de conseguir todo o calor que quisermos - desde que nós tenhamos eletricidade para bombeá-lo. No Reino Unido, as temperaturas do ar não ficam muito abaixo do congelamento, então preocupações sobre um baixo desempenho das bombas de calor de fonte de ar no inverno, o que pode ser aplicado na América do Norte e na Escandinávia, provavelmente não se aplica à Grã-Bretanha.

Minha conclusão: nós podemos reduzir a energia que nós consumimos com aquecimento? Sim. Nós podemos parar de usar combustíveis fósseis ao mesmo tempo? Sim. Não esquecendo a fruta que está pendurada mais abaixo na árvore - todo o papo sobre isolamento das edificações e ajuste de termostato - nós devemos substituir todos os nossos aquecedores de combustíveis fósseis com bombas de calor alimentadas por eletricidade; nós podemos reduzir a energia necessária para 25% dos níveis atuais. É claro que este plano de eletrificação necessitaria mais eletricidade. Mas mesmo que a eletricidade extra venha de estações de potência a gás, este ainda seria um modo muito melhor de conseguir aquecimento do que o que nós fazemos atualmente, simplesmente tocando fogo no gás. Bombas de calor são garantidas no futuro, pois permitem aquecer edificações eficientemente com eletricidade de qualquer fonte.

Negativistas se oporão dizendo que o coeficiente de desempenho da bomba de calor de fonte de ar é baixo -



apenas 2 ou 3. Mas a informação deles está ultrapassada. Se nós tivermos o cuidado de comprar bombas de calor top de linha, nós podemos fazer muito melhor. O governo japonês legislou uma corrida de eficiência energética de uma década que melhorou muito o desempenho dos equipamentos de ar condicionado; graças a essa corrida, existem agora bombas de calor de fonte de ar com coeficientes de desempenho de 4,9; estas bombas de calor podem produzir água quente além de ar quente.

Outra objeção para as bombas de calor é "oh, nós não podemos aprovar que as pessoas tenham aquecedores de fonte de ar de alta eficiência, porque eles podem usá-los para condicionamento de ar no verão". Qual é - eu odeio o uso gratuito de ar condicionado tanto quanto qualquer um, mas estas bombas de calor são quatro vezes mais eficientes do que qualquer outro método de aquecimento no inverno! Mostre-me uma melhor opção. Pellets de madeira? Claro, alguns catadores de madeira podem queimar madeira. Mas não existe madeira suficiente para todo mundo. Para moradores da floresta, existe madeira. Para todos os outros, existem bombas de calor!

Observações e Leitura Complementar

N pg

- 183 Isolamento de cavidade na parede reduz a perda de calor em uma típica casa antiga em um quarto. Eden e Bending (1985).
- 185 A temperatura média do período de inverno nas casas da Europa em 1970 era de 13°C! Fonte: Depto da Indústria e do Comércio (2002a, para 3.11).
- 187 A Grã-Bretanha está bastante para trás quando se fala no aquecimento distrital combinando calor e potência. O calor rejeitado das estações de potência da Grã-Bretanha poderia alcanças as necessidades de aquecimento do país inteiro (Wood, 1985). Na Dinamarca em 1985, o sistema de aquecimento distrital fornecia 42% do aquecimento de ambientes, com calor sendo transmitido por 20 km ou mais em água pressurizada. Na Alemanha Ocidental em 1985, 4 milhões de moradores recebiam 7 kW cada um de aquecimento distrital. Dois terços do calor fornecido vinha de estações de potência. Em Vasteras, na Suécia

e 1985, 98% do calor da cidade era fornecido por estações de potência.

- 189 Bombas de calor são aproximadamente quatro vezes mais eficientes do que o sistema convencional de aquecimento por resistência elétrica. Veja www.gshp.org.uk

Algumas bombas de calor disponíveis no Reino Unido já possuem um coeficiente de desempenho maior do que 4,0 [yok2nw]. De fato existe um subsídio do governo para bombas de calor de fonte de água que apliquem apenas bombas com um coeficiente de desempenho melhor do que 4,4 [2dtx8z].

Bombas de calor de fonte subterrânea comerciais estão disponíveis com um coeficiente de desempenho de 5,4 para refrigeração e 4,9 para aquecimento [2fd8ar].

- 194 Bombas de calor de fonte de ar com coeficiente de desempenho de 4,9... De acordo com o HPTCJ (2007), bombas de calor com um coeficiente de desempenho de 6,6 estão disponíveis no Japão desde 2006. O desempenho das bombas de calor no Japão melhoraram de 3 para 6 em uma década graças às regulamentações do governo. HPTCJ (2007) descreve uma bomba de calor de fonte de ar que aquece água chamada Eco Cute com um coeficiente de desempenho de 4,9. A Eco Cute entrou no mercado em 2001. www.ecosystem-japan.com.

Mais leitura sobre bombas de calor:

ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/,
www.kensaengineering.com,
www.heatking.co.uk,
www.iceenergy.co.uk

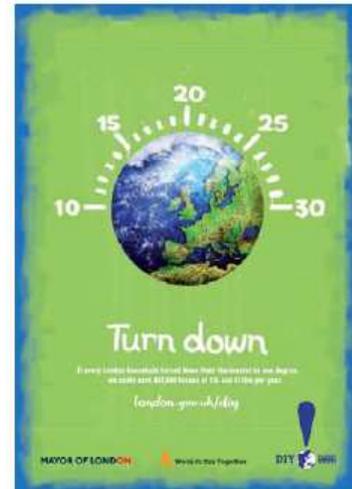


Figura 21.14. Propaganda do prefeito de Londres "Faça você mesmo os reparos do planeta" para a campanha de 2007. O texto diz "Diminua. Se todas as casas de Londres diminuíssem seus termostatos em um grau, nós poderíamos economizar 837 000 toneladas de CO₂ e £110m por ano". [london.gov.uk/diy] Expresso em economia por pessoa, isto são 0,12 t CO₂ por ano por pessoa. Isto é cerca de 1% do total de uma pessoa (11 t), então este é um bom conselho. Muito bem, Ken!

22 Uso Eficiente da Eletricidade

Nós podemos reduzir o uso de eletricidade? Sim, desligando os aparelhos da tomada quando eles não estiverem em uso é uma forma fácil de fazer a diferença. Lâmpadas eficientes energeticamente economizarão sua eletricidade também.

Nós já analisamos aparelhos elétricos no Capítulo 11. Alguns aparelhos não são importantes, mas alguns são incríveis beberões. A impressora à laser no meu escritório, parada lá sem fazer nada, está consumindo 17 W - aproximadamente 0,5 kWh por dia! Um amigo comprou uma lâmpada da IKEA. Seu horrível adaptador (figura 22.1) bebe 10 W (0,25 kW por dia) se a lâmpada estiver ligada ou desligada. Se você somar alguns aparelhos de som, DVDs, receptores de TV a cabo e aparelhos wireless, você pode descobrir que metade do consumo de eletricidade da sua casa pode ser economizado.

De acordo com a Agência Internacional de Energia, o consumo de potência em espera soma aproximadamente 8% da demanda de eletricidade residencial. No Reino Unido e na França, a potência em espera é cerca de 0,75 kWh/d por residência. O problema não é a espera em si - é a baixa qualidade com que a espera é implementada. É perfeitamente possível fazer sistemas de espera que retirem menos do que 0,01 W; mas os fabricantes, economizando alguns centavos nos custos de produção, estão sobrecarregando o consumidor com custos anuais de libras.

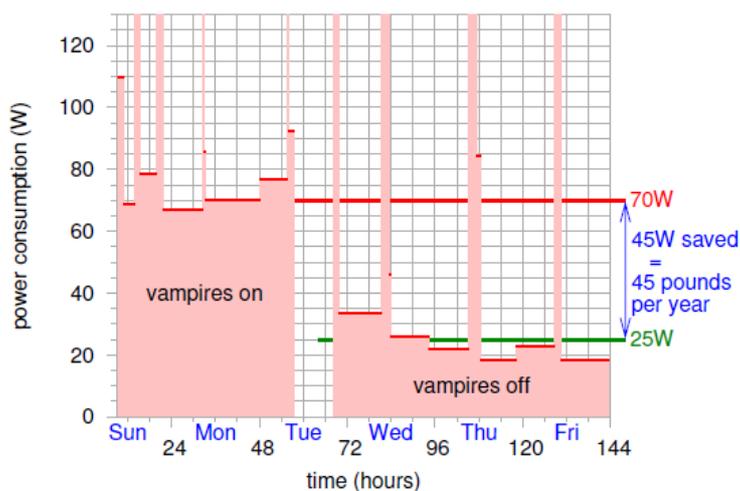


Figura 22.1. Um terrível adaptador AC de lâmpada do IKEA - o adaptador consome aproximadamente 10 W mesmo quando a lâmpada está desligada!

Figura 22.2. Eficiência iminente. Eu medi as economias de eletricidade em desligar os vampiros por uma semana quando eu estive fora trabalhando a maior parte de cada dia, então, tanto nos dias quanto nas noites, não havia atividades úteis, exceto do refrigerador. Os pequenos picos de consumo são causados por microondas, torradeira, máquina de lavar ou aspirador de pó. Na terça-feira eu desliguei a maioria dos meus vampiros: dois aparelhos de som, um DVD player, receptor de TV a cabo, um roteador wireless, e uma secretária eletrônica. A linha vermelha mostra a tendência do consumo do "ninguém em casa" antes de desligar os aparelhos, e a verde mostra o consumo do "ninguém em casa" após esta mudança. O consumo caiu em 45W, ou 1,1 kWh por dia.

Um experimento exterminador de vampiros

A figura 22.2 mostra um experimento que eu fiz em casa. Primeiro, por dois dias, eu medi o consumo de potência que eu estava mantendo quando eu estava fora de casa ou dormindo. Então, desligando todos os aparelhos que eu geralmente deixo ligados, eu medi novamente por mais três dias. Eu descobri que a potência economizada era de 45 W - o que vale £45 por ano se a eletricidade custa 11 p por unidade.

Desde que eu comecei a prestar atenção na leitura dos meus medidores, o meu consumo de eletricidade total caiu pela metade (figura 22.3). Eu cimentei esta mudança criando o hábito de ler o meu medido toda semana, de modo a checar se os vampiros sugadores de eletricidade foram banidos. Se este truque mágico pudesse ser repetido em todas as residências e locais de trabalho, nós poderíamos obviamente fazer economias substanciais. Então alguns de nós em Cambridge estamos montando um *website* com o intuito de tornar a leitura dos medidores divertida e informativa. O *website*, ReadYourMeter.org, tem o objetivo de ajudar as pessoas a fazerem experimentos parecidos com o meu, e terem um agradável sentimento de estarem consumindo menos.

Eu espero que este tipo de atividade de leitura inteligente dos medidores faça alguma diferença. Na futura Grã-Bretanha simplificada de 2050, contudo, eu assumi que todas as economias de energia serão canceladas pelo crescimento populacional. Crescimento é uma das tendências da nossa sociedade: as pessoas serão mais saudáveis, e então estarão aptas a brincarem mais com os equipamentos elétricos. A demanda para jogos de computadores cada vez mais superlativos força o consumo de potência dos computadores a aumentar. Os computadores da década passada costumavam ser bastante ajeitados, mas agora eles são considerados inúteis e tiveram que ser substituídos por máquinas mais rápidas e quentes.

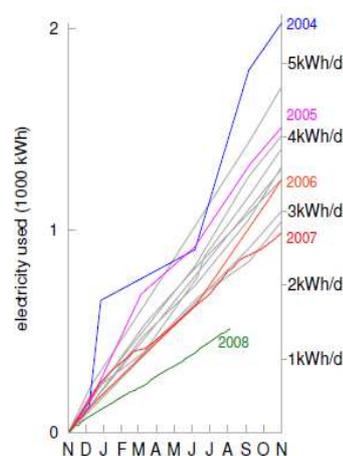


Figura 22.3. O consumo de eletricidade acumulado da minha casa, em kWh, a cada ano, de 1993 até 2008. As linhas cinzas mostram anos de 1993 até 2003 (eu não rotulei estes com os anos para evitar confusão). As linhas coloridas mostram os anos de 2004 para frente. A escala à direita mostra a taxa de consumo de eletricidade média, em kWh por dia. A combinação do banimento dos vampiros com a instalação de lâmpadas econômicas reduziu o meu consumo de eletricidade de 4 kWh/d para 2 kWh/d.

Observações e Leitura Complementar

N pg

199 O consumo de potência em espera soma aproximadamente 8% da demanda de eletricidade residencial. Fonte: Agência Internacional de Energia (2001). Para mais leitura sobre energia em espera, veja: www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp.

23 Combustíveis Fósseis Sustentáveis?

É uma realidade da qual não podemos escapar que os combustíveis fósseis continuarão a ser uma parte importante da mistura energética pelas décadas a seguir.

Porta-voz do governo do Reino Unido, Abril de 2008.

Nossa presente condição de progresso feliz é algo de duração limitada.

William Stanley Jevons, 1965.

Nos últimos três capítulos nós exploramos as principais tecnologias e mudanças de estilos de vida para reduzir o consumo de potência. Nós descobrimos que nós poderíamos reduzir pela metade o consumo de potência com transporte (e tirá-lo dos combustíveis fósseis) ao mudarmos para veículos elétricos. Nós descobrimos que poderíamos encolher ainda mais o consumo de potência com aquecimento (e tirá-lo dos combustíveis fósseis) ao isolar melhor todas as edificações e ao utilizar bombas de calor ao invés de combustíveis fósseis. Então sim, nós podemos reduzir o consumo. Mas ainda assim, conciliar este consumo mesmo que reduzido com a potência de renováveis da Grã-Bretanha parece muito desafiador (figura 18.7, p138). É hora de discutir opções não renováveis como opções de produção de potência.

Pegue as reservas conhecidas de combustíveis fósseis, que são esmagadoramente carvoeiras: 1600 Gt de carvão. Divida-as igualmente entre seis bilhões de pessoas, e as queime de "forma sustentável". O que quer dizer se nós dizemos para queimar um recurso finito "de maneira sustentável"? Aqui está uma definição arbitrária que eu usarei: a taxa de queima é "sustentável" se os recursos durassem **1000 anos**. Uma tonelada de carvão fornece 8000 kWh de energia química, então 1600 Gt de carvão divididos entre 6 bilhões de pessoas por 1000 anos acaba sendo uma potência de **6 kWh por dia por pessoa**. Uma estação de potência padrão de carvão transformaria essa potência química em eletricidade com uma eficiência de 37% - isto significa cerca de **2,2 kWh(e) por dia por pessoa**. Se nós nos preocuparmos com o clima, no entanto, então provavelmente nós não utilizaríamos uma estação de potência padrão. Ao invés disso, nós iríamos para a "carvão limpo", também conhecido como "carvão com captura e armazenamento de carbono" - como uma tecnologia ainda pouco implementada que suga a maior parte do dióxido de



Figura 23.1. Carvão sendo entregue na estação de potência de Kingsnorth (capacidade de 1940 MW) em 2005. Fotos de Ian Boyle www.simplonpc.co.uk.

Carvão: 6kWh/d

Figura 23.2. "Combustíveis fósseis sustentáveis".

carbono do fluxo de gases de chaminés e então os enfiam em um buraco na terra. Limpar as emissões de estações de potência desta forma possui um custo energético significativo - isto reduziria a eletricidade fornecida em 25%. Então um uso "sustentável" das reservas de carvão conhecidas forneceriam apenas cerca de **1,6 kWh por dia por pessoa**.



Figura 23.3. Uma lagarta se alimentando defolhas velhas. Foto de Peter Gunn.

Nós podemos comparar esta taxa "sustentável" de queima de carvão - 1,6 Gt por ano - com a taxa atual global de consumo de carvão: 6,3 Gt por ano, e continua aumentando.

E como fica o Reino Unido sozinho? Estima-se que a Grã-Bretanha tenha 7 Gt de carvão restantes. OK, se nós dividirmos 7 Gt entre 60 milhões de pessoas, nós teremos 100 toneladas por pessoa. Se nós queremos uma solução de 1000 anos, isto corresponde a **2,5 kWh por dia por pessoa**. Em uma estação de potência realizando captura e armazenamento de carbono, esta abordagem sustentável para o carvão do Reino Unido originaria **0,7 kWh(e) por dia por pessoa**.

A nossa conclusão é clara:

Carvão limpo é apenas um tapa-buracos.

Se nós realmente desenvolvermos tecnologia "carvão limpo" para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, nós devemos ter cuidado, enquanto nos damos tapinhas nas costas, para a contagem honesta. O processo de queima de carvão emite gases de efeito estufa não apenas na estação de potência mas também na mina de carvão. A mineração de carvão tende a liberar metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ambos diretamente das jazidas de carvão, no que elas são expostas, e subsequentemente dos folhelhos e lamitos descartados; para uma estação de potência normal a carvão, estas emissões da mineração do carvão aumentam as emissões de gases de efeito estufa em cerca de 2%, então para a estação de potência de carvão "limpo", estas emissões podem ter algum impacto nas contas. Existe um problema similar de contabilidade com o gás natural: se, digamos, 5% do gás natural vaza na jornada entre o buraco na terra para a estação de potência, então esta poluição acidental de metano é equivalente (em efeitos de gases estufa) a um aumento de 40% no dióxido de carbono liberado na estação de potência.

Novas tecnologias de carvão

A companhia directcarbon.com, localizada em Stanford, está desenvolvendo a célula a combustível de carbono direto (*Direct Carbon Fuel Cell*), que converte combustível e ar diretamente em eletricidade e CO₂ sem envolver turbinas de água ou vapor. Eles alegam que esta forma de gerar eletricidade a partir do carvão é duas vezes mais eficiente do que a estação de potência padrão.

Quando é o fim do negócio usual?

O economista Jevon fez um cálculo simples em 1865. As pessoas estavam discutindo quanto tempo o carvão da Grã-Bretanha duraria. Eles tenderam a responder esta questão dividindo a estimativa de carvão restante pela taxa de consumo de carvão, recebendo respostas do tipo "1000 anos". Mas, Jevon disse, o consumo *não é* constante. ele tem dobrado a cada 20 anos, e o "progresso" continuaria a fazer isto acontecer. Então as "reservas divididas pela taxa de consumo" fornece a resposta errada.

Ao invés disto, Jevon extrapolou o crescimento exponencial, calculando o tempo no qual a quantidade total consumida excederia as reservas estimadas. Isto resultou num tempo muito menor. Jevon não estava assumindo que o consumo fosse continuar a crescer no mesmo ritmo; ao invés disso, ele estava afirmando que o crescimento não é sustentável. Seus cálculos estimaram para os seus leitores da Grã-Bretanha os limites inevitáveis do seu crescimento, e o curto período restante antes desses limites se tornarem evidentes. Jevons fez a previsão corajosa que o final do "progresso" britânico viria em 100 anos de 1865. Jevon estava certo. A produção de carvão da Grã-Bretanha teve seu auge em 1910, e em 1965 a Grã-Bretanha já não era mais uma super potência mundial.

Vamos repetir os seus cálculos para o mundo como um todo. Em 2006, a taxa de consumo de carvão foi de 6,3 Gt por ano. Comparando isto com as reservas de 1600 Gt de carvão, as pessoas geralmente dizem "ainda existem **250 anos** de carvão restantes". Mas se nós assumirmos "os negócios como sempre" implicará em um aumento no consumo, e nós teremos uma resposta diferente. Se a taxa de crescimento do consumo de carvão continuar a aumentar 2% por ano (o que nos dá um ajuste razoável com os dados de 1930 até 2000),

então todo o carvão terá se acabado em 2096. Se a taxa de crescimento for 3,4% por ano (a taxa de crescimento da última década), o final dos negócios com carvão terminarão antes de 2072. Não **250 anos**, mas **60!**

Se Jevons estivesse aqui hoje em dia, eu tenho certeza que ele afirmaria que, a não ser que nós nos dirijamos para um percurso diferente do que estamos seguindo, haverá, em 2050 ou 2060, um fim para a nossa feliz condição de progresso.



Observações e Leitura Complementar

Nº da página

- 201 **1000 anos - a minha definição de "sustentável"**. Como um precedente para este tipo de escolha, Hansen et al. (2007) iguala "mais de 500 anos" com "para sempre".
- **1 tonelada equivalente de carvão = 29,3 GJ = 8000 kW** de energia química. Este valor não inclui os custos energéticos da mineração, transporte, e captura de carbono.
 - **Captura e armazenamento de carbono (CCS²⁹)**. Existem diversas tecnologias CCS. Sugar o CO₂ do fluxo de gases é uma; outras gasificam o carvão e separam o CO₂ antes da combustão. Veja Metz et al. (2005). O primeiro protótipo de planta de carvão com CCS foi inaugurada em 9 de setembro de 2008 pela companhia sueca Vattenfall [5kpk8].
 - **Carvão do Reino Unido**. Em dezembro de 2005, as reservas e recursos das *minas existentes* foram estimados como sendo 350 milhões de toneladas. Em novembro de 2005, potenciais de reservas a céu aberto foram estimadas como sendo 620 milhões de toneladas; e o potencial de gaseificação do carvão subterrâneo foi estimado como sendo pelo menos 7 bilhões de toneladas [yebuk8].

²⁹ Carbon Capture and Storage.

- 202 A mineração de carvão tende a liberar gases de efeito estufa. Para informações sobre a liberação de metano na mineração de carvão veja www.epa.gov/cmop/, Jackson e Kershaw (1996), Thakur et al. (1996). Emissões globais de metano da mineração de carvão são cerca de 400 MtCO₂e por ano. Isto corresponde a aproximadamente 2% das emissões de gases de efeito estufa pela queima do carvão.
- A média de metano contido no carvão britânico é 4,7 m³ por tonelada de carvão (Jackson e Kershaw, 1996); este metano, se liberado na atmosfera, possui um potencial de aquecimento global de equivalente a 5% daquele proveniente do CO₂ da queima do carvão.
- 202 Se 5% do gás natural vazar, isto é equivalente a um aumento de 40% no dióxido de carbono. Poluição acidental de metano possui aproximadamente oito vezes um efeito de aquecimento global do que a poluição de CO₂ que aconteceria pela queima de metano; oito vezes, não o padrão "23 vezes", porque "23 vezes" é a razão de aquecimento entre *massas* iguais de metano e CO₂. Cada tonelada de CH₄ se transforma em 2,75 toneladas de CO₂ se queimada; se ela vazar, é equivalente a 23 toneladas de CO₂. E 23/2,75 é 8,4.

Leitura complementar: Word Energy Council [yhxf8b].

Leitura complementar sobre gaseificação de carvão subterrâneo: [e2m9n].

24 Nuclear?

Nós cometemos o erro de misturar energia nuclear com armas nucleares, como se tudo aquilo que é nuclear fosse maligno. Eu acho que isto é um grande erro como se você misturasse medicamentos nucleares com armas nucleares.

Patrick Moore,
Ex-diretor do Greenpeace Internacional

A potência nuclear vem em dois sabores. A *fissão* nuclear é o sabor que nós sabemos como usar em estações de potência; a fissão consome urânio, um elemento excepcionalmente pesado, como combustível. A *fusão* nuclear é o segundo sabor que nós ainda não sabemos como implementar em estações de potência; a fusão utilizaria elementos leves, especialmente hidrogênio, como combustível. As reações de fissão dividem núcleos pesados em núcleos de peso médio, liberando energia. As reações de fusão fundem núcleos leves em núcleos de peso médio, liberando energia.

Ambas as formas de potência nuclear, fissão e fusão, possuem uma propriedade importante: a energia nuclear disponível por átomo é aproximadamente um milhão de vezes maior do que a energia química por átomo dos combustíveis típicos. Isto significa que a quantidade de combustível e resíduos com os quais se deve lidar num reator nuclear podem ser um milhão de vezes menores do que as quantidades de combustíveis e resíduos equivalentes em uma estação de potência de combustível fóssil.

Vamos tentar personalizar estas ideias. A massa dos combustíveis fósseis consumida por um "britânico de classe média" é cerca de 16 kg por dia (4 kg de carvão, 4 kg de petróleo, e 8 kg de gás). Isto significa que a cada dia, uma quantidade de combustíveis fósseis com o mesmo peso de quase 16 litros de leite é extraído de um buraco do chão, transportado, processado, e queimado em algum lugar para você. Os hábitos de combustíveis fósseis de um britânico de classe média criam 11 toneladas por ano de resíduos de dióxido de carbono; isto são 30 kg por dia. No capítulo anterior nós trabalhamos com a ideia da captura dos resíduos de dióxido de carbono, comprimindo-o para a forma líquida ou sólida e transportando-o para ser jogado fora em algum lugar. Imagine que uma pessoa foi responsável por capturar e lidar com todos os seus próprios resíduos de dióxido de carbono. 30

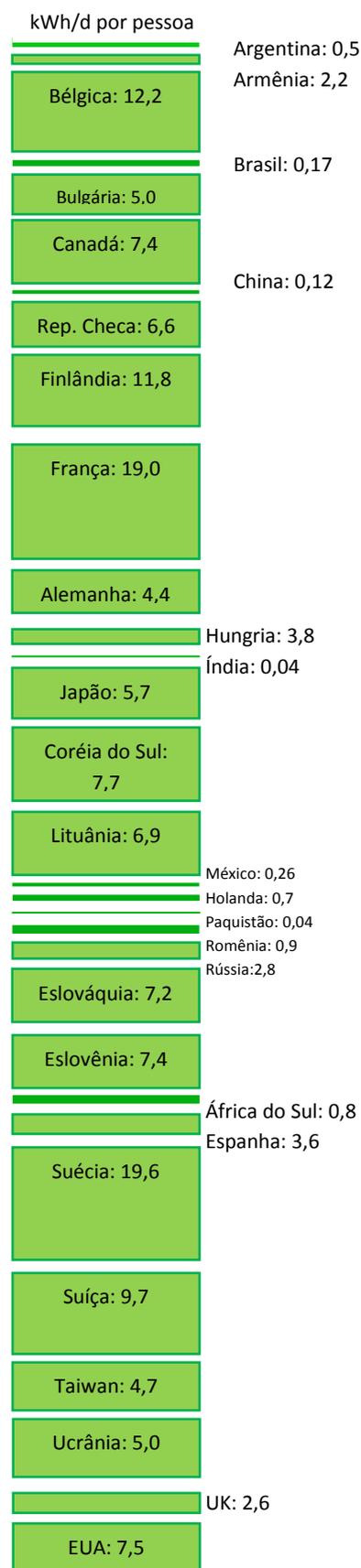


Figura 24.1 Eletricidade gerada per capita da fissão nuclear em 2007, em kWh por dia por pessoa, em cada um dos países com energia nuclear.

kg por dia de dióxido de carbono é uma mochila cheia todos os dias - o mesmo peso que cerca de 30 litros de leite!

Em contraste, a quantidade de urânio natural necessária para fornecer a mesma quantidade de energia dos 16 kg de combustíveis fósseis, em um reator de fissão padrão, é 2 gramas; e os resíduos resultantes são um quarto de grama. (Estas 2 g de urânio não são tão pequenas quanto um milionésimo de 16 kg por dia, por sinal, porque os reatores de hoje em dia queimam menos do que 1% do urânio.) Para fornecer 2 g de urânio por dia, os mineradores nas minas de urânio teriam que talvez lidar com 200 g de minério de urano por dia.

Então os fluxos de materiais que entram e saem dos nossos reatores nucleares são pequenos, se comparados aos fluxos de combustíveis fósseis. "Pequeno é bonito", mas o fato de que os resíduos nucleares são pequenos não quer dizer que eles não sejam um problema; é apenas um "belamente pequeno" problema.

Potência "sustentável" da fissão nuclear

A figura 24.1 mostra quanta eletricidade foi gerada globalmente pela potência nuclear em 2007, discriminada por cada país.

A potência nuclear poderia ser "sustentável"? Deixando de lado por um momento as questões de sempre sobre segurança e descarte de resíduos, a questão chave é se a humanidade poderia viver por gerações da fissão nuclear. Qual o tamanho das reservas de urânio mundiais, ou outros combustíveis de fissão? Nós temos apenas algumas décadas de urânio para usar, ou nós temos o suficiente para um milênio?

Para estimar a potência "sustentável" do urânio, eu peço o total de urânio recuperável no solo e nas águas dos oceanos, dividido igualmente entre os 6 bilhões de humanos, e perguntei "quão rapidamente nós podemos utilizar isto se isto tem que durar 1000 anos?"

Quase todo o urânio recuperável está nos oceanos, não no solo: a água do mar contém 3,3 mg de urânio por m³ de água, o que somam 4,5 bilhões de toneladas ao redor do mundo. Eu chamei o urânio nos oceanos de "recuperável" mas isto é um pouco impreciso - a maior parte das águas dos oceanos é inacessível, e a corrente transportadora dos oceanos gira apenas uma vez a cada 100 anos, mais ou menos; e ninguém ainda demonstrou a extração de urânio da água do mar em escala industrial. Então nós faremos estimativas

Milhões de toneladas de urânio	
Austrália	1,14
Cazaquistão	0,82
Canadá	0,44
EUA	0,34
África do Sul	0,34
Namíbia	0,28
Brasil	0,28
Federação Russa	0,17
Uzbequistão	0,12
Total mundial (reservas convencionais no solo)	4,7
Depósitos de fosfato	22
Água do mar	4500

Tabela 24.2. Recursos recuperáveis conhecidos de urânio. A parte de cima da tabela mostra os "recursos razoáveis certos" e "recursos inferidos", a um custo de \$130 por kg de urânio, em 1 de Janeiro de 2005. Estes são os recursos estimados em áreas onde a exploração de urânio aconteceu. Existe também 1,3 milhões de toneladas de urânio esgotado parados em estoques, um sub-produto de atividades anteriores com urânio

separadas para dois casos: primeiro utilizando apenas o urânio das minerações, e depois usando o urânio do oceano também.

O minério de urânio no solo que é extraível a preços abaixo de \$ 130 por kg de urânio é cerca de um milésimo disto. Se os preços ficassem acima de \$130 por kg, os depósitos de fosfato que contém urânio à baixa concentração se tornariam econômicos para minerar. Recuperar urânio dos fosfatos é perfeitamente possível, e já foi feito na América e na Bélgica antes de 1998. Para a estimativa de urânio minerado, eu adicionarei tanto o minério de urânio convencional e os de fosfatos, nos dando um recurso total de 27 milhões de toneladas de urânio (tabela 24.2).

Nós consideraremos duas formas de usar urânio em um reator: (a) *o método de ciclo aberto, sem reprocessamento, largamente utilizado* e que retira energia principalmente do ^{235}U (que faz até 0,7% de urânio) e descarta o remanescente ^{238}U ; (b) *os reatores super-regeneradores a nêutrons rápidos*, que são mais caros de construir, e convertem ^{238}U em plutônio-239 fissionável e obtém aproximadamente 60 vezes mais energia do urânio

Reatores de ciclo aberto, usando urânio do solo

Uma estação de potência de ciclo aberto de um gigawatt de potência consome **162 toneladas por ano de urânio**. Então os recursos de mineração do urânio conhecidos, divididos entre 6 bilhões de pessoas, duraria 1000 anos se nós produzíssemos potência nuclear a uma taxa de **0,55 kWh por dia por pessoa**. Essa taxa sustentável é a saída de apenas 136 estações de potência nuclear, e é metade da produção nuclear atual. É muito possível que isto seja uma subestimação do potencial do urânio, uma vez que, como ainda não existe falta de urânio, não existe incentivo para a exploração e pouca exploração foi feita desde da década de 1980; então talvez mais urânio que possa ser minerado seja descoberto. De fato, um artigo publicado em 1980 estimou que o recurso de urânio de baixo-custo é mais do que 1000 vezes maior do que as 27 milhões de toneladas que nós assumimos.

Poderia o nosso atual uso em ciclo aberto de urânio minerado ser sustentável? É difícil afirmar, uma vez que existe tanta incerteza sobre os resultados das explorações futuras. Certamente na taxa de consumo atual, reatores de ciclo aberto poderiam continuar funcionando por centenas de anos. Mas se nós quiséssemos colocar a potência nuclear em marcha 40



Figura 24.3. Trabalhadores empurrando balas de urânio no Reator Graphite X-10.



Figura 24.4. A planta nuclear da Ilha Three Mile.



Figura 24.5. Estabelecimento de Desenvolvimento de Potência Nuclear Dounreay, cujo propósito primário era o desenvolvimento de tecnologia de reator de reprodução rápida. Foto de John Mullen.

vezes maior no mundo, com o objetivo de parar de utilizar combustíveis fósseis e permitir que os padrões de vida aumentem, nós talvez nos preocupemos que os reatores de ciclo aberto não seja uma tecnologia sustentável.

Reatores super-regeneradores a nêutrons rápidos, usando o urânio do solo

O urânio pode ser utilizado de forma 60 vezes mais eficiente em reatores super-regeneradores a nêutrons rápidos, que queimam todo o urânio - tanto o ^{235}U quanto o ^{238}U (em contraste com o reator de ciclo aberto, que queima principalmente ^{235}U). Desde que nós não lancemos para fora o combustível que é descartado pelos reatores de ciclo aberto, esta fonte de urânio esgotado também pode ser utilizada de modo que o urânio colocado nos reatores de ciclo aberto não precise ser descartado. Se nós usarmos todo o urânio possível de minerar (mais os estoques de urânio esgotados) em reatores super-regeneradores 60 vezes mais eficientes, a potência seria **33 kWh por dia por pessoa**. As atitudes em relação aos reatores super-regeneradores vão do "esta é uma tecnologia experimental falha e perigosa da qual nós não devemos falar" até o "nós podemos e devemos começar a construir reatores super-regeneradores agora mesmo". Eu não estou apto a comentar sobre os riscos da tecnologia dos super-regeneradores, e eu não quero misturar questões éticas com fatuais. Meu objetivo é ajudar a entender os números. A única posição ética que eu gostaria de empurrar é "nós devemos ter um plano que faça a diferença".

Ciclos abertos, usando urânio dos oceanos

O urânio dos oceanos, se completamente extraído e utilizado em reatores de ciclo aberto, corresponde a uma energia total de

$$\frac{4,5 \text{ bilhões por planeta}}{162 \text{ toneladas por GW} - \text{ano}} = 28 \text{ milhões GW} - \text{ano por planeta}$$

Quão rapidamente o urânio seria extraído dos oceanos? Os oceanos circulam devagar: metade da água está no Oceano Pacífico, e as águas profundas do Pacífico circulam para a superfície no grande transportador do oceano apenas num período de cada 1600 anos. Vamos imaginarmos que 10% do

urânio é extraído em um período de 1600 anos. Isto é uma taxa de extração de 280 000 toneladas por ano. Em reatores de ciclo aberto, isto forneceria potência a uma taxa de

$$2,8 \text{ milhões de anos} / 1600 \text{ anos} = 1750 \text{ GW},$$

que, divididos entre 6 bilhões de pessoas, são **7 kWh por dia por pessoa**. (Existe atualmente 369 GW de reatores nucleares, então este valor corresponde a um aumento de 4 vezes na potência nuclear se comparado aos níveis atuais.) Eu concluo que a extração de urânio do oceano tornaria os reatores de ciclo aberto atuais em uma opção "sustentável" - assumindo que os reatores de urânio possam cobrir o custo energético do processo de extração dos oceanos.

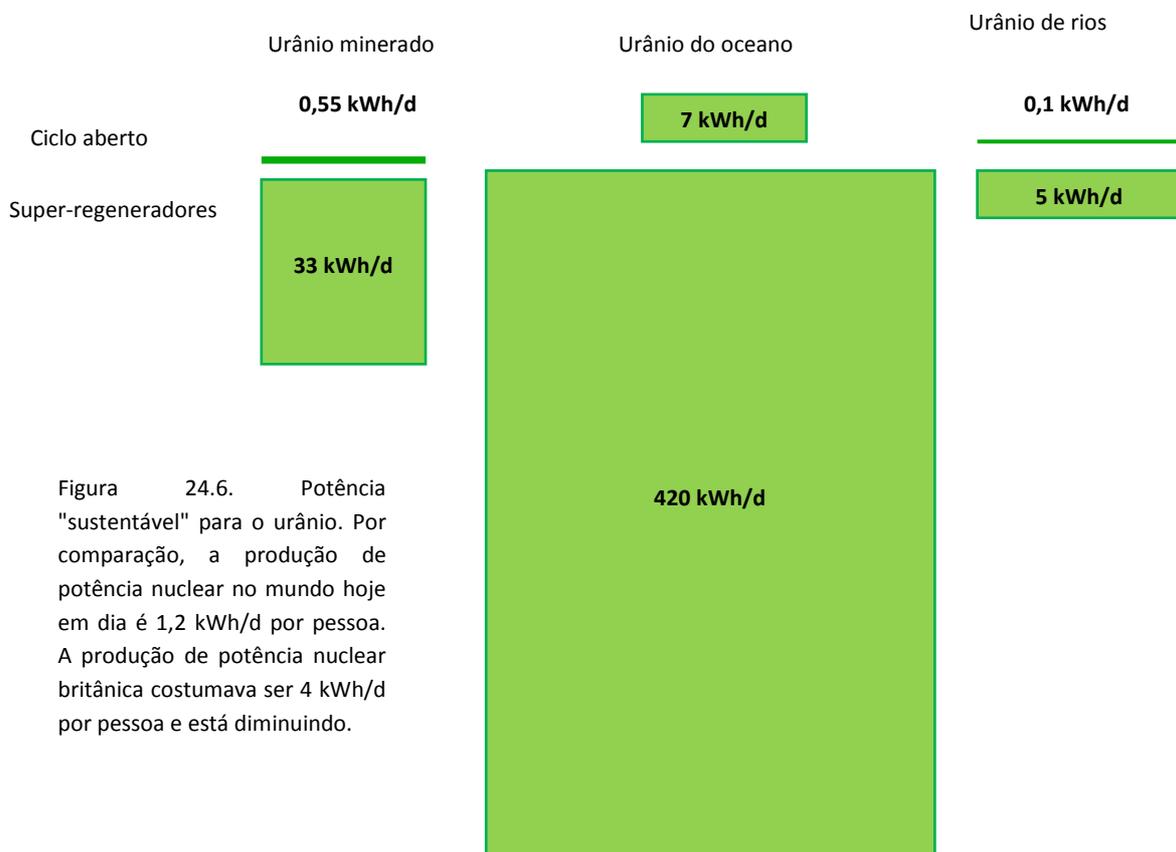


Figura 24.6. Potência "sustentável" para o urânio. Por comparação, a produção de potência nuclear no mundo hoje em dia é 1,2 kWh/d por pessoa. A produção de potência nuclear britânica costumava ser 4 kWh/d por pessoa e está diminuindo.

Reatores de super-regeneração, usando urânio dos oceanos

Se reatores rápidos são 60 vezes mais eficientes, a mesma extração de urânio dos oceanos poderia fornecer **420 kWh por dia por pessoa**. Finalmente, um valor de sustentabilidade que

bate o consumo! - mas apenas com a ajuda conjunta de duas tecnologias que são respectivamente pouco desenvolvida e fora de moda: a extração de urânio dos oceanos, e reatores super-regeneradores.

Usando o urânio de rios

O urânio nos oceanos é complementado com aquele dos rios, que fornecem urânio a uma taxa de 32 000 toneladas por ano. Se 10% deste fluxo fosse capturado, isto forneceria combustível suficiente para 20 GW de reatores de ciclo aberto, ou 1200 GW de reatores super-regeneradores. Os reatores super-regeneradores forneceriam **5 kWh por dia por pessoa**. Todos esses números são resumidos na figura 24.6.

E os custos?

Como sempre, neste livro, meus cálculos prestaram pouca atenção aos fatores econômicos. Contudo, uma vez que a principal contribuição da potência nuclear baseada em urânio extraído dos oceanos é uma das maiores na nossa lista de produção "sustentável", parece apropriado discutir se este valor de urânio é plausível economicamente de alguma maneira.

Pesquisadores japoneses encontraram uma técnica para extrair urânio da água do mar a um custo de \$100-300 por quilograma de urânio, em comparação com o custo atual de \$20/kg de urânio do minério. Como o urânio contém muito mais energia por tonelada do que os combustíveis tradicionais, este aumento de 5 ou 15 vezes no custo do urânio teria pouco efeito no custo da energia nuclear: o preço da energia nuclear é dominado pelo custo da construção e desativação da estação de potência, não pelo custo do combustível. Mesmo um preço de \$ 300/kg aumentaria o preço da energia nuclear em apenas 0,3 p por kWh. O custo econômico da extração do urânio poderia ser reduzido com a combinação dela com outro uso para a água do mar - por exemplo a refrigeração de estações de potência.

Nós ainda não estamos confortáveis: esta técnica japonesa pode ser ampliada? Qual é o custo energético de processar a água do mar? No experimento japonês, três gaiolas cheias de material adsorvente que atraia o urânio, pesando um total de 350 kg coletaram "mais do que 1 kg de bolo amarelo em 240 dias"; este resultado corresponde a cerca de 1,6 kg por

ano. As gaiolas possuíam uma área superficial de 48 m². Para alimentar uma estação de potência de ciclo aberto de 1 GW, nós precisamos de 160 000 kg por ano, o que equivale a uma taxa de produção 100 000 vezes maior do que o do experimento japonês. Se nós simplesmente ampliássemos a técnica japonesa, que acumulou passivamente urânio do mar, uma potência de 1 GW necessitaria de gaiolas contendo uma área coletora de 4,8 km² e contendo um peso de 350 000 toneladas de material adsorvente - mais do que o peso do aço no reator em si. Para colocar estes grandes números em termos humanos, se o urânio fornecesse, digamos, 22 kWh por dia por pessoa, cada reator de 1 GW seria dividido entre 1 milhão de pessoas, cada qual necessitando 0,16 kg de urânio por ano. Então cada pessoa necessitaria um décimo da instalação do experimento japonês, com um peso de 35 kg por pessoa, e uma área de 5 m² por pessoa. A proposta de que tais instalações de extração de urânio é então similar à propostas como "cada pessoa deveria ter 10 m² de painéis solares" e "cada pessoa deveria ter um carro de uma tonelada e um lugar para estacioná-lo". Um investimento grande, sim, mas não absurdamente fora de escala. E este foi o cálculo para reatores de ciclo aberto. Para reatores super-regeneradores, 60 vezes menos urânio é necessário, então a massa de urânio por pessoa do coletor de urânio seria 0,5 kg.

Tório

O tório é um elemento radioativo similar ao urânio. Usado anteriormente para fazer camisas de lampião à gás, ele é cerca de três vezes mais abundante na crosta terrestre do que o urânio. O solo geralmente contém cerca de 6 partes por milhão de tório, e alguns minerais contém 12% de óxido de tório. A água do mar contém pouco tório, porque o óxido de tório é insolúvel. O tório pode ser completamente queimado em reatores simples (em contraste com os reatores padrões de urânio que utilizam apenas 1% do urânio natural). O tório é usado em reatores nucleares na Índia. Se os minérios de urânio ficarem escassos, tório provavelmente será o combustível nuclear dominante.

Reatores de tório fornecem 3,6 bilhões de kWh de calor por tonelada de tório, o que implica que um reator de 1 GW necessita de cerca de 6 toneladas de tório por ano, assumindo que seus geradores sejam 40% eficientes. Os recursos de tório no mundo são estimados ao total de 6

País	Reservas (1000 tons)
Turquia	380
Austrália	300
Índia	290
Noruega	170
EUA	160
Canadá	100
África do Sul	35
Brasil	16
Outros países	95
Total Mundial	1580

Tabela 24.7. Os recursos mundiais de tório em monazíticas (economicamente extraíveis).



Figura 24.8. Opções do tório.

milhões de toneladas, quatro vezes maior do que as reservas conhecidas mostradas na tabela 24.7. Assim como com os recursos de urânio, parece plausível que esses recursos de tório sejam subestimados, uma vez que o prospecto do tório não é valorizado atualmente. Se nós assumirmos, assim como com o urânio, que estes recursos são usados por 1000 anos e divididos igualmente entre 6 bilhões de pessoas, nós descobrimos que a potência "sustentável" gerada pelo tório é de 4 kWh por dia por pessoa.

Um reator nuclear alternativo para o tório, o "amplificador de energia" ou "sistema de direção acelerada" proposto pelo prêmio Nobel Carlo Rubbia e seus colegas iria, conforme eles estimaram, converter 6 milhões de toneladas de tório em 15 000 TWh de energia, ou 60 kWh/d por pessoa por 1000 anos. Assumido conversão para eletricidade com uma eficiência de 40%, isto forneceria 24 kWh/d por pessoa por 1000 anos. E os resíduos do amplificador de energia seriam muito menos radioativos também. Eles discutem que, no devido tempo, quantidades muitas vezes maiores de tório seriam extraídas de forma econômica do que os atuais 6 milhões de toneladas. Se a sugestão deles - 100 vezes mais - estiver correta, então o tório e o amplificador de energia poderiam oferecer 120 kWh/d por pessoa por 60 000 anos.

Uso da terra

Vamos imaginar que a Grã-Bretanha decida que é importante parar de utilizar combustíveis fósseis, e crie vários novos reatores nucleares, mesmo que isto possa não ser "sustentável". Se nós construirmos reatores o suficiente para tornar possível uma retirada de carbono significativa do transporte e do aquecimento, nós poderíamos ajustar os reatores nucleares necessários na Grã-Bretanha? O número que nós precisamos agora é a potência por unidade de área de estações de potência nuclear, o que é cerca de 1000 W/m² (figura 24.10). Vamos imaginar gerar 22 kWh por dia por pessoa de potência nuclear - equivalente a 55 GW (aproximadamente o mesmo que a potência nuclear da França), que poderia ser fornecida por 55 estações de potência nuclear, cada uma ocupando um quilômetro quadrado. Isto são cerca de 0,02% da área do país. Parques eólicos fornecendo a mesma potência necessitariam 500 vezes mais terra: 10% do país. Se as estações de potência nuclear fossem alocadas em pares pela costa (comprimento de 3000 km, a 5 km de resolução), então existiriam duas a cada 100 km. Assim



Figura 24.9. Estações de potência de Sizewell A, no fundo, possuía uma capacidade de 420 MW, e foi fechada no final de 2006. Sizewell B, atrás, possui uma capacidade de 1,2 GW. Foto de William Connolley.

enquanto a área necessária é pequena, a fração de linha de costa englobada por estas estações de potência seria cerca de 2% (2 quilômetros em cada 100).

Custo da limpeza

Qual é o custo para limpar os locais de potência nuclear? A autoridade de desativação nuclear possui um orçamento anual de £2 bilhões para os próximos 25 anos. A indústria nuclear vendeu para todos no Reino Unido 4 kWh/d por cerca de 25 anos, então o custo da autoridade de desativação nuclear é 2,3p /kWh. Isto é um subsídio considerável- apesar que, devo dizer, não tão considerável quanto o subsídio atualmente fornecido para a eólica marítima (7p/kWh).

Segurança

A segurança das operações nucleares na Grã-Bretanha continuam uma preocupação. A instalação de reprocessamento THORP em Sellafield, construída em 1994 a um custo de £1,8 bilhões, possui um vazamento crescente de um cano quebrado de Agosto de 2004 até Abril de 2005. Por oito meses, o vazamento deixou *85 000 litros* de fluido de urânio enriquecido vazar em um cárter que estava equipado com sistemas de segurança que foram projetados para detectar imediatamente qualquer vazamento tão pequeno como *15 litros*. Mas o vazamento não foi detectado porque os operadores não tinham completado as checagens que garantissem que o sistema de segurança estivesse em funcionamento; e os operadores tinham o hábito de ignorar os alarmes de segurança de qualquer forma.

O sistema de segurança veio com cinto e suspensórios. Independentemente da falha dos alarmes de segurança, medidas de segurança rotineiras dos fluidos no cárter deveriam ter detectado a presença anormal de urânio em um mês a partir do início do vazamento; mas os operadores com frequência não se incomodavam em realizar estas medidas rotineiras, porque eles se achavam ocupados demais; e quando eles *realizavam* as medidas que detectavam a presença anormal de urânio no cárter (em 28 de agosto de 2004, 26 de novembro de 2004, e 24 de fevereiro de 2005), nenhuma providência foi tomada.

Em abril de 2005, *22 toneladas* de urânio haviam vazado, mas ainda nenhum dos sistemas de detecção de



Figura 24.10. Sizewell ocupa menos do que 1 km². A rede azul tem um espaçamento de 1 km. ©Crown copyright; Ordnance Survey.

vazamento havia detectado o vazamento. O vazamento foi finalmente detectado por *contabilidade*, quando os contadores de feijões notaram que eles estavam recebendo 10% menos urânio do que seus clientes afirmaram que colocariam! Graças à deus esta companhia privada tem o lucro como incentivo, não? A crítica do Chefe Inspetor de Instalações Nucleares foi tímida: "A Planta foi operada em uma cultura que parecia permitir que instrumentos operassem no modo de alarme ao invés de questionar o alarme e retificar o problema relevante".

Ao mesmo tempo, nós não podemos nos permitir perder a cabeça de horror ao perigo da potência nuclear. A potência nuclear não é infinitamente perigosa. Ela é apenas perigosa, assim como as minas de carvão, repositórios de petróleo, queima de combustíveis fósseis e turbinas eólicas também são. Mesmo que nós não tenhamos garantias contra acidentes nucleares no futuro, eu acho que o caminho certo para avaliar a nuclear é compará-la objetivamente com outras fontes de energia. Estações de potência de carvão, por exemplo, expõe o público à radiação nuclear, porque as cinzas do carvão contém tipicamente urânio. De fato, de acordo com um artigo publicado na revista *Science*, as pessoas na América vivendo perto de estações de potência de queima de carvão são expostas a maiores doses de radiação do que aquelas vivendo próximo a estações de potência nuclear.

Ao quantificar os riscos públicos dos diferentes tipos de geração de potência, nós precisamos de uma nova unidade. Eu usarei "mortes por GWa (gigawatt-ano)". Deixe-me tentar explicar o que significaria se uma fonte de potência tivesse uma taxa de morte de 1 morte por GWa. Um gigawatt-ano é a energia produzida por uma estação de potência de 1 GW, se ela operar sem rodeios por um ano. O consumo elétrico da Grã-Bretanha é aproximadamente 45 GW, ou, se você preferir, 45 gigawatts-ano por ano. Então se nós pegarmos a nossa eletricidade de fontes com taxa de morte de 1 morte por GWa, isto significaria que o sistema de fornecimento de eletricidade da Grã-Bretanha estava matando 45 pessoas por ano. Por comparação, 3000 pessoas morrem por ano nas nossas estradas britânicas. Então, se você não está fazendo campanha a favor da abolição das estradas, você pode deduzir que "1 morte por GWa" é uma taxa de mortes que, mesmo que triste, você pode ser capaz de conviver com ela. Obviamente, 0,1 mortes por GWa seria melhor, mas leva apenas um momento de reflexão para perceber que, infelizmente, a produção de energia através de combustíveis fósseis possui um custo maior do que 0,1 morte por GWa -

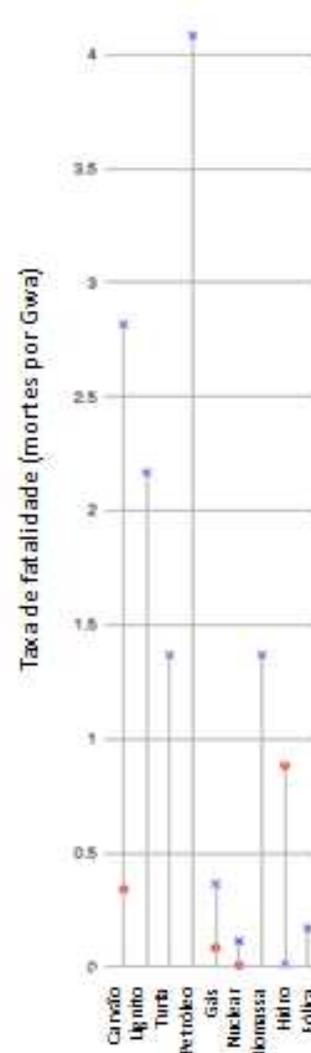


Figura 24.11. Taxas de mortes das tecnologias de geração de eletricidade. x: Estimativas da União Europeia pelo projeto ExternE. O: Instituto Paul Scherer.

apenas pense nos desastres nas plataformas de petróleo; helicópteros perdidos no mar; incêndios em encanamentos; explosões em refinarias; e acidentes nas minas de carvão: existem dez fatalidades na cadeia fóssil por ano na Grã-Bretanha.

Então vamos discutir as taxas reais de mortes de uma gama de fontes de energia. As taxas de mortes variam muito de país para país. Na China, por exemplo, a taxa de morte nas minas de carvão, por tonelada de carvão fornecido, é 50 vezes maior do que a maioria das nações. A Figura 24.11 mostra números de estudos pelo Instituto Paul Scherer e pelo projeto da União Européia chamado ExternE, que fez estimativas compreensivas de todos os impactos da produção de energia. De acordo com os dados da União Europeia, carvão, linhita, e petróleo possuem as maiores taxas de mortes, seguidas pela turfa e energia da biomassa, com taxas de mortes acima de 1 por GWa. A nuclear e eólica são as melhores, com taxas de morte menores do que 0,2 por GWa. Hidroeletricidade é a melhor de todas segundo os estudos da União Europeia, mas se sai como a pior no estudo do Instituto Paul Scherer, porque o segundo pesquisou um conjunto diferente de países.

Energia nuclear inerentemente segura

Estimulados por preocupações com acidentes nucleares, engenheiros tem desenvolvido muitos novos reatores com características de segurança melhoradas. A planta de potência GT-MHR, por exemplo, é clamada como sendo inerentemente segura; e, ainda por cima ela possui uma maior eficiência de conversão de calor em eletricidade do que as plantas nucleares convencionais [gt-mhr.ga.com].

Mitos

Dois defeitos largamente citados da energia nuclear são os custos de construção e o descarte de resíduos. Vamos examinar alguns aspectos destas duas questões.

*Construir uma estação de potência nuclear requer **grandíssimas** quantidades de concreto e aço, material cujas criações envolvem **grandíssimas** quantidades de emissão de CO₂.*

O aço e o concreto em uma estação de potência nuclear de 1 GW possui uma pegada de carbono de aproximadamente 300 000 tCO₂.

Dividindo-se este "grandíssimo" número pela vida de um reator de 25 anos de idade nós podemos expressar essa contribuição para a intensidade de carbono nas unidades padrões (gCO₂ por kWh(e)),

$$\text{intensidade de carbono associada com a construção} = \frac{300 \times 10^9 \text{g}}{10^6 \text{kWh(e)} \times 220 \text{ 000h}}$$
$$= 1,4 \text{ g/kWh(e)}$$

o que é muito menor do que a referência dos combustíveis fósseis de 400 g CO₂/kWh(e). O IPCC estima que a intensidade de carbono *total* da energia nuclear (incluindo construção, processamento de combustível, e a desativação) é menor do que 40 gCO₂/kWh(e) (Sims et al., 2007).

Por favor, não me entenda errado: eu não estou tentando ser a favor da nuclear. Eu só sou a favor da aritmética.

Os resíduos de reatores nucleares não são um grande problema?

Como nós observamos no início deste capítulo, o volume de resíduos de reatores nucleares é relativamente pequeno. Enquanto as cinzas de dez estações de potência de queima de carvão teriam uma massa de quatro milhões de toneladas por ano (tendo um volume de aproximadamente 40 litro por pessoa por ano), os resíduos nucleares de dez estações nucleares da Grã-Bretanha possuem um volume de apenas 0,84 litros por pessoa por ano - eu acho que isto equivale a uma garrafa de vinho por pessoa por ano (figura 24.13).

A maior parte destes resíduos são resíduos de baixo-nível. 7% são resíduos de nível intermediário, e apenas 3% deles - 25 ml por ano - são resíduos de alto nível.

Os resíduos de alto nível são os realmente desagradáveis. Convencionalmente se mantém os resíduos de alto nível no reator nos primeiros 40 anos. Ele é armazenado em piscinas de água e refrigerado. Após 40 anos, o nível de radioatividade diminuiu 1000 vezes. O nível de radioatividade continua a cair; após 1000 anos, a radioatividade dos resíduos de alto nível será a mesma do minério de urânio. Então os engenheiros de armazenamento de resíduos devem fazer um



Figura 24.12. A estação de potência de Chernobyl (no topo), e a cidade abandonada de Prypiat, a qual ela costumava servir (abaixo). Fotos de Nik Stanbridge.

planejamento para garantir a segurança de resíduos de alto nível por 1000 anos.

Este é um problema complicado? 1000 anos é com certeza um longo período se comparado com o tempo de vida dos governos e países! Mas os volumes são tão pequenos, que eu sinto que os resíduos nucleares são uma preocupação minoritária, se comparada com todas as outras formas de resíduos que atingirão as futuras gerações. Com 25 ml por ano, o período de vida de um resíduo nuclear de alto nível somaria menor do que 2 litros. Mesmo quando nós multiplicamos isto por 60 milhões de pessoas, o período de vida do volume do resíduo nuclear não parece fora de controle: 105 000 metros cúbicos. Este é o mesmo volume que 35 piscinas olímpicas. Se estes resíduos fossem colocados com uma camada de um metro de profundidade, eles ocupariam apenas um décimo de um quilômetro quadrado.

Já existe uma variedade de lugares que são fora dos limites para os humanos. Eu não posso invadir o seu jardim. Nem você deveria invadir o meu. Nenhum de nós é bem-vindo em Balmoral. Cartazes de "Mantenha distância" estão por todos os lados. Downing Street, aeroporto Heathrow, instalações militares, minas abandonadas - todos eles estão fora dos limites. É impossível imaginar fazer outro quilômetro quadrado - talvez até subterrâneo - que seja fora dos limites por 1000 anos?

Compare estes 25 ml por ano por pessoa de resíduos de alto nível da nuclear com outros tipos de resíduos tradicionais que nós normalmente descartamos: resíduos municipais - 517 kg por ano por pessoa; resíduos perigosos - 83 kg por ano por pessoa.

As pessoas algumas vezes comparam possíveis novos resíduos nucleares com o resíduo nuclear com o qual nós já temos que lidar, graças à existência dos nossos velhos reatores. Aqui estão os números para o Reino Unido. O volume projetado de "resíduos de maior atividade" até 2120, após o desmantelamento das instalações nucleares existentes, é 478 000 m³. Deste volume, 2% (cerca de 10 000 m³) serão os resíduos de alto nível (1290 m³) e combustível gasto (8150 m³) que juntos contém 92% de atividade. Construir 10 novos reatores nucleares (10 GW) adicionaria mais 31 900 m³ de combustível gasto no total. Isto é o mesmo volume que dez piscinas olímpicas.



Figura 24.13. Os resíduos nucleares britânicos, por pessoa, por ano, possuem um volume levemente maior do que de uma garrafa de vinho.

Se nós temos muita e muita potência da fissão e fusão nuclear, isto não contribuiria para o aquecimento global, por causa de toda a energia extra sendo liberada para o meio ambiente?

Esta é uma questão engraçada. E porque nós expressamos cuidadosamente tudo neste livro em um único conjunto de unidades, ela é bastante fácil de responder. Primeiro, vamos recapitular os números chave do nosso balanço de energia global da página 131: a média de energia solar absorvida pela atmosfera, terra e oceanos é 238 W/m^2 ; dobrar a concentração de CO_2 na atmosfera aumentaria efetivamente o aquecimento em 4 W/m^2 . Acredita-se que este aumento de 1,7% em calor seja ruim para o clima. Variações na potência solar durante o ciclo solar de 11 anos possui um tamanho de $0,25 \text{ W/m}^2$. Então agora assumamos que em aproximadamente 100 anos, a população mundial seja de 10 bilhões, e que todos que estão vivendo na Europa são de classe média, consumindo 125 kWh por dia vindos de fontes de combustíveis fósseis, da energia nuclear, ou da potência geotérmica. A área de terra por pessoa seria $51\,000 \text{ m}^2$. Dividindo a potência por pessoa pela área por pessoa, nós descobrimos que a potência extra contribuída pelo uso energético humano seria de $0,1 \text{ W/m}^2$. Isto é um quadragésimo dos 4 W/m^2 com que nós estamos atualmente nos preocupando, e um pouco menor do que os $0,25 \text{ W/m}^2$ do efeito das variações solares. Então sim, sob estas suposições, a produção de potência humana *apenas* se mostraria como um contribuinte para as alterações climáticas.



Eu ouvi que a potência nuclear não pode ser construída a uma taxa suficiente para fazer uma contribuição útil.

A dificuldade de construir potência nuclear de forma rápida foi exagerada com a ajuda de uma técnica de apresentação enganosa que eu chamo de "o campo de jogo mágico". Nesta técnica, duas coisas parecem ser comparadas, mas a base da comparação é mudada no meio do jogo. O editor de meio-ambiente do *The Guardian*, resumindo uma reportagem do Grupo de Pesquisa de Oxford, escreveu "Para que a energia nuclear faça uma contribuição significativa para a redução nas emissões de carbono globais nas próximas duas gerações, a indústria teria que construir aproximadamente 3000 novos reatores - ou cerca de um novo por semana por 60 anos. Uma construção nuclear civil e programa de distribuição nesta escala é um sonho, e completamente inviável. A maior taxa da história é de 3,4 reatores novos em um ano." 3000

parece muito maior do que 3,4, não é? Na aplicação desta técnica do "campo de jogo mágico", existe uma troca não apenas na **escala de tempo** mas também na **região**. Enquanto a primeira informação (3000 novos reatores **em 60 anos**) é o número necessário para **todo o planeta**, a segunda informação (3,4 reatores **por ano**) é a máxima taxa de construção de reatores **em um único país** (França)!

Uma apresentação mais honesta teria mantido a comparação em uma base do planeta. A França possui 59 dos 429 reatores nucleares operando, então é possível que a maior taxa de construção de reatores nucleares para o planeta todo seja algo como dez vezes a taxa da França, isto é, 34 novos reatores por ano. E a taxa necessária (3000 reatores em 60 anos) é de 50 novos reatores por ano. Então a afirmação "Uma construção nuclear civil e programa de distribuição nesta escala é um sonho, e completamente inviável" é besteira. Sim, é uma grande taxa de construção, mas está no mesmo patamar que as taxas das construções na história.

Quão razoável é o meu palpite de que a taxa de construção histórica máxima mundial deve ter sido 34 novos reatores nucleares em um ano? Vamos olhar para os dados. a figura 24.14 mostra a potência da frota nuclear no mundo em função do tempo, mostrando apenas as estações de potência ainda funcionando em 2007. A taxa de maior construção foi a maior em 1984, e teve um valor de (rufem os tambores, por favor...) cerca de 30 GW por ano - cerca de 30 reatores de 1 GW. Então aí está!

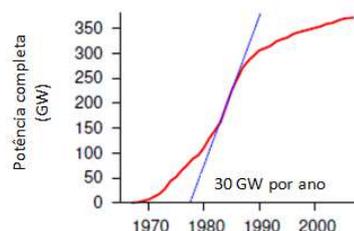


Figura 24.14. Gráfico do total de potência nuclear construída no mundo desde 1967 e que ainda está operacional até hoje. A taxa de construção de pico mundial foi de 30 GW de potência nuclear por ano em 1984.

E a fusão nuclear?

Nós dizemos que nós colocaremos o sol dentro de uma caixa. Esta ideia é bonita. O problema é, nós não sabemos como fazer a caixa.

Sébatien Balibar, Diretor de Pesquisa, CNRS.

A potência da fusão nuclear é especulativa e experimental. Eu acho que seria um pouco imprudente assumir que o problema da fusão *será* resolvido, mas eu ficarei feliz em estimar quanta potência a fusão nuclear poderia fornecer, se o problema for solucionado.

As duas reações de fusão que são consideradas as mais promissoras são:

a reação DT, que funde deutério com trítio, formando hélio; e

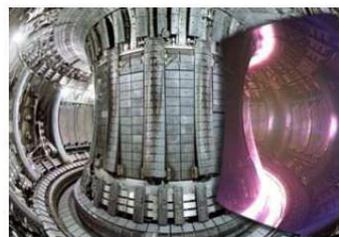


Figura 24.15. O interior de um reator de fusão nuclear experimental. A imagem dividida mostrando o recipiente de vácuo JET com uma imagem sobreposta do plasma JET, tiradas com uma câmera de TV normal. Foto: EFDA-JET.

a reação **DD**, que funde deutério com deutério.

O deutério, um isótopo pesado natural de hidrogênio, pode ser obtido da água do mar; o trítio, um isótopo mais pesado do hidrogênio, não é encontrado em grandes quantidades naturalmente (porque ele possui uma meia-vida de apenas 12 anos) mas ele pode ser produzido a partir do lítio.

O ITER é um projeto internacional para descobrir como produzir um reator de fusão nuclear de trabalho constante. O protótipo ITER utiliza a reação DT. Prefere-se a DT ao invés da DD, porque a reação DT fornece mais energia e porque necessita uma temperatura de "apenas" 100 milhões de °C para funcionar, enquanto a reação DD necessita temperaturas de 300 milhões de °C. (A temperatura máxima do sol é de 15 milhões de °C.)

Vamos fantasiar, e assumir que o projeto ITER tenha sucesso. Que potência sustentável a fusão nuclear poderia fornecer? Estações de potência utilizando a reação DT, abastecidas com lítio, ficarão sem combustível quando o lítio acabar. Antes deste tempo, esperançosamente a segunda instalação da fantasia terá chego: reatores nucleares utilizando apenas deutério.

Eu chamarei estas duas fontes fantasiosas de energia de "fusão de lítio" e "fusão de deutério", nomeando-as em homenagem ao principal combustível com o qual teríamos que nos preocupar em cada caso. Vamos agora estimar quanta energia cada uma destas fontes poderia fornecer.

Fusão de lítio

As reservas mundiais de lítio são estimadas como sendo 9,5 milhões de toneladas de depósitos de minério. Se todas estas reservas fossem destinadas à fusão nuclear por 1000 anos, a potência fornecida seria de **10 kWh/d por pessoa**.

Existe outra fonte de lítio: a água do mar, onde o lítio possui uma concentração de 0,17 ppm. Para produzir lítio a uma taxa de 100 milhões de kg por ano da água do mar se estima ter um consumo energético de 2,5 kWh(e) por grama de lítio. Se os reatores de fusão nos fornecerem 2300 kWh(e) por grama de lítio, a potência nos fornecida seria então de **105 kWh/d por pessoa** (assumindo 6 bilhões de pessoas). Nesta taxa, o lítio nos oceanos duraria mais do que um milhão de anos.



Figura 24.16. Fusão a base de lítio, se usada de maneira justa e "sustentável", pode se comparar aos nossos níveis atuais de consumo. Lítio minerado forneceria 10 kWh/d por pessoa por 1000 anos; lítio extraído da água do mar poderia fornecer 105 kWh/d por pessoa por mais

Fusão de deutério

Se nós imaginarmos que cientistas e engenheiros resolvam o problema de fazer a reação DD funcionar, nós teremos algumas notícias muito boas. Existem 33 g de deutério em cada tonelada de água, e a energia que seria liberada com a fusão de apenas 1 g de deutério são os enlouquecedores 100 000 kWh. Mantendo em mente que a massa dos oceanos é de 230 milhões de toneladas por pessoa, nós podemos deduzir que existe deutério o suficiente para abastecer cada pessoa em um mundo com população dez vezes maior com uma potência de 30 000 kWh por dia (isto é mais do que 100 vezes o consumo de um norte-americano de classe média) por um milhão de anos (figura 24.17).



Figura 24.17. Fusão a base de deutério, se for algo atingível, oferece energia sustentável o bastante por milhões de anos. A escala do diagrama está encolhida dez vezes em cada dimensão para que a contribuição do potencial de fusão caiba na página. As pilhas verde e vermelha da figura 18.1 são mostradas na mesma escala, para comparação.

Observações e Leitura Complementar

N pg

206 **Figura 24.1.** Fonte: Associação Nuclear Mundial [5qntkb]. A capacidade total de reatores nucleares operáveis é 372 GW(e), utilizando 65 000 toneladas de urânio por ano. Os EUA possuem 99 GW, a França 63,5 GW, o Japão 47,6 GW, a Rússia 22 GW, a Alemanha 20 GW, a Coreia do Sul 17,5 GW, a Ucrânia

13 GW, o Canadá 12,6 GW, e o Reino Unido 11 GW. Em 2007 todos os reatores do mundo geraram 2608 TWh de eletricidade, o que é uma média de 300 GW, ou 1,2 kWh por dia por pessoa.

208 Os reatores super-regeneradores obtêm aproximadamente 60 vezes mais energia do urânio.

Fonte: www.world.nuclear.org/info/inf98.html. O Japão atualmente lidera no desenvolvimento de reatores super-regeneradores.

208 Uma estação de potência ciclo aberto de um gigawatt de potência consome 162 toneladas por ano de urânio.

Fonte: www.world.nuclear.org/info/inf03.html. Uma estação de 1 GW(e) com uma eficiência térmica de 33% operando a um fator de carga de 83% possui a seguinte pegada a montante: mineração - 16 600 toneladas de minério com 1% de urânio; moagem - 191 toneladas de óxido de urânio (contendo 162 toneladas de urânio natural); enriquecimento e fabricação de combustível - 22,4 toneladas de óxido de urânio (contendo 20 toneladas de urânio enriquecido). O enriquecimento necessita 115 000 UTS; veja a página 129 para o custo energético das UTS(unidades de trabalho para separação).

208 Foi estimado que o recurso de urânio de baixo-custo é mais do que 1000 vezes maior do que as 27 milhões de toneladas que nós assumimos. Deffeyes e MacGregor (1980) estimaram que o recurso de urânio em concentrações de 30 ppm ou mais é de 3×10^{10} tons. (O teor médio de minério processado na África do Sul em 1985 e 1990 foi 150 ppm. Fosfatos geralmente tem média de 100 ppm.)

Aqui está o que a Associação Nuclear Mundial disse no tópico sobre as reservas de urânio em junho de 2008:

"De tempos em tempos as preocupações são aumentadas de que as reservas conhecidas podem ser insuficientes quando julgadas como um múltiplo da atual taxa de uso. Mas esta é a falácia Limites do Crescimento... que não leva em conta a natureza muito limitada do conhecimento que nós temos em qualquer momento do que está realmente na crosta terrestre. O nosso conhecimento de geologia é tal que nós podemos ficar confiantes de que os recursos minerais identificados são uma pequena fração do que há lá fora.

"Recursos medidos de urânio, a quantidade que se sabe que são economicamente extraíveis dos minérios, são... dependentes da intensidade dos esforços de exploração passados, e são basicamente uma afirmação sobre o que é conhecido ao invés de o que está lá fora na crosta terrestre.

"Os recursos mundiais de urânio atualmente medidos (5,5 MT)... são o suficiente para durarem por mais de 80 anos. Isto representa um nível de certeza sobre esses recursos maior que para a maioria dos minerais. Mais explorações e maiores preços com certeza, com base no presente conhecimento geológico, irão gerar mais recursos, na medida que os atuais estejam sendo utilizados."

"Jogadores economicamente racionais investirão apenas em descobrir estas novas reservas quando eles tiverem quase certeza de que ganharão com elas, o que geralmente requer mensagens positivas de preço causadas por tendências de sub-fornecimento. Se o sistema econômico estiver funcionando corretamente e maximizando a eficiência de capital, nunca deve haver mais do que algumas décadas de reservas de qualquer recurso que seja uma *commodity* em qualquer momento".

[A exploração possui um custo; a exploração de urânio, por exemplo, possui um custo de \$1-\$1,50 por kg de urânio (\$3,4 MJ), o que são 2% do preço local de \$ 78/kgU; em contraste, os custos de encontrar petróleo puro têm uma média de \$ 6/barril (\$ 1050/MJ) (12% do preço à vista) por pelo menos nas três últimas décadas.

"Diferentemente dos metais que têm estado em demanda por séculos, a sociedade mal começou a utilizar o urânio. Houve apenas um ciclo de exploração-descoberta-produção, feito em grande parte pelos preços de pico do final da década de 1970.

"É muito cedo para falar sobre a segurança a longo termo do urânio quando toda a indústria nuclear é tão jovem que apenas um ciclo de reposição de recurso tenha sido necessária". www.world-nuclear.org/info/inf75/html.

Leitura complementar: Herring (2004); Price e Blaise (2002); Cohen (1983).

O projeto IPCC, citando o OECD, que nos níveis de utilização de 2004, o urânio e fosfatos em recursos naturais durariam 670 anos em reatores de ciclo

aberto, 20 000 anos em reatores super-regeneradores com plutônio, e 160 000 anos em reatores super-regeneradores com urânio e todos os actínides(Sims et al., 2007).

- 211 **Pesquisadores japoneses encontraram uma técnica para extrair urânio da água do mar.** O preço estimado de \$ 100 por kg é da Seko et al. (2003) e [y3wnzr]; a estimativa de \$300 por kg é da Agência de Energia Nuclear OECD (2006, p130). As técnicas de extração de urânio envolvem afundar tecidos no oceano por alguns meses; o tecido é feito de fibras de polímeros que ficam pegajosas ao serem irradiadas antes de serem afundadas; as fibras pegajosas coletam urânio na medida de 2g de urânio por quilograma de fibra.
- **O custo da extração de urânio poderia ser reduzida combinando-a com outro uso para a água do mar - por exemplo, refrigeração de estações de potência.** A ideia de uma ilha movida a energia nuclear produzindo hidrogênio foi lançada por C. Marchetti. Reatores reprodutores seriam refrigerados pela água do mar e extrairiam urânio da água de refrigeração a uma taxa de 600 toneladas de urânio por 500 000 Mt de água do mar.
- 212 **Reatores de tório fornecem 3,6 bilhões de kWh de calor por tonelada de tório.** Fonte: www.world-nuclear.org/info/inf62.html. Ainda há muito o que avançar na tecnologia dos reatores de tório, então este valor poderia ser aumentado no futuro.
- **Um reator nuclear alternativo para o tório, o "amplificador de energia"...** Veja Rubia et al. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/EA.html, [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].
 - **Recursos mundiais de tório em monazita.** Fonte: US Pesquisa Geológica, Resumos de Mercadoria Mineral, Janeiro de 1999. [y17tkm] Citado no Documento UIC Instruções sobre Questões Nucleares #67 de novembro de 2004.
"Outros minérios com maiores conteúdos de tório, tais como a torita, seriam melhores fontes se a demanda aumentasse significativamente." [yju4a4] omite os valores da Turquia, que são encontrados aqui [yeyr7z].
- 214 **A indústria nuclear vendeu para todos no Reino Unido 4 kWh/d por cerca de 25 anos.** O total gerado em 2006

- foi cerca de 2200 TWh. Fonte: Revisão Energética de Stephen Salter para o Partido Nacionalista Escocês.
- A autoridade de desativação nuclear possui um orçamento anual de £2 bilhões. De fato, este orçamento de limpeza parece aumentar e aumentar. O último valor para o custo total de desativação é de £73 bilhões. news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm.
 - 215 A crítica do Chefe Inspetor de Instalações Nucleares foi tímida... (Weightman, 2007).
 - A energia nuclear não é infinitamente perigosa. Ela é apenas perigosa. Leitura complementar sobre os riscos: Kammen e Hassenzahl (1999).
 - As pessoas na América que vivem perto de estações de potência alimentadas com carvão são expostas a maiores doses de radiação do que aquelas vivendo perto de estações de potência nucleares. Fonte: McBride et al. (1978). Urânio e tório possuem concentrações de aproximadamente 1 ppm e 2 ppm respectivamente no carvão.
Leitura complementar:
gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html,
www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.
.
 - A energia nuclear e a energia eólica possuem as menores taxas de morte. Veja também Jones (1984). Estas taxas de mortes são de estudos que estão prevendo o futuro. Nós também podemos olhar para o passado.
Na Grã-Bretanha, a energia nuclear gerou 200 GW ano de eletricidade, e a indústria teve uma fatalidade, um funcionário que morreu em Chapelcross em 1978 [4f2ekz]. Uma morte por 200 GWa é uma taxa de morte incrivelmente baixa se comparada com a indústria de combustíveis fósseis.
Mundialmente, a taxa histórica de mortes da energia nuclear é difícil de estimar. O colapso de Three Mile Island não matou ninguém, e os vazamentos associados ao evento são estimados a terem matado talvez uma pessoa desde o tempo do acidente. O acidente em Chernobyl matou inicialmente 62 pessoas que morreram diretamente pela exposição, e 15 pessoas locais que morreram mais tarde de câncer na tireóide; estima-se que nas proximidades, outros 4000 morreram de câncer, e que mundialmente, cerca de

5000 pessoas (entre as 7 milhões que foram expostas às partículas radioativas) morreram de câncer devido a Chernobyl (Williams e Baverstock, 2006); mas estas mortes são impossíveis de serem detectadas porque os cânceres, muitos deles causados pela radiação natural, já causam 25% das mortes na Europa.

Um modo de estimar a taxa global de mortes da energia nuclear mundialmente é dividir esta estimativa de mortes de Chernobyl (9000 mortes) pela produção acumulada de energia nuclear de 1969 a 1996, que foi 3685 GWa. Isto resulta em uma taxa de morte de 2,4 mortes por GWa.

Quanto a mortes atribuídas à energia eólica, o Fórum de Informações de Parques Eólicos Caithness www.caithnesswindfarms.co.uk lista 49 fatalidades ao redor do mundo de 1970 a 2007 (35 trabalhadores da indústria eólica e 14 membros do público). Em 2007, Paul Gipe listou 34 mortes no total ao redor do mundo [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. No meio da década de 1990 a taxa de mortalidade associada com a potência eólica foi de 3,5 mortes por GWa. De acordo com Paul Gipe, a taxa de mortalidade mundial da energia eólica caiu para 1,3 mortes por GWa no final de 2000.

Então as taxas de mortes históricas tanto da energia nuclear quanto eólica são maiores do que as taxas de mortes previstas para o futuro.

217 O aço e o concreto em uma estação de potência nuclear de 1 GW possui uma pegada de carbono de aproximadamente 300 000 tCO₂. Uma estação de potência de 1 GW contém 520 000 m³ de concreto (1,2 milhões de toneladas) e 67 000 toneladas de aço [2k8y7o]. Assumindo 240 kg de CO₂ por m³ de concreto [3pvf4j], a pegada de concreto é cerca de 10 000 t CO₂. Do Blue Scope Steel [4r7zpg], a pegada de aço é cerca de 2,5 toneladas de CO₂ por tonelada de aço. Então as 67 000 toneladas de aço possuem uma pegada de cerca de 170 000 toneladas de CO₂.

218 Discussão sobre resíduos nucleares. Fontes: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7].

Novos resíduos nucleares comparados com os antigos. Comitê de Gestão de Resíduos Radioativos (2006).

- Estima-se que as reservas mundiais de lítio sejam de 9,5 milhões de toneladas em depósitos de minério. As

principais fontes de lítio são encontradas na Bolívia (56,6%), no Chile (31,4%) e nos EUA (4,3%).
www.dnpm.gov.br.

- **Existe outra fonte de lítio: a água do mar...** Várias técnicas de extração foram investigadas (Steinberg e Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al. 2001).
- **O poder de fusão das reservas de lítio.**
A densidade de energia do lítio natural é cerca de 7500 kWh por grama (Ongena e Van Oost, 2006). Existe variação considerável entre as estimativas de quão eficientemente os reatores de fusão transformariam isto em eletricidade, variando de 310 kWh(e)/g (Eckhartt, 1995) para 3400 kWh(e)/g de lítio natural (Steinberg e Dang, 1975). Eu assumi 2300 kWh(e)/g baseado neste valor amplamente citado: "Uma usina de fusão de 1 GW utilizará cerca de 100 kg de deutério e 3 toneladas de lítio natural por ano, gerando cerca de 7 bilhões de kWh." [69vt8r], [6oby22], [63121p].

Leitura complementar sobre fissão: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Centro de Informação sobre Urânio - www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw].

Sobre custos: Zaleski (2005).

Sobre os depósitos de resíduos: [shrln].

25 Usar as renováveis de outros países?

Se o Mediterrâneo se transformar em uma área de cooperação ou confronto no século 21 ele será de importância estratégica para a nossa segurança comum.

Joschka Fischer, Ministro de Relações Exteriores alemão, fevereiro de 2004.

Nós descobrimos que é difícil parar de usar combustíveis fósseis vivendo através das nossas próprias renováveis. A energia nuclear possui os seus problemas também. Então o que mais podemos fazer? Bem, que tal vivermos das renováveis de outras pessoas? (Não que nós tenhamos qualquer direito sobre as renováveis de outras pessoas, é claro, mas talvez eles estejam interessados em vendê-las para nós.)

A maior parte dos recursos para viver sustentavelmente estão relacionados com a área de terra: se você quer usar painéis solares, você precisa de terra para instalá-los; se você quer plantar, você precisa de terra novamente. Jared Diamond, no seu livro *Colapso*, observa que enquanto muitos fatores contribuem para o colapso das civilizações, um fator comum de todos os colapsos é que a densidade humana fica muito grande.

Lugares como a Grã-Bretanha e a Europa estão em um pepino porque elas possuem grandes densidades populacionais, e todas as renováveis disponíveis são difusas - elas têm baixa densidade de potência (tabela 25.1). Ao procurar por ajuda, nós devemos procurar por países que possuam três coisas: *a)* baixa densidade populacional; *b)* grande área; *c)* um fornecimento de energias renováveis com grande densidade de potência.

POTÊNCIA POR UNIDADE DE ÁREA DE TERRA OU DE ÁGUA	
Vento	2 W/m ²
Vento marinho	3 W/m ²
Piscinas de marés	3 W/m ²
Linhas de marés	6 W/m ²
Painéis solares FV	5 – 20 W/m ²
Plantas	0,5 W/m ²
Água da chuva (terras altas)	0,24 W/m ²
Usina Hidrelétrica	11 W/m ²
Chaminé solar	0,1 W/m ²
Energia solar concentrada (deserto)	15 W/m ²

Tabela 25.1. Instalações de renováveis devem ser do tamanho de um país porque todas as renováveis são muito difusas.

Região	População	Área (km ²)	Densidade (pessoas por km ²)	Área por pessoa (m ²)
Líbia	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Cazaquistão	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Arábia Saudita	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Argélia	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Sudão	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Mundo	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Escócia	5 050 000	78 700	64	15 500
União Europeia	496 000 000	4 330 000	115	8 720
País de Gales	2 910 000	20 700	140	7 110
Reino Unido	59 500 000	244 000	243	4 110
Inglaterra	49 600 000	130 000	380	2630

Tabela 25.2. Algumas regiões, ordenadas de pequena a grande densidade populacional. Veja a p429 para mais densidades populacionais.

A tabela 25.2 ressalta alguns países que serviriam. A população da Líbia, por exemplo, é 70 vezes menor que a da Grã-Bretanha, e sua área é 7 vezes maior. Outros países com área grande e rica são o Cazaquistão, Arábia Saudita, Argélia e Sudão.

Em todos esses países, eu acho que a renovável mais promissora é a energia solar, a *energia solar de concentração* em particular, que utiliza espelhos ou lentes para focar a luz do sol. Estações de energia solar de concentração vêm em diversas formas, instalando seus espelhos móveis em diversas geometrias, e colocando várias tecnologias de conversão de energia no foco - motores Stirling, água pressurizada, ou sal derretido, por exemplo - mas todas elas fornecem médias de potência por unidade de área bastante similares, mais ou menos 15 W/m^2 .

Uma tecnologia que faz a diferença

"Toda a potência do mundo pode ser fornecida por um quadrado de 100 km por 100 km no Saara". Isto é verdade? A energia solar de concentração em desertos fornece uma potência média por unidade de área de terra de aproximadamente 15 W/m^2 . Então, se não fornecermos espaço para mais nada neste quadrado, a potência fornecida seria de 150 GW. Isto *não é* o mesmo que o atual consumo do mundo. Não é nem próximo do atual consumo mundial de *eletricidade*, que é de 2000 GW. O consumo de potência mundial atualmente é de 15 000 GW. Então a afirmação correta sobre o Saara é que o consumo atual de potência seria fornecido por um quadrado de *1000 km por 1000 km* no deserto, completamente preenchido com energia solar de concentração. Isto são quatro vezes a área do Reino Unido. E se nós estamos interessados em viver em um mundo equitativo, nós presumivelmente deveríamos mirar em fornecer mais do que o consumo *atual*. Para fornecer para todas as pessoas do mundo o consumo de potência de um europeu de classe média (125 kWh/d), a área necessária seria *dois* quadrados de 1000 km por 1000 km no deserto.

Por sorte, o Saara não é o único deserto, então talvez seja mais relevante cortar o mundo em regiões menores, e perguntar quanto de área é necessária no deserto de cada região. Então, focando na Europa, "quanto de área é necessária no Norte do Saara para fornecer para *todos na Europa e do norte da África* com um consumo de potência de um europeu de classe média? Assumindo-se que a população



Figura 25.3. Motor Stirling. Estes belos concentradores fornecem uma potência por unidade de terra de 14 W/m^2 . Foto cortesia do Sistema de Energia Stirling.



Figura 25.4. Andasol - uma estação de potência solar de "100 MW" em construção na Espanha. O excesso de energia térmica produzida durante o dia será armazenada em tanques de sal líquido por mais de sete horas, permitindo um fornecimento contínuo e estável de energia elétrica para a rede. Prevê-se que as estações de potência produzam 350 GWh por ano (40 MW). As calhas parabólicas ocupam 400 hectares, então a potência por unidade de terra será de 10 W/m^2 .

Foto superior: ABB. Foto inferior: IEA SolarPACES.

da Europa e do norte da África seja 1 bilhão, a área necessária é de 340 000 km², o que corresponde a um quadrado de **600 km por 600 km**. Esta área é igual a uma Alemanha, 1,4 Reinos Unidos, ou **16 Países de Gales**.

A parte do Reino Unido na divisão destes 16 Países de Gales seria de um País de Gales: um quadrado de 145 km por 145 km no Saara forneceria todo o consumo primário de energia atual do Reino Unido. Estes quadrados são mostrados na figura 25.5. Observe que enquanto o quadrado amarelo possa parecer "pequeno" se comparado com a África, ele possui a mesma área que a Alemanha.

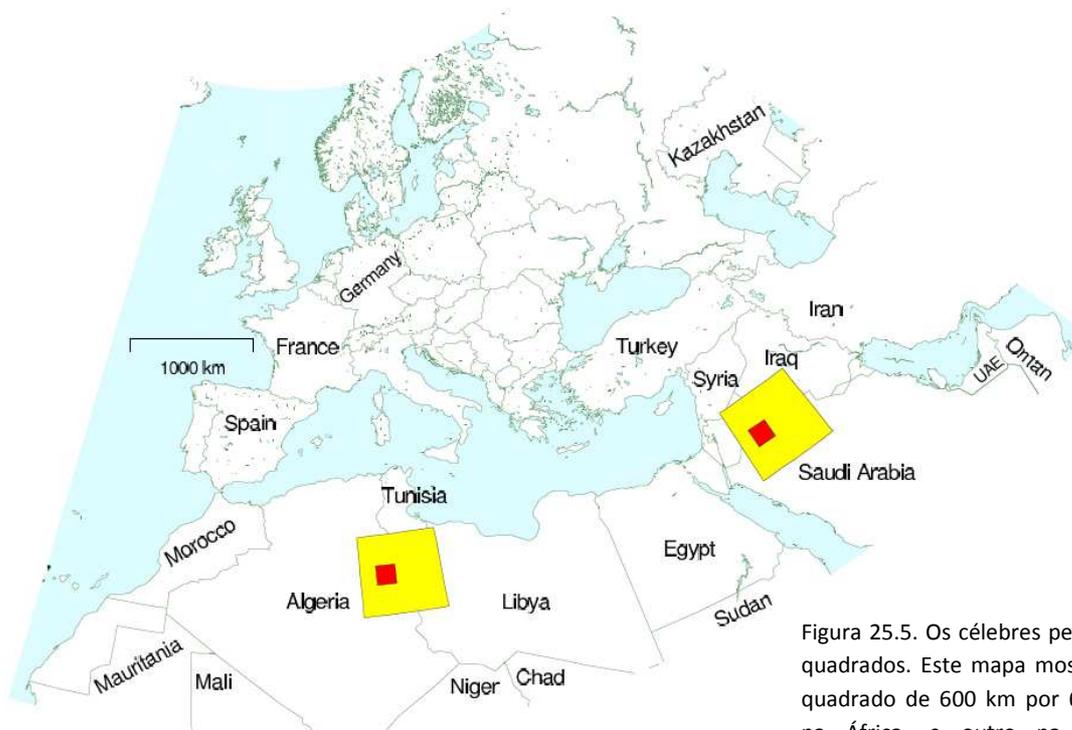


Figura 25.5. Os célebres pequenos quadrados. Este mapa mostra um quadrado de 600 km por 600 km na África, e outro na Arábia Saudita, Jordão e Iraque. Instalações de energia solar de concentração preenchendo um quadrado forneceriam potência suficiente para dar a 1 bilhão de pessoas o mesmo consumo energético de um europeu de classe média de 125 kWh/d. A área de um quadrado é a mesma da Alemanha, e 16 vezes a área do País de Gales. Dentro de cada grande quadrado há um menor de 145 km por 145 km mostrando a área necessária no Saara - um país de Gales- para fornecer toda a energia da Grã-Bretanha.

O plano DESERTEC

Uma organização chamada DESERTEC [www.desertec.org] está promovendo um plano para utilizar energia solar de concentração nos países ensolarados do Mediterrâneo, e linhas de transmissão de corrente contínua de alta voltagem (HVDC) (figura 25.7) para fornecer energia para as localidades mais nubladas do norte. A tecnologia HVDC está disponível desde 1954 para transmitir potência tanto através de linhas aéreas quanto por cabos submarinos (tal como o interconector entre a Inglaterra e a França). Ele já é utilizado para transmitir eletricidade por distâncias maiores do que 1000 km na África do Sul, China, Canadá, América, Brasil e Congo. Uma linha

típica de 500 kV pode transmitir uma potência de 2 GW. Algumas linhas HVDC no Brasil transmitem 6,3 GW.

HVDC é preferível sobre as linhas tradicionais AC porque nelas são necessários menos hardware físicos, menos área de terra, e as perdas de potência nos HVDC são menores. As perdas de potência em uma linha HVDC de 3500 km de comprimento, incluindo a conversão de AD para DC, é de cerca de 15%. Uma outra vantagem dos sistemas HVDC é que eles ajudam a estabilizar as redes elétricas nas quais estão conectados.

Nos planos DESERTIC, as primeiras áreas a serem exploradas são as áreas costeiras, porque as estações de potência solar de concentração que estão próximas ao mar podem fornecer água dessalinizada como um subproduto - valiosa para o uso humano e para a agricultura.

A tabela 25.6 mostra as estimativas da DESERTEC para o potencial de potência que poderia ser produzida em países na Europa e no norte da África. O "potencial econômico" faz mais do que suficiente para fornecer 125 kWh por dia para 1 bilhão de pessoas. O "potencial costeiro" total é o suficiente para fornecer 16 kWh por dia por pessoa para 1 bilhão de pessoas.

País	Potencial Econômico (TWh/a)	Potencial costeiro (TWh/a)
Argélia	169 000	60
Líbia	140 000	500
Arábia Saudita	125 000	2 000
Egito	74 000	500
Iraque	29 000	60
Marrocos	20 000	300
Omã	19 000	500
Síria	10 000	0
Tunísia	9 200	350
Jordânia	6 400	0
Iêmen	5 100	390
Israel	3 100	1
Emirados Árabes Unidos	2 000	540
Kuwait	1 500	130
Espanha	1 300	70
Catar	800	320
Portugal	140	7
Turquia	130	12
Total	620 000 (70 000 GW)	6 000 (650 GW)

Tabela 25.6. Potencial solar para geração de energia nos países em volta e perto da Europa. O "potencial econômico" é a potência que poderia ser gerada em locais adequados onde a irradiância normal é maior do que 2000 kWh/m²/a.

O "potencial costeiro" é a potência que poderia ser gerada a 20m (vertical) do nível do mar; tal potência é especialmente promissora por causa da combinação potencial com a dessalinização.

Por comparação, a potência total necessária para fornecer 125 kWh por dia para 1 bilhão de pessoas é 46 000 TWh/ano (5 200 GW). 6000 TWh/a (650 GW) são 16 kWh por dia por pessoa para 1 bilhão de pessoas.

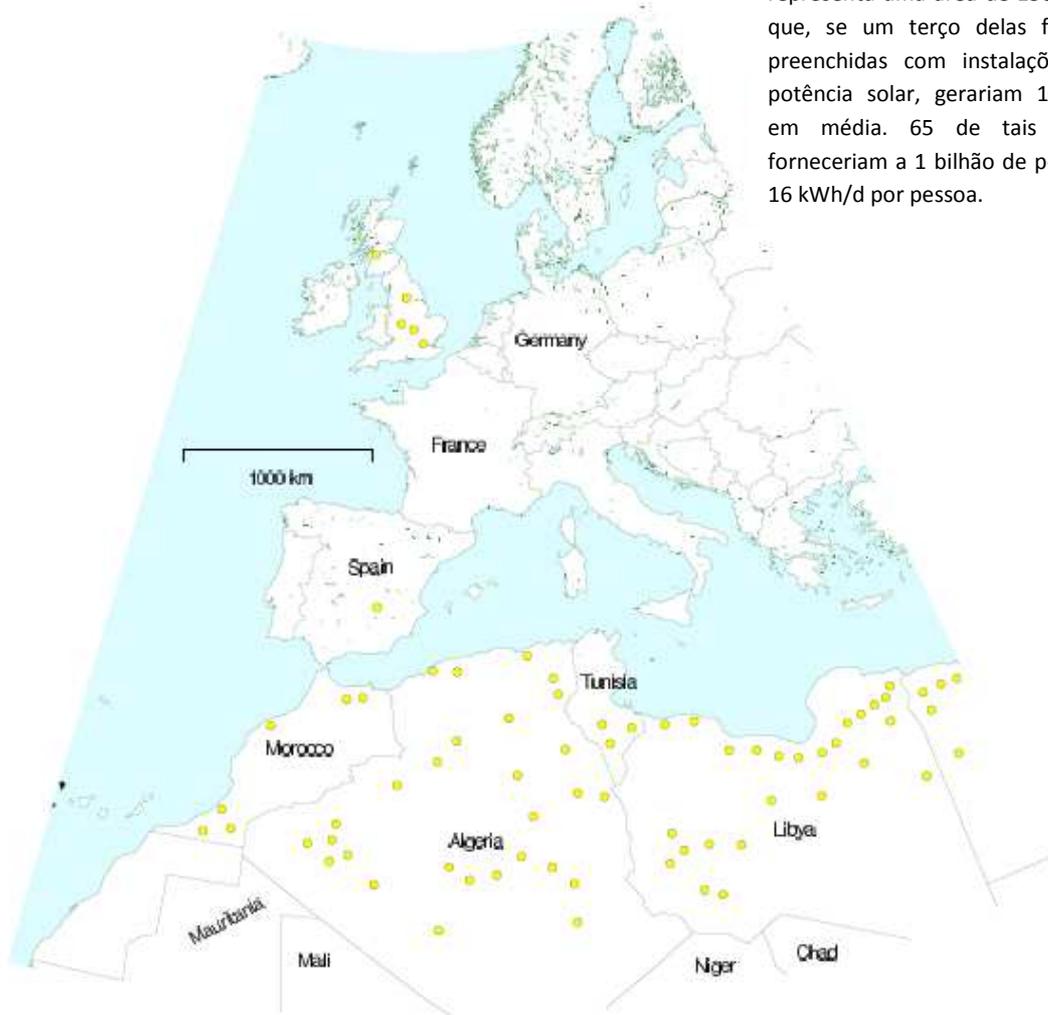
Vamos tentar transmitir em um mapa o que um plano realístico pareceria. Imagine fazer instalações solares cada uma tendo uma área de 1500 km² - isto é

aproximadamente o tamanho de Londres. (A Grande Londres possui uma área de 1580 km²; o orbital em torno de Londres do M25 abrange uma área de 2300 km².) Vamos chamar cada instalação de uma *gota*. Imagine que em cada uma dessas gotas, metade da área é usada com as estações de concentração de potência com uma densidade de potência média de 15 W/m², deixando espaço em volta para a agricultura, edificações, ferrovias, estradas, linhas de encanamentos, e cabos. Permitindo-se uma perda de 10% na transmissão entre a gota e o consumidor, cada uma dessas gotas gera uma potência de média de 10 GW. A figura 25.8 mostra algumas gotas em escala no mapa. Para dar uma noção de escala para estas gotas, eu coloquei algumas na Grã-Bretanha também. *Quatro* destas gotas teriam uma produção aproximadamente igual ao consumo total de eletricidade da Grã-Bretanha (16 kWh/d por pessoa para 60 milhões de pessoas). *Sessenta e cinco* gotas alimentariam todas as 1 bilhão de pessoas na Europa e o norte da África com 16 kWh/d por pessoa. A figura 25.8 mostra 68 gotas no deserto.



Figura 25.7. Colocando uma linha de alta tensão entre a Finlândia e a Estônia. Um par destes cabos transmite uma potência de 350 MW. Foto: ABB.

Figura 25.8. Cada gota circular representa uma área de 1500 km² que, se um terço delas fossem preenchidas com instalações de potência solar, gerariam 10 GW em média. 65 de tais gotas forneceriam a 1 bilhão de pessoas 16 kWh/d por pessoa.



Fotovoltaicas com concentração

Uma alternativa para a concentração de energia solar térmica nos desertos são os sistemas de ampla escala de concentração fotovoltaicos. Para produzir estes, nós chapeamos uma célula solar produtora de energia de alta-qualidade no foco de lentes ou espelhos baratos. Faiman et al. (2007) disse que "solar, na sua variedade de concentradores fotovoltaicos, pode ser completamente competitiva em termos de custos com os combustíveis fósseis [em estados com desertos, tais como Califórnia, Arizona, New Mexico, e Texas] sem a necessidade de qualquer tipo de subsídio".

De acordo com os fabricantes Amonix, esta forma de energia solar concentrada teria uma potência média por unidade de área de 18 W/m^2 .

Outro modo de ter uma noção do hardware necessário é personalizar. Um dos coletores de "25 kW" de pico mostrados na figura 25.9 gera em média cerca de 138 kWh por dia; o estilo de vida norte-americano atualmente consome 250 kWh por dia por pessoa. Então para fazer com que os EUA parem de utilizar combustíveis fósseis com a energia solar, nós precisaríamos de aproximadamente dois destes coletores de $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ por pessoa.

Dúvidas

Eu estou confuso! No Capítulo 6 você disse que os melhores painéis fotovoltaicos fornecem 20 W/m^2 em média, em uma localidade com a luminosidade da Grã-Bretanha. Presumivelmente no deserto os mesmos painéis forneceriam 40 W/m^2 . Então como é que as estações de potência de energia solar concentrada fornecem apenas $15\text{-}20 \text{ W/m}^2$? Com certeza a energia concentrada seria ainda melhor do que a de painéis planos?

Boa pergunta. A resposta curta é não. A energia solar concentrada não atinge uma melhor potência por unidade de área de terra do que os painéis planos. A engenhoca de concentração tem que acompanhar o sol, de outra forma a luz do sol não estará devidamente focada; uma vez que você comece a instalar na terra as engenhocas que tentam acompanhar o sol, você tem que deixar espaços entre elas; muito da luminosidade do sol cai nestes espaços e é perdida. A razão pela qual as pessoas, no entanto, fazem sistemas de energia solar concentrada, atualmente, é que os painéis



Figura 25.9. Um concentrador fotovoltaico de 25 kW (pico) produzido pela companhia californiana Amonix. Seus 225 m^2 de abertura contém 5760 lentes Fresnel com concentração óptica de $\times 260$, cada uma das quais ilumina uma célula de silício de 25% de eficiência. Um destes coletores, em uma localização apropriada de deserto, gera 138 kWh por dia - o suficiente para cobrir o consumo energético da metade de um americano. Observe a escala de fornecimento humana.

Foto de David Faiman.

fotovoltaicos são muito caros e os sistemas de concentração são mais baratos. O objetivo das pessoas dos sistemas de concentração não é produzir sistemas com maior potência por unidade de área de terra. A área de terra é barata (eles acham). O objetivo é produzir grande quantidade de potência por dólar.

Mas se painéis planos possuem maior densidade de potência, por que você não descreve cobrir o deserto do Saara com eles?

Porque eu estou tentando discutir opções práticas para produção de potência sustentável em larga escala para a Europa e o norte da África para 2050. Meu palpite é que por volta de 2050, os espelhos ainda serão mais baratos do que os painéis fotovoltaicos, então a energia solar de concentração é a tecnologia na qual nós devemos nos focar.

E as chaminés solares?

Uma chaminé solar ou uma torre de usina de vento ascendente utiliza a potência solar de uma forma muito simples. Uma grande chaminé é construída no centro de uma área coberta por um telhado transparente coberto de vidro ou plástico; como o ar quente sobe, o ar quente criado neste coletor de calor parecido com uma estufa sobe pela chaminé, mandando para dentro ar frio a partir do perímetro do coletor de calor. Potência é extraída do fluxo de ar por turbinas na base da chaminé. Chaminés solares são bastante simples de serem construídas, mas elas não fornecem uma potência muito impressionante por unidade de área. Uma planta piloto em Mazanares, na Espanha, operou por sete anos, entre 1982 e 1989. A chaminé tinha uma altura de 195 m e diâmetro de 10 m; o coletor tinha um diâmetro de 240 m, e o seu telhado possuía 6000 m² de vidro e 40 000 m² de plástico transparente. Ela gerou 44 MWh por ano, o que corresponde a uma potência por unidade de área de 0,1 W/m². Teoricamente, quanto maior o coletor e quanto maior a altura da torre, maior a densidade de potência de uma chaminé solar. Os engenheiros por trás da Manazares reconheceram que, em um local com uma radiação solar de 2300 kWh/m² por ano (262 W/m²), com uma torre de 1000 m de altura cercado por um coletor de 7 km de diâmetro poderia gerar 680 GWh por ano, uma potência média de 78 MW. Isto é uma potência por unidade de área de 1,6 W/m², que é similar à potência por unidade de área dos parques eólicos na Grã-Bretanha, e um décimo da potência por unidade de área que eu disse que as estações de potência solar concentrada podem fornecer. Afirma-se que as chaminés



Figura 25.10. O protótipo de chaminé solar Manzanares. Fotos de solarmillennium.de.

solares poderiam gerar eletricidade a um preço similar ao das estações de potência convencionais. Eu sugiro que países que possuem terra e luz do sol suficientes para gastar deveriam fazer um grande concurso entre as chaminés solares e a energia solar concentrada, a ser financiados pelos países produtores e países que consomem petróleo.

E que tal conseguir energia da Islândia, onde a energia geotérmica e hidroeletricidade são tão abundantes?

De fato, a Islândia já exporta de maneira efetiva energia ao alimentar indústrias que fazem produtos intensivos em energia. A Islândia produz aproximadamente uma tonelada de alumínio por cidadão por ano, por exemplo! Então do ponto de vista da Islândia, existem grandes lucros a serem feitos. Mas a Islândia poderia salvar a Europa? Eu ficaria surpreso se a produção de energia da Islândia pudesse ser aumentada de forma a fazer exportações de eletricidade de tamanho suficiente mesmo que fosse apenas para a Grã-Bretanha. Como uma referência, vamos comparar com o Inter-conector Inglaterra - França, que pode fornecer até 2 GW pelo Canal Inglês. A potência máxima é equivalente a 0,8 kWh por dia por pessoa no Reino Unido, aproximadamente 5% do consumo médio britânico de eletricidade. A média de geração de eletricidade geotérmica da Islândia é apenas 0,3 GW, o que é menor do que 1% da média de consumo de eletricidade britânico. A produção média de eletricidade da Islândia é 1,1 GW. Então para criar um link de envio de energia com uma capacidade igual ao do conector francês, a Islândia teria que *triplicar* sua produção de eletricidade. Para nos alimentar com 4 kWh por dia por pessoa (aproximadamente o que a Grã-Bretanha obtém das suas próprias estações nucleares), a produção de eletricidade da Islândia teria que aumentar *dez vezes*. Provavelmente é uma boa ideia construir inter-conectores para a Islândia, mas não espere que eles forneçam mais do que uma pequena contribuição.



Figura 25.12. Dois engenheiros montando uma estação de potência de concentração eSolar utilizando heliostatos (espelhos que giram suas pontas para seguir o sol). eSolar.com produz estações de potência de média escala: uma unidade de potência de 33 MW (pico) em um local de 64 hectares. Isto são 51 W/m² de pico, então eu suporia que numa localidade típica de deserto eles forneceriam um quarto disto: 13 W/m².

Observações e Leitura Complementar

N pg

230 Energia solar de concentração nos desertos fornece em média uma potência por unidade de área de 15 W/m² aproximadamente. As minhas fontes para este número são duas companhias que produzem energia solar de concentração para desertos.

www.stirlingenergy.com diz que um dos seus pratos com um motor Stirling de 25 kW no seu foco pode gerar 60 000 kWh/a em uma localidade favorável de deserto. Eles podem ser juntados a uma concentração de um prato por 500 m². Isto é uma média de potência de 14 W/m². Eles dizem que o prato solar Stirling produz o melhor uso de área de terra, em termos de energia fornecida.

www.ausra.com utiliza espelhos planos para aquecer água a 285 °C e mover uma turbina a vapor. A água aquecida e pressurizada pode ser armazenada em profundas cavernas de metal alinhado para permitir a geração de energia à noite. Descrevendo uma planta de "240 MW(e)" proposta para a Austrália (Mills e Lièvre, 2004), os designers alegam que 3,5 km² de espelhos forneceriam 1,2 TWh(e); isto são 38 W/m² de espelho. Para descobrir a potência por unidade de área de terra nós precisamos considerar os espaços entre os espelhos. Ausra diz que eles precisam de um quadrado de 153 km por 153 km no deserto para fornecer toda a energia elétrica dos EUA (Mills e Morgan, 2008). A eletricidade total dos EUA é 3600 TWh/a, então eles estão reivindicando uma potência por unidade de área de terra de 18 W/m². Esta tecnologia atende pelo nome de *fresnel linear refletor compacto* (Mills e Morrison, 2000; Mills et al., 2004; Mills e Morgan, 2008). Incidentalmente, ao invés de "energia solar de concentração", a companhia Ausra prefere usar o termo *eletricidade solar térmica* (STE); eles enfatizam os benefícios do armazenamento térmico, em contraste com as fotovoltaicas de concentração, que não vêm com uma opção de armazenamento.

Trieb e Knies (2004), que são fortes proponentes da energia solar de concentração, projetam que as tecnologias alternativas de concentração solar terão potências por unidade de área de terra nos seguintes valores: calhas parabólicas, 14-19 W/m²; coletor fresnel linear, 19-28 W/m²; torre com heliostatos, 9-14 W/m²; pratos Stirling, 9-14 W/m².

Existem três plantas de demonstração na Europa para a energia solar de concentração. Andasol - utilizando calhas parabólicas; Solúcar PS10, uma torre perto de Sevilha; e Solartres, uma torre utilizando sal derretido para o armazenamento de calor. Prevê-se que o



Figura 25.13. Um sistema DC de alta potência na China. Foto ABB.

sistema de calhas parabólicas da Andasol mostrado na figura 25.4 forneça 10 W/m^2 . A torre solar de "11 MW" da Solúcar possui 624 espelhos, cada um com 121 m^2 . Os espelhos concentram luz solar a uma densidade de radiação de até 650 kW/m^2 . Os receptores recebem uma potência de pico de 55 MW. A estação de potência pode armazenar 20 MWh de energia térmica, permitindo que ela continue funcionando por 50 minutos de tempo nublado. Esperava-se que ela gerasse 24,2 GW de eletricidade por ano, e ela ocupa 55 hectares. Isto é uma potência média por unidade de área de terra de 5 W/m^2 . (Fonte: Boletim Anual Abengoa 2003.) Solartres ocuparão 142 hectares e espera-se que produza 96,4 GWh por ano; isto é uma densidade de potência de 8 W/m^2 . Andasol e Solartres usarão um pouco de gás natural nas suas operações

231 HVDC já é utilizado para transmitir eletricidade por distâncias maiores do que 1000 km na África do Sul, China, Canadá, América, Brasil e Congo. Fontes: Asplund (2004), Bahram e Johnson (2007). Leitura complementar sobre HVDC: Carlsson (2002).

234 De acordo com os fabricantes da Amonix, fotovoltaica de concentração teriam uma potência média por unidade de área de terra de 18 W/m^2 . As suposições do www.amonix.com são: as lentes transmitem 85% da luz; 32% de eficiência das células; 25% de eficiência do coletor; e 10% a mais de perdas devido ao sombreamento. Razão de abertura/terra de 1/3. Irradiância direta normal: $2222 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$. Eles esperam que cada kW da capacidade de potência forneça 2000 kWh/a (uma média de 0,23 kW). Uma planta de 1 GW de capacidade de pico ocuparia 12 km^2 de terra e forneceria 2000 GWh por ano. Isto são 18 W/m^2 .

- Chaminés solares. Fontes: Schlaich J (2001); Schlaich et al., (2005); Dennis (2006), www.enviromission.com.au, www.solarairpower.com.

236 A média de geração de eletricidade geotérmica da Islândia é apenas 0,3 GW. A produção média de eletricidade da Islândia é 1,1 GW. Estas são estatísticas para 2006: 7,3 TWh de hidroeletricidade e 2,6 TWh de eletricidade geotérmica, com capacidades de 1,16 GW e 0,42 GW, respectivamente. Fonte: Autoridade Nacional de Energia Orkustofnun [www.os.is/page/energystatistics].

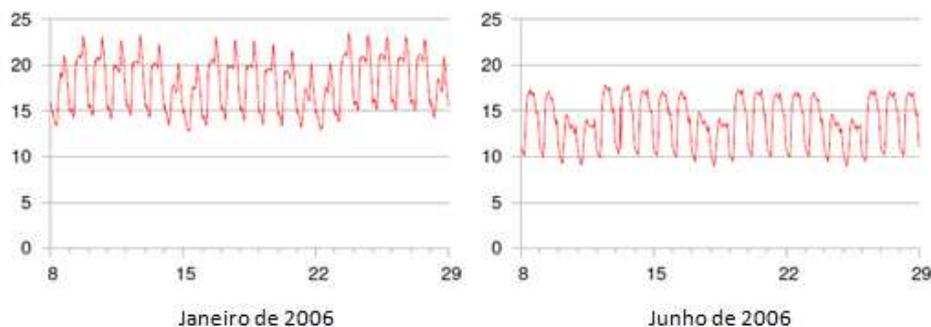
Leitura complementar: Comissão Europeia (2007), Centro Aeroespacial Alemão (DLR) Instituto de Termodinâmica Técnica Seção de Análise e Avaliação de Sistemas e Tecnologia³⁰ (2006), www.solarmillennium.de.

³⁰ No original, German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment (2006)

26 Flutuações e armazenamento

O vento, como uma força motriz direta, é totalmente inaplicável a um sistema de trabalho mecânico, uma vez que durante um período de calmaria todo o negócio do país funcionaria adequadamente. Antes da era dos motores a vapor, tentava-se usar moinhos de vento para drenar minas; apesar de serem máquinas poderosas, elas eram muito irregulares, de modo que em longos períodos de tempo calmo as minas eram inundadas, e todos os trabalhadores ficavam ociosos.

William Stanley Jevons, 1865.



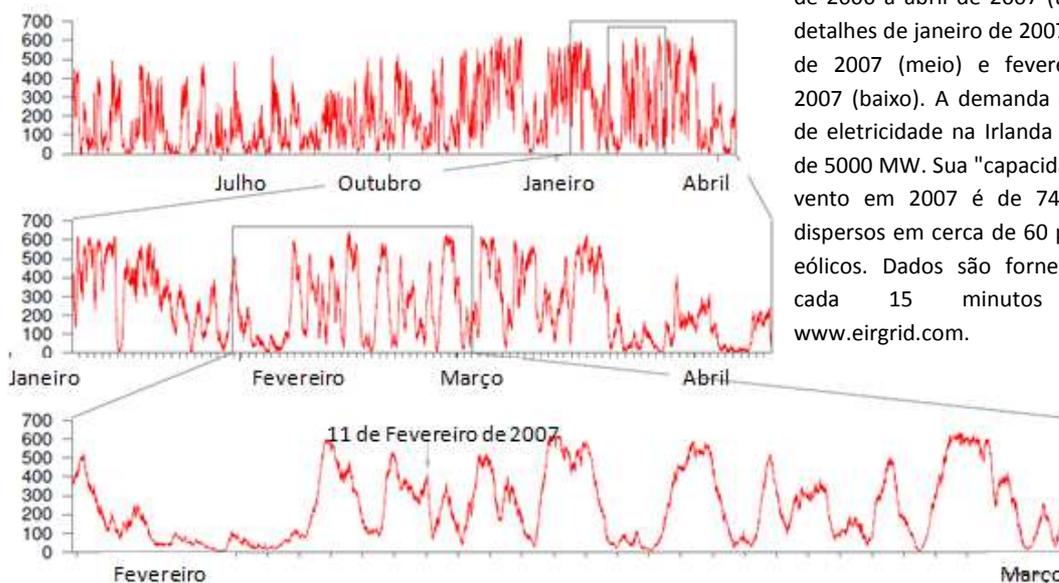
Se nós jogarmos os combustíveis fósseis fora e utilizarmos apenas renováveis, *ou* nos alimentarmos apenas de nuclear, *ou* uma mistura das duas, nós podemos ter um problema. A grande maioria das renováveis não são ligáveis e desligáveis. Quando o vento sopra e o sol aparece, a energia está lá para ser gerada; mas talvez duas horas mais tarde, ela não esteja mais disponível. As estações de potência nucleares também não são projetadas para serem ligadas e desligadas. Elas geralmente estão ligadas o tempo todo, e a potência gerada por elas pode apenas ser reduzida ou aumentada por uma escala de tempo de horas. Isto é um problema porque, na rede de eletricidade, o consumo e a produção devem ser exatamente o mesmo o tempo todo. A rede de eletricidade não pode *armazenar* energia. Para ter um plano energético que funcione todo minuto de todos os dias, nós precisamos de *algo que seja fácil de ligar e desligar*. Comumente se assume que este algo fácil de ligar e desligar seja uma *fonte* de potência que seja desligada e ligada para compensar as flutuações de fornecimento relativas à demanda (por exemplo, uma estação de potência de combustível fóssil!). Mas outro

Figura 26.1 A demanda de eletricidade na Grã-Bretanha (em kWh/d por pessoa) durante duas semanas de inverno e duas semanas de verão de 2006. Os picos em Janeiro são às 18h de cada dia. Os cinco dias-úteis de cada semana são evidentes durante o verão e o inverno. (Se você quiser obter a demanda nacional em GW, lembre-se do topo da escala, 24 kWh/d por pessoa, é o mesmo que 60 GW por Reino Unido.

modo efetivo de combinar fornecimento e demanda seria ter uma *demanda* de potência facilmente ligada e desligada - um dissipador de energia que pode ser desligado num piscar de olhos.

De qualquer modo, a coisa facilmente ligada e desligada precisa ser algo *grande* já que a demanda de eletricidade varia bastante (figura 26.1). A demanda algumas vezes muda significativamente em uma escala de tempo de alguns minutos. Este capítulo discute como trabalhar com as flutuações no fornecimento e demanda, sem a utilização de combustíveis fósseis.

Figura 26.2. Total de saída, em MW, de todos os parques eólicos da República da Irlanda, de abril de 2006 a abril de 2007 (topo), e detalhes de janeiro de 2007 a abril de 2007 (meio) e fevereiro de 2007 (baixo). A demanda de pico de eletricidade na Irlanda é cerca de 5000 MW. Sua "capacidade" de vento em 2007 é de 745 MW, dispersos em cerca de 60 parques eólicos. Dados são fornecidos a cada 15 minutos pelo www.eirgrid.com.



Quanto as renováveis variam?

Por mais que nós amemos as renováveis, nós não podemos nos enganar sobre o fato de que o vento realmente varia.

Críticos da energia eólica podem dizer: "A energia eólica é intermitente e imprevisível, então ela não pode fazer nenhuma contribuição para a segurança de fornecimento; se nós criarmos muita energia eólica, nós teremos que manter muitas usinas de combustíveis fósseis para substituir o vento quando ele parar". Manchetes tais como "Queda do vento causa emergência na rede elétrica do Texas" reforçam esse ponto de vista. Apoiadores da energia eólica minimizam este problema: "Não se preocupe - parques eólicos *individuais* podem ser intermitentes, mas ao juntar todos, a *soma* de todos os parques eólicos em localidades diferentes é muito menos intermitente."

Vamos olhar para dados reais e tentar chegar em um ponto de vista balanceado. A figura 26.2 mostra a saída de vento somada da frota da República da Irlanda de abril de 2006 a abril de 2007. Claramente, o vento é intermitente, mesmo se nós adicionarmos várias turbinas cobrindo o país inteiro. O Reino Unido é um pouco mais largo do que a Irlanda, mas o mesmo problema acontece aqui também. Entre outubro de 2006 e fevereiro de 2007 houve 17 dias quando as saídas das 1632 turbinas eólicas da Grã-Bretanha foram menores do que 10% das suas capacidades. Durante este período, houve cinco dias onde a saída foi menor do que 5% e um dia onde ela foi apenas 2%.

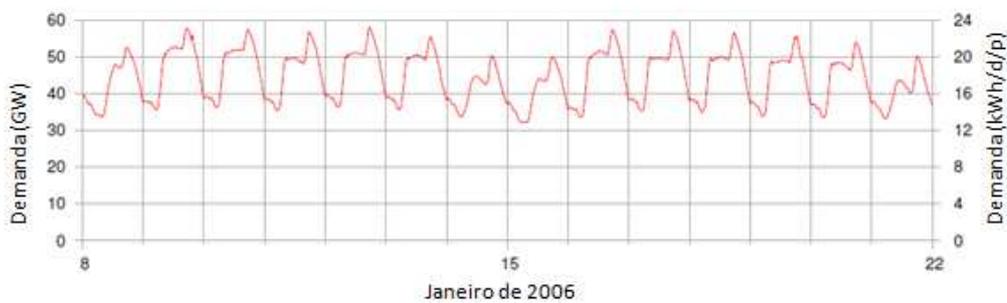


Figura 26.3. Demanda de eletricidade na Grã-Bretanha durante duas semanas de inverno em 2006. As escalas da direita e da esquerda mostram a demanda em unidades nacionais (GW) e pessoais (kWh/d por pessoa) respectivamente. Estes são os mesmos dados que os da figura 26.1.

Vamos quantificar as flutuações na energia eólica no país. As duas questões são mudanças de curto-período, e calmarias de longo prazo. Vamos encontrar a alteração de curto-período mais rápida em um mês dos dados da Irlanda. Em 11 de fevereiro de 2007, a potência eólica irlandesa caiu firmemente de 415 MW à meia-noite para 79 MW às 4 horas da manhã. Isto é uma taxa de variação de 84 MW por hora para um frota com capacidade para todo o país de 745 MW. (Por taxa de variação eu quero dizer taxa na qual a potência fornecida caiu ou aumentou - o declive do gráfico em 11 de fevereiro.) Ok: se nós escalarmos a potência eólica britânica até a capacidade de 33 GW (de modo que ela forneça 10 GW em média), nós podemos esperar ter ocasionais taxas de variação de

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33\,000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3700 \text{ Mw/h},$$

assumindo-se que a Grã-Bretanha seja igual à Irlanda. Então nós precisamos estar aptos tanto a *aumentar a potência* para as substituições de vento a uma taxa de 3,7 GW por hora - isto são 4 estações de potência nucleares indo de nenhuma potência para potência total a cada hora, digamos - *ou* nós

precisamos ser capazes de subitamente ser capazes de *diminuir* a nossa *demand*a a uma taxa de 3,7 GW por hora.

Estas demandas de vento poderiam ser atingidas? Para responder essa pergunta nós precisaremos falar mais sobre "gigawatts". Gigawatts são grandes unidades de potência para o tamanho de um país. Eles são para um país o que um quilowatt-hora-por-dia é para uma pessoa: uma unidade bem conveniente. O consumo médio de eletricidade do Reino Unido é 40 GW. Nós podemos relacionar esse número nacional com o consumo pessoal: 1 kWh por dia por pessoa é equivalente a 2,5 GW nacionalmente. Então se cada pessoa consome 16 kWh por dia de eletricidade, o consumo nacional será então de 40 GW.

Uma taxa de variação de 4 GW por hora é completamente incomum para a população humana? Não. Toda manhã, como a figura 26.3 mostra, a demanda da Grã-Bretanha aumenta aproximadamente 13 GW entre 6h30 e 8h30 da manhã. Isto é uma pequena taxa de 6,5 GW por hora. Então os nossos engenheiros de potência já lidam, todos os dias, com taxas de variação levemente maiores do que 4 GW por hora na nossa rede nacional. Uma taxa de variação extra ocasional de 4 GW por hora induzida pelas repentinas variações do vento não é uma causa razoável para descartar a ideia de parques eólicos para o país. É um problema do mesmo tipo que os problemas que os engenheiros já solucionaram. Nós simplesmente precisamos descobrir como combinar toda mudança de fornecimento e demanda em uma rede sem combustíveis fósseis. Eu não estou dizendo que o problema de variação do vento *já está* resolvido - apenas de que é um problema do mesmo tamanho que os outros problemas que já foram resolvidos.

Ok, antes de nós começarmos a pensar nas soluções, nós precisamos quantificar o outro problema do vento: calmarias de longa duração. No início de fevereiro de 2007, a Irlanda teve uma calmaria de escala nacional que durou cinco dias. Este não foi um evento fora do comum, como você pode ver na figura 26.2. Calmarias que duram 2 ou 3 dias acontecem várias vezes ao longo do ano.

Existem duas maneiras de sobreviver às calmarias. Ou nós podemos armazenar energia em algum lugar antes da calmaria, ou nós precisaremos encontrar um modo de reduzir a demanda durante os períodos de calmaria. (Ou uma combinação das duas.) Se nós temos 33 GW de turbinas eólicas fornecendo uma potência média de 10 GW então a quantidade

de energia que nós precisamos armazenar em adiantado para usar durante uma calmaria de cinco dias é

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh.}$$

(O gigawatt-hora (GWh) é a unidade de energia fofinha para países. O consumo de eletricidade da Grã-Bretanha é aproximadamente 1000 GWh por dia.)

Para personalizar essa quantidade, um armazenador de energia de 1200 GWh para a nação é equivalente a um armazenador de energia de 20 kWh por pessoa. Tal armazenador de energia permitiria que a nação ficasse sem 10 GW de geração de eletricidade por 5 dias; ou equivalentemente, que cada indivíduo ficasse sem produzir 4 kWh de eletricidade por 5 dias.

Lidando com calmarias e flutuações

Nós precisamos resolver dois problemas - calmarias (longos períodos com pouca produção de energia renovável), e flutuações (mudanças de pequenos períodos tanto no fornecimento quanto na demanda). Nós quantificamos estes problemas, assumindo que a Grã-Bretanha tinha aproximadamente 33 GW de potência eólica. Para lidar com a calmaria, nós devemos armazenar de forma efetiva aproximadamente 1200 GWh de energia (20 kWh por pessoa). A taxa de variação com a qual nós devemos lidar é de **6,5 GW por hora** (ou 0,1 kW por hora por pessoa).

Existem duas soluções, ambas podendo ser aumentadas para resolver estes problemas. A primeira solução é uma solução centralizada, e a segunda é descentralizada. A primeira solução armazena energia, e então lida com as flutuações ligando e desligando uma *fonte* alimentada do armazenamento de energia. A segunda solução funciona ligando e deslizando um pedaço da *demanda*.

A primeira solução é o *armazenamento bombeado*. A segunda usa as baterias dos veículos elétricos que nós discutimos no Capítulo 20. Antes de eu descrever estas soluções, vamos discutir algumas outras ideias para lidar com as flutuações.

Outras formas de oferta para lidar com as flutuações

Algumas das renováveis são ligáveis e desligáveis. Se nós tivéssemos muita energia renovável que pudesse ser ligada e desligada facilmente, todos os problemas deste capítulo sumiriam. Países como a Noruega e a Suécia possuem amplos e profundos fornecimentos de hidroeletricidade que eles podem ligar e desligar. Quais podem ser as opções para a Grã-Bretanha?

Em primeiro lugar, a Grã-Bretanha poderia ter muitos incineradores de lixo e de biomassa - estações de potência ocupando o papel que atualmente é ocupado pelas estações de potência de combustíveis fósseis. Se estas estações fossem projetadas para serem ligadas e desligadas, isto implicaria em custos, da mesma forma que há custos quando temos estações de potência de combustíveis fósseis extras que trabalham apenas em meio-período: em alguns momentos seus geradores ficariam inativos e em outros trabalhariam duas vezes mais do que o normal; e a maioria dos geradores não são tão eficientes se você ficar ligando-os e desligando-os, comparados com trabalhar com eles em velocidade constante. Ok, deixando os custos de lado, a questão crucial é qual o tamanho do recurso que pode ser ligado e desligado deverá ter. Se todo o lixo municipal fosse incinerado, então a potência média destes recursos seria de cerca de 3 GW. Se nós construirmos capacidade igual a *duas vezes* esta potência, produzindo incineradores capazes de fornecer 6 GW, e então planejando que a operação deles seja apenas em meio-período, eles seriam capazes de fornecer 6 GW nos períodos de alta demanda, e então zero nas horas da madrugada. Estas estações de potência poderiam ser projetadas para ligar ou desligar dentro de uma hora, lidando então com as taxas de variação de 6 GW por hora - mas apenas para uma taxa de variação máxima de 6 GW! Esta é uma contribuição útil, mas não o suficiente para a taxa de variação em si, se nós formos lidar com as flutuações de 33 GW de vento.

E a hidroeletricidade? As estações de hidroeletricidade da Grã-Bretanha possuem um fator de carga médio de 20% então eles certamente possuem o potencial de serem ligados e desligados. Além disso, a hidroeletricidade possui a maravilhosa característica de que ela pode ser ligada e desligada rapidamente. Glendoe, uma nova estação hidrelétrica com uma capacidade de 100 MW, será capaz de

ser ligada em um apenas 30 segundos, por exemplo. Isto é uma taxa de variação de 12 GW por hora em apenas uma estação de potência! Então uma frota suficientemente larga de estações de potência hidrelétricas deve ser suficiente para lidar com as flutuações introduzidas pelos enormes parques eólicos. Contudo, a capacidade da frota hidrelétrica da Grã-Bretanha *não* é atualmente grande o suficiente para fazer uma grande contribuição no nosso problema de flutuações (assumindo que nós queremos lidar com a rápida perda de digamos 10 ou 33 GW de potência eólica). A capacidade total das estações hidrelétricas na Grã-Bretanha é de apenas 1,5 GW.

Então apenas ligar e desligar outras fontes de potência renováveis não funcionará para a Grã-Bretanha. Nós precisamos de outras soluções.

Armazenamento bombeado

Sistemas de armazenamento bombeado utilizam eletricidade barata para bombear água de um lago de baixa altitude para um lago de alta altitude; então ele re-gera energia quando for valioso utilizar turbinas iguais as das estações de potência hidrelétrica.

Estação	Potência (GW)	Topo (m)	Volume (milhões de m ³)	Energia armazenada (GWh)
Ffestiniog	0,36	320 – 295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365 – 334	11,3	10
Foyers	0,30	178 – 172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542 - 494	6,7	9,1

Tabela 26.4. Instalações de armazenamento bombeado na Grã-Bretanha. O máximo de energia armazenável nos sistemas de armazenamento bombeado atuais é cerca de 30 GWh.

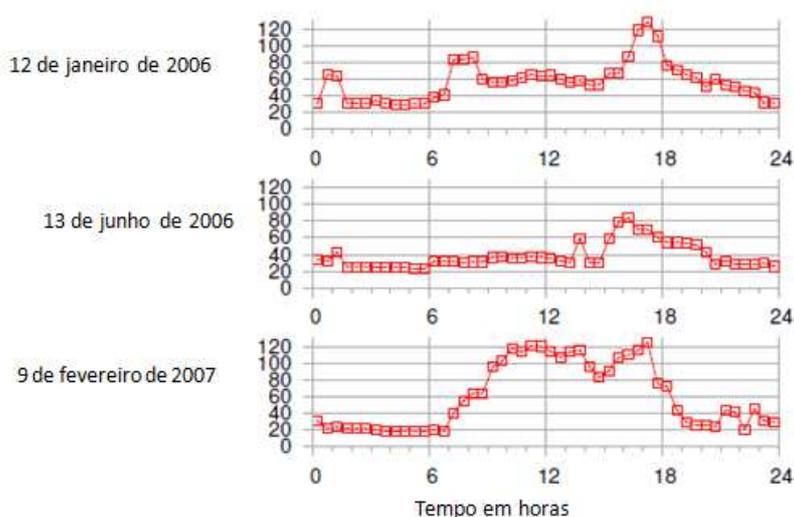


Figura 26.5. Como o armazenamento bombeado se paga. Os preços de eletricidade, em £, por MWh, em três dias em 2006 e 2007.

A Grã-Bretanha possui quatro instalações de armazenamento bombeado, que podem armazenar 30 GWh entre elas (tabela 26.4, figura 26.6). Elas são usualmente usadas para armazenar excesso de eletricidade à noite e, então, retornam durante o dia, especialmente em momentos de pico de demanda - um negócio rentável, como a figura 26.5 demonstra. A estação de potência Dinorwig - uma catedral esplêndida dentro de uma montanha em Snowdonia - também têm um papel de segurança: ela possui vigor suficiente para reiniciar a rede nacional no caso de uma grande falha. Dinorwig pode ser ligada, de 0 a 1,3 GW de potência, em 12 segundos.

Dinorwig é a Rainha das nossas quatro instalações. Vamos revisar suas estatísticas. A energia total que pode ser armazenada em Dinorwig é cerca de 9 GWh. Seu lago mais alto está a cerca de 500 metros acima do lago mais baixo, e o volume de trabalho de 7 milhões de m³ fluindo a uma vazão máxima de 390 m³/s, permitindo um fornecimento de potência de 1,7 GW por 5 horas. A eficiência deste sistema de armazenamento é de 75%.

Se todas as quatro estações de armazenamento fossem ligadas simultaneamente, elas podem produzir uma potência de 2,8 GW. Elas podem ser ligadas extremamente rápido, lidando com qualquer taxa de variação que as flutuações de demanda ou flutuações de vento possam gerar. Contudo, a capacidade de 2,8 GW não é o suficiente para substituir 10 GW ou 33 GW de potência eólica se ela subitamente se perder. Nem a energia total armazenada (30 GWh) chega nem sequer perto dos 1200 GWh que nós estamos interessados em armazenar para sobreviver a grandes calmarias. O armazenamento bombeado poderia ser aumentado? Nós poderíamos imaginar resolver todo o problema de calmarias usando apenas o armazenamento bombeado?

Nós podemos armazenar 1200 GWh?

Nós estamos interessados em fazer sistemas de armazenamento muito maiores, armazenando um total de 1200 GWh (cerca de 130 vezes o que Dinorwig armazena). E nós gostaríamos que a capacidade fosse cerca de 20 GW - cerca de dez vezes maior que Dinorwig. Então aqui está a solução de armazenamento bombeado: nós temos que imaginar criar aproximadamente 12 novos locais, cada um



Figura 26.6. Llyn Stwkan, o reservatório mais alto do sistema de armazenamento bombeado no norte do País de Gales. Energia armazenada: 1,3 GWh. Foto de Adrian Pingstone.

armazenando 100 GWh - aproximadamente 10 vezes a energia armazenada em Dinorwig. Os equipamentos de bombeamento e geração em cada local seriam o mesmo de Dinorwig.

Assumindo que os geradores possuam uma eficiência de 90%, a tabela 26.7 mostra algumas maneiras de armazenar 100 GWh, para uma gama de alturas de queda. (Para a física por trás da tabela, veja as notas complementares deste capítulo.)

Maneiras de armazenar 100 GWh		
Queda do lago superior	Volume de trabalho necessário (milhões de m ³)	Exemplo de tamanho do lago área profundidade
500 m	40	2 km ² x 20 m
500 m	40	4 km ² x 10 m
200 m	100	5 km ² x 20 m
200 m	100	10 km ² x 10 m
100 m	200	10 km ² x 20 m
100 m	200	20 km ² x 10 m

Tabela 26.7. Armazenamento bombeado. Modos de armazenar 100 GWh. Por comparação com a coluna 2, o volume de trabalho de Dinorwig é 7 milhões de m³, e o volume do Lago Windermere é 300 milhões de m³. Por comparação com a coluna 3, a água de Rutland possui uma área de 12,6 km²; a água de GRafham 7,4 km². O reservatório do vale Carron possui 3,9 km². O maior lago na Grã-Bretanha é o Loch Lomond, com uma área de 71 km².

É plausível que doze locais deste tipo sejam encontrados? Certamente, nós podemos construir vários outros lugares como Dinorwig apenas em Snowdonia. A tabela 26.8 mostra duas alternativas de lugares perto de Ffestiniog onde duas instalações iguais a Dinorwig poderiam ter sido construídas. Estes locais foram considerados juntamente com Dinorwig nos anos 1970, e Dinorwig foi escolhido.

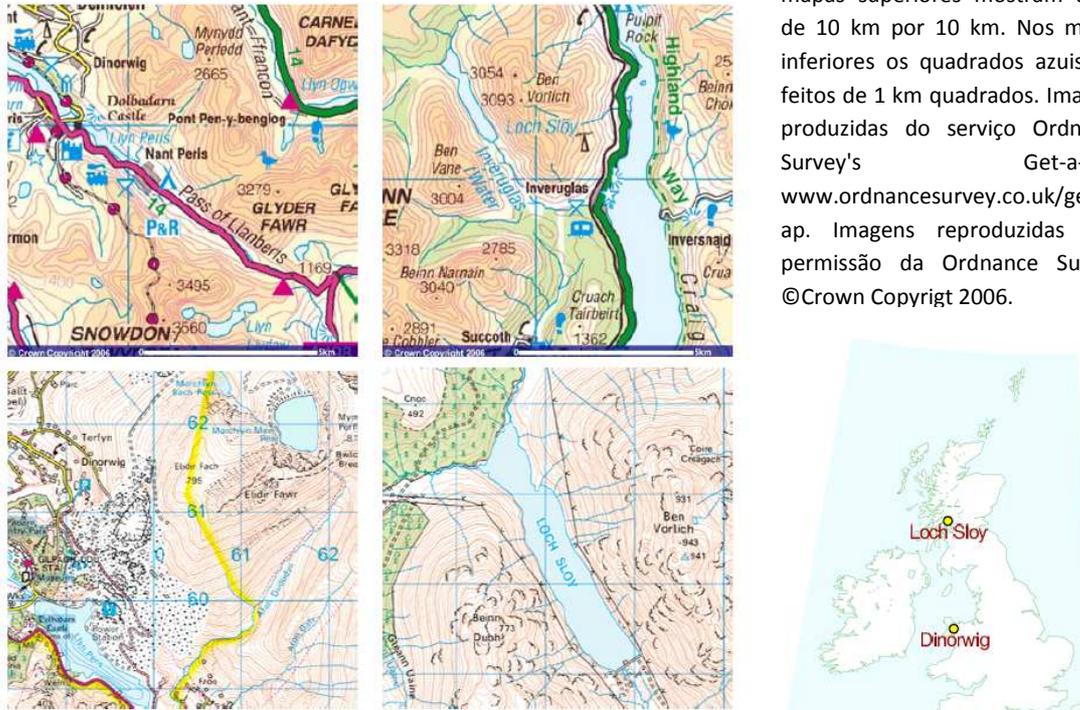
Local proposto	Potência (GW)	Topo (m)	Volume (milhões de m ³)	Energia armazenada (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

Tabela 26.8. Locais alternativos para instalações de armazenamento bombeado na Snowdonia. Em ambos locais o lago mais baixo seria um novo e reservatório artificial.

Instalações de armazenamento bombeado que contenham significativamente mais energia do que Dinorwig poderiam ser construídas na Escócia ao melhorar algumas instalações hidrelétricas já existentes. Ao observar um mapa da Escócia, um local candidato utilizaria o Loch Sloy como seu lago superior e o Loch Lomond como seu lago inferior. Já existe uma pequena estação de potência hidrelétrica ligando estes lagos. A figura 26.9 mostra estes lagos e os lagos de Dinorwig na mesma escala. A diferença de altura entre Loch Sloy e Loch Lomond é cerca de 270 m. A área do Sloy é cerca de 1,5 km², e ele já pode armazenar uma energia de 20 GWh. Se a barragem

do Loch Sloy fosse aumentada para mais 40 m, então a energia extra que poderia ser armazenada seria de 40 GWh. O nível de água em Loch Lomond mudaria no máximo 0,8 m durante um ciclo. Isto é menos do que a variação anual nos níveis de água do Loch Lomond (2m).

Figura 26.9. Dinorwig, no Parque Nacional Snowdonia, comparado com Loch Slow e Loch Lomond. Os mapas superiores mostram áreas de 10 km por 10 km. Nos mapas inferiores os quadrados azuis são feitos de 1 km quadrados. Imagens produzidas do serviço Ordnance Survey's Get-a-map www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Imagens reproduzidas com permissão da Ordnance Survey. ©Crown Copyright 2006.



Dinorwig é a residência de um sistema de armazenamento de 9 GWh, utilizando Marchlyn Mawe (615E, 620N) e Llyn Peris (590E, 598N) como seus lagos superior e inferior.

Loch Sloy ilustra o tipo de local onde um sistema de armazenamento de 40 GWh poderia ser criado.

A figura 26.10 mostra 13 locais na Escócia com potencial para armazenamento bombeado. (A maioria deles já possui uma instalação hidrelétrica.) Se dez destes locais tivessem o mesmo potencial que eu acabei de estimar para Loch Sloy, então nós poderíamos armazenar 400 GWh - um terço do total de 1200 GWh que nós estávamos querendo.

Nós poderíamos vasculhar o mapa da Grã-Bretanha por outros lugares. Os melhores locais seriam próximos dos grandes parques eólicos. Uma ideia seria fazer um novo lago artificial em um vale de suspensão (em frente à boca de uma represa que seria construída) terminando sobre o mar, com o mar sendo usado como lago inferior.

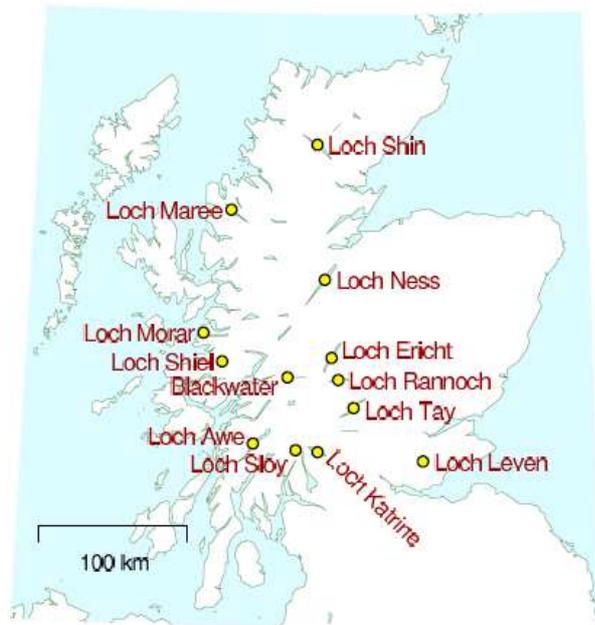


Figura 26.10. Lagos na Escócia com potencial para armazenamento bombeado.

Pensando ainda mais fora dos padrões, uma pessoa poderia imaginar parar de usar lagos e reservatórios, colocando metade da instalação em uma câmara no subsolo. Uma câmara de armazenamento um quilômetro abaixo de Londres tem sido debatida.

Ao construir mais sistemas de armazenamento bombeado, parece que nós poderíamos aumentar o nosso armazenamento máximo de energia de 30 GWh para 100 GWh ou talvez 400 GWh. Atingir os completos 1200 GWh que nós estamos esperando parece difícil, contudo. Por sorte, há outra solução.



Figura 26.11. A estação de potência com armazenamento bombeado Okinawa, cujo reservatório baixo é o oceano. Energia armazenada: 0,2 GWh. Foto cortesia de J-Power. www.ieahydro.org.

Administração da demanda utilizando veículos elétricos

Vamos recapitular as nossas necessidades: nós gostaríamos de armazenar ou sobreviver sem 1200 GWh, o que equivale a 20 kWh por pessoa; e para lidar com as flutuações no fornecimento de cerca de 33 GW - isto são 0,5 kW por pessoa. Estes números são deliciosamente parecidos em tamanho com as necessidades de energia e potência de carros elétricos. Os carros elétricos que nós vimos no Capítulo 20 possuíam armazenadores de energia entre 9 kWh e 53 kWh. Uma frota nacional de 30 milhões de carros elétricos armazenaria uma energia similar a 20 kWh por pessoa! Carregadores normais de bateria retiram uma potência de 2 ou 3 kW. Então ligar simultaneamente 30 milhões de carregadores de baterias criaria uma mudança na demanda de 60 GW! A potência média

necessária para alimentar todo o transporte da nação, se ele fosse todo elétrico, é aproximadamente 40 ou 50 GW. Existe então uma combinação próxima entre a adoção de carros elétricos proposta no Capítulo 20 e a criação de aproximadamente 33 GW de capacidade eólica, fornecendo 10 GW de potência em média.

Aqui está uma forma de explorar esta combinação: carros elétricos poderiam ser conectados a carregadores inteligentes, em casa e no trabalho. Estes carregadores inteligentes teriam conhecimento tanto do valor da eletricidade, e das necessidades do usuário do carro, (por exemplo, "meu carro deve estar completamente carregado às 7h da manhã de segunda-feira"). O carregador satisfaria sensivelmente as necessidades do usuário ao sugar eletricidade sempre que o vento soprasse, e desligando quando o vento caísse, ou quando outras formas de demanda aumentassem. Estes carregadores inteligentes forneceria um serviço útil ao balancearem a rede, um serviço que poderia ser recompensado financeiramente.

Nós poderíamos ter uma solução especialmente robusta se as baterias de carros fossem trocáveis. Imagine aparecer em um posto de abastecimento e ganhar um grupo de baterias novas em troca das suas baterias esgotadas. A estação de abastecimento seria responsável por recarregar as baterias; eles poderiam fazer isto nos momentos ideais, ligando e desligando seus carregadores de modo que o fornecimento total e a demanda sempre ficassem em equilíbrio. Utilizar baterias trocáveis é uma solução especialmente robusta porque poderia haver milhões de baterias sobressalentes nos depósitos das estações de abastecimento. As baterias sobressalentes forneceria uma solução extra para nos ajudar a sobreviver as calmarias de vento. Algumas pessoas dizem, "Que horror! Como eu poderia confiar que as estações de armazenamento cuidassem das minhas baterias por mim? E se eles me dessem uma bateria vazia?" Bem, você poderia da mesma forma perguntar hoje "E se o posto de gasolina me der petróleo misturado com água?" Eu mesmo, preferiria muito mais utilizar um veículo mantido por um profissional do que por um pateta como eu!

Vamos recapitular as nossas opções. Nós podemos equilibrar as flutuações na demanda e flutuações no fornecimento ligando e desligando *geradores* de energia (incineradores de lixo, e estações hidrelétricas, por exemplo); *armazenando* energia em algum lugar e re-gerando quando for necessário; ou ligando e desligando a *demanda*.

A mais promissora destas opções, em termos de tamanho, é ligar e desligar a potência de demanda de carregadores de veículos elétricos. 30 milhões de carros, com 40 kWh de baterias associadas a cada um deles (alguns dos quais podem possuir baterias trocáveis estocadas em estações de abastecimento) somam 1200 GWh. Se o frete de mercadorias também fosse eletrificado, então a capacidade total de armazenamento seria ainda maior.

Há então uma bela combinação entre energia eólica e veículos elétricos. Se nós aumentarmos os veículos elétricos ao mesmo tempo que aumentamos a energia eólica, aproximadamente 3000 novos veículos para cada 3 MW de turbinas eólicas, e se nós garantirmos que os sistemas de carregamento para os veículos são inteligentes, esta sinergia chegaria próximo de resolver o problema das flutuações de vento. Se a minha previsão a respeito dos veículos a hidrogênio estiver errada, e os veículos a hidrogênio se tornarem veículos de baixa energia no futuro, então a combinação de vento-com-veículos-elétricos poderia com certeza ser trocada por uma combinação vento-com-hidrogênio. As turbinas eólicas produziram eletricidade; e sempre que a eletricidade fosse abundante, hidrogênio poderia ser produzido e armazenado em tanques, para uso subsequente em veículos ou em outras aplicações, tal como a produção de vidro.

Outras ideias para administração da demanda e armazenamento

Existem algumas outras opções para administração da demanda e armazenamento de energia, que nós falaremos agora.

A ideia de modificar a taxa de produção das coisas para combinar com a fonte renovável não é nova. Muitas plantas de produção de alumínio são alocadas perto de estações hidrelétricas; quanto mais chove, mais alumínio é produzido. Sempre que a potência é usada para criar coisas que são armazenáveis, existe potencial para ligar e desligar essa demanda de potência de uma forma inteligente. Por exemplo, sistemas de osmose reversa (que fabricam água pura a partir da água do mar - veja a p116) são os maiores consumidores de potência em muitos países (contudo, não a Grã-Bretanha). Outro produto armazenável é o calor. Se, como sugerido no Capítulo 21, nós eletrificarmos os sistemas de aquecimento e refrigeração de edificações, especialmente os de aquecimento

de água e ar, então existe potencial para várias demandas de potência que podem ser ligadas e desligadas para serem incorporadas à rede. Edificações bem isoladas seguram o seu calor por muitas horas, então há flexibilidade no horário em que elas são aquecidas. Além disso, nós poderíamos incluir grandes reservatórios térmicos nos edifícios, e utilizar bombas de calor para bombear para dentro e para fora dos nossos reservatórios em momentos de abundância de eletricidade; então utilizar um segundo conjunto de bombas de calor para fornecer calor ou frio destes reservatórios para os lugares onde o aquecimento ou refrigeração são requeridos.

Controlar a demanda de eletricidade automaticamente seria fácil. A forma mais simples de fazer isto é ter aparelhos como geladeiras e freezers ouvindo a frequência de alimentação. Quando há escassez de potência na rede, a frequência cai para baixo de 50 Hz; quando há excesso de potência na rede, a frequência sobe para cima de 50 Hz. (É igual ao dínamo de uma bicicleta: quando você liga as luzes, você tem que pedalar mais para fornecer a potência extra; se você não fizer isso, então a bicicleta anda um pouco mais devagar.) Refrigeradores podem ser modificados para alterarem seus termostatos internos um pouquinho para cima e para baixo em resposta à frequência de alimentação, de modo que, sem nunca prejudicar a temperatura da sua manteiga, elas tendem a pegar potência em momentos que ajudam a rede.

A administração da demanda pode fornecer uma redução significativa do armazenamento virtual? Quão grandes dissipadores de energia são os refrigeradores do nosso país? Em média, um refrigerador-freezer típico retira 18 W; vamos estimar que o número de refrigeradores seja de cerca de 30 milhões. Então a habilidade de desligar todos os refrigeradores da nação por alguns minutos equivaleria a 0,54 GW de potência ajustável. Isto é bastante potência elétrica - mais do que 1% do total nacional - e é similar ao aumento repentino na demanda produzida quando as pessoas, unidas num ato de observância religiosa (tal qual assistir ao EastEnders), simultaneamente ligam suas chaleiras. Tais "usos de TV" geralmente produzem aumentos na demanda de 0,6 - 0,8 GW. Desligar automaticamente todos os refrigeradores *quase* cobriria estes aumentos diários das chaleiras fervendo. Estes refrigeradores inteligentes também poderiam ajudar a resolver as flutuações de curta-escala da energia eólica. Os usos da TV associados com os mais sagrados atos de observância (por exemplo, assistir um jogo de futebol entre a Inglaterra e a

Suécia) podem produzir aumentos repentinos na demanda de mais de 2 GW. Em tais ocasiões, a demanda e o fornecimento de eletricidade são mantidos em balanço com a liberação de toda a potência de Dinorwig.

Para fornecer flexibilidade para os gerenciadores da rede elétrica, que ficam perpetuamente ligando e desligando estações de potência para combinar o fornecimento com a demanda, muitos usuários industriais de eletricidade estão sob contratos especiais que permitem os gerenciadores desligar a demanda destes usuários sob aviso muito prévio. Na África do Sul (onde frequentemente há cortes de eletricidade) sistemas de gerenciamento de demanda feito por rádio estão sendo instalados em centenas de milhares de residências, para controlar os sistemas de ar condicionado e aquecedores elétricos de água.

A solução da Dinamarca

Aqui está como a Dinamarca lida com a intermitência de sua energia eólica. A dinamarca paga efetivamente para utilizar as instalações de hidroeletricidade de outros países como instalações de armazenamento. Quase toda a energia eólica de Denmark é exportada para os seus vizinhos europeus, alguns dos quais possuem energia hidrelétrica, que eles podem desligar para equilibrar as coisas. A energia hidrelétrica é então vendida de volta para a Dinamarca (a um preço maior) durante o próximo período de pouco vento e alta demanda. No geral, a eólica dinamarquesa está contribuindo com energia útil, e o sistema como um todo possui segurança considerável devido à capacidade do sistema hidrelétrico.

A Grã-Bretanha poderia adotar a solução dinamarquesa? Nós precisaríamos de conectores de larga capacidade diretos com os países com muita capacidade hidrelétrica que pode ser ligada e desligada; ou uma grande conexão com uma rede elétrica de toda a Europa.

A Noruega possui 27,5 GW de capacidade hidrelétrica. A Suécia possui aproximadamente 16 GW. E a Islândia possui 18 GW. Um inter-conector de alta voltagem DC de 1,2 GW para a Noruega foi discutido em 2003, mas não construído. Uma conexão para a Holanda - o inter-conector BriNed, com uma capacidade de 1 GW - será construído em 2010. A capacidade de vento da Dinamarca é 3,1 GW, e ela possui uma conexão de 1 GW com a Noruega, 0,6 GW com a Suécia, e 1,2 GW com a Alemanha, totalizando um total de capacidade exportada de 2,8 GW, muito similar à sua capacidade eólica. Para estar apto



PRODUÇÃO	CONSUMO
Vento: 4.1	Aquecimento: 2,5
Diesel: 1.8	Outros: 2,9

Figura 26.12. Produção elétrica e consumo na Fair Isle, 1995-96. Todos os números estão em kWh/d por pessoa. A produção excede o consumo porque 0,6 kWh/d por pessoa era descartado.

a exportar o excedente de energia eólica no estilo da Dinamarca, a Grã-Bretanha (assumindo uma capacidade eólica de 33 GW) necessitaria algo como uma conexão de 10 GW para a Noruega, 8 GW para a Suécia, e 1 GW para a Islândia.

Uma solução com duas redes

Uma abordagem radical é colocar a energia eólica e a energia de outras fontes intermitentes em uma *segunda* rede de eletricidade separada, usada para alimentar sistemas que não necessitam de potência confiável, tais como aquecimento e o carregamento de baterias de veículos elétricos. Por mais de 25 anos (desde 1982), a ilha Fair Isle da Escócia (população 70, área de 5,6 km²) possui *duas* redes de eletricidade que distribuem potência de duas turbinas eólicas e, se necessário, de um gerador elétrico a diesel. O serviço padrão de eletricidade é fornecido por uma rede, e o aquecimento por eletricidade é fornecido por um segundo conjunto de cabos. O aquecimento por eletricidade é principalmente servido pelo excesso de eletricidade gerado pelas turbinas eólicas que de outra forma teria sido descartado. Relés remotos programáveis sensíveis à frequência controlam os aquecedores individuais de água e aquecedores de armazenamento nas edificações individuais da comunidade. A frequência de alimentação é usada para informar aos aquecedores quando eles podem ser ligados. De fato existem até seis canais de frequência por residência, então o sistema emula sete redes. Fair Isle também testou com sucesso um sistema de armazenamento cinético (um pêndulo) para armazenar energia durante as flutuações de intensidade do vento em uma escala de tempo de 20 segundos.

Veículos elétricos como geradores

Se 30 milhões de veículos estivessem dispostos, em períodos de falta de eletricidade nacional, a operarem os seus carregadores em reverso e devolver potência para a rede, então, a 2 kW por veículo, nós teríamos uma fonte potencial de potência de 60 GW - similar à capacidade de todas as estações de potência do país. Mesmo que apenas um terço dos veículos fossem conectados e estivessem disponíveis por vez, eles ainda somariam um potencial de 20 GW de potência. Se cada um desses veículos fizesse uma doação de emergência de 2 kWh de energia - correspondendo talvez a 20% da

capacidade de armazenamento de sua bateria - então a energia total fornecida pela frota de carros seria de 20 GWh - duas vezes mais do que a energia da instalação de armazenamento bombeado de Dinorwig.

Outras tecnologias de armazenamento

Existem vários modos de armazenar energia, e vários critérios pelos quais as soluções de armazenamento são julgadas. A figura 26.13 mostra três dos mais importantes critérios: densidade de energia (quanta energia é armazenada por quilograma de sistema de armazenamento); eficiência (quanta energia você recebe de volta por unidade de energia posta no sistema); e tempo de vida (quantos ciclos de armazenamento de energia podem ser realizados antes que o sistema precise de remodelações). Outros critérios importantes são: a taxa máxima na qual a energia pode ser bombeada para dentro ou para fora do nosso sistema de armazenamento, expressa usualmente como potência por kg; a duração na qual a energia permanece armazenada no sistema; e é claro o custo e segurança do sistema.

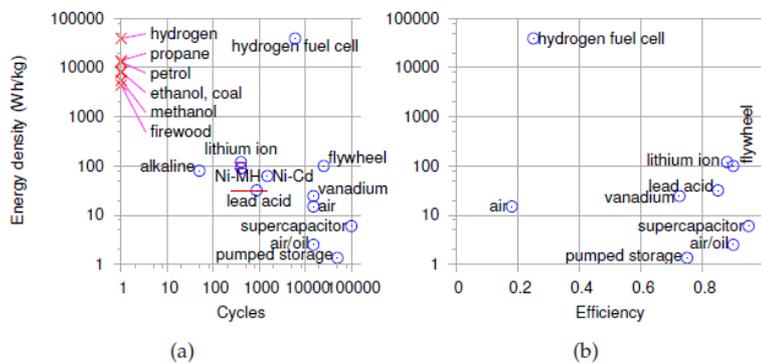


Figura 26.13. Algumas propriedades de sistemas de armazenamento e combustíveis. (a) Densidade de energia (em uma escala logarítmica) versus o tempo de vida (número de ciclos). (b) Densidade de energia versus eficiência. As densidades de energia não incluem as massas dos reservatórios dos sistemas de energia, exceto no caso do "ar" (armazenamento de ar comprimido). Levando em conta o peso de um tanque criogênico para armazenar hidrogênio, a densidade de energia do hidrogênio é reduzida de 39 kWh/kg para aproximadamente 2,4 kWh/kg.

Combustível	Poder calorífico	
	(kWh/kg)	(MJ/l)
Propano	13,8	25,4
Petróleo	13,0	34,7
Óleo diesel (DERV)	12,7	37,9
Querosene	12,8	37
Óleo de aquecimento	12,8	37,3
Etanol	8,2	23,4
Metanol	5,5	18,0
Bioetanol		21,6
Carvão	8,0	
Lenha	4,4	
Hidrogênio	39,0	
Gás natural	14,85	0,04

(a)

Tipo de bateria	Densidade energética	Vida útil
	(Wh/kg)	(ciclos)
Níquel-cádmio	45 – 80	1500
NiMH	60 – 120	300 – 500
Chumbo-ácido	30 – 50	200 – 300
Lítio-íon	110 – 160	300 – 500
Polímero lítio-íon	100 – 130	300 – 500
Alcalina reutilizável	80	50

(b)

Tabela 26.14. (a) Poderes caloríficos (densidades de energia, por kg e por litro) de alguns combustíveis (em kWh por kg e MJ por litro). (b) Densidade de energia de algumas baterias (em Wh por kg). 1 kWh = 1000 Wh.

Pêndulos

A figura 26.15 mostra um monstruoso pêndulo usado para fornecer breves surtos de potência de até 0,4 GW para alimentar uma instalação experimental. Ele pesa 800t. Girando a 225 revoluções por minuto, ele pode armazenar 1000 kWh, e sua densidade de energia é de cerca de 1 Wh por kg.

Um sistema de pêndulos designado para o armazenamento de energia em um carro de corrida pode armazenar 400 kW (0,1 kWh) de energia e pesa 245 kg (p158). Isto é uma densidade de energia de 4,6 Wh por kg.

Pêndulos de alta velocidade feitos de materiais compósitos possuem densidades de energia de até 100 Wh/kg.



Figura 26.15. Um dos dois pêndulos na instalação de fusão em Culham, sob construção. Foto: EFDA-JET. www.jet.efda.org.

Supercapacitores

Supercapacitores são utilizados para armazenar pequenas quantidades de energia elétrica (até 1 kWh) onde muitos ciclos de operação são requeridos, e a recarga deve ser feita de maneira rápida. Por exemplo, supercapacitores são preferidos no lugar de baterias para frenagem regenerativa em veículos que fazem muitas paradas e recomeços. Você pode comprar supercapacitores com uma densidade de energia de 6 Wh/kg.

Uma companhia dos EUA, EESstor, afirma ser capaz de produzir supercapacitores muito melhores, utilizando titanato de bário, com uma densidade energética de 280 Wh/kg.

Baterias de fluxo de vanádio

Sistemas de potência BRV forneceram um sistema de armazenamento de energia de 12 MWh para o parque eólico Sorne Hill na Irlanda, cuja atual capacidade é "32 MW", aumentando para "39 MW". (BRV vem de Bateria de Redução de Vanádio.) Este sistema de armazenamento é uma grande "bateria de fluxo", uma célula a combustível redox, com alguns tanques cheios de vanádio em diferentes estados químicos. Este sistema de armazenamento pode suavizar a saída do seu parque eólico em uma escala de tempo de minutos, mas o maior tempo para o qual ele pode fornecer um terço da capacidade (durante uma calmaria de vento) é uma hora.

Um sistema de vanádio de 1,5 MWh custando \$480 000 ocupa 70 m² com uma massa de 107 toneladas. A bateria redox de vanádio possui um ciclo de vida de mais de 10 000 ciclos. Ela pode ser carregado na mesma taxa que é

descarregado (em contraste com as baterias de chumbo-ácido que devem ser carregadas cinco vezes mais devagar). Sua eficiência é de 70-75%, de carga e descarga. O volume necessário é de cerca de 1 m³ de vanádio 2-molar em ácido sulfúrico para armazenar 20 kWh. (Isto são 20 Wh/kg.)

Então para armazenar 10 GWh seria necessário 500 000 m³ (170 piscinas de natação) - por exemplo, tanques de 2 m de altura cobrindo uma área de chão de 500 m x 500 m.

Aumentar a dimensão da tecnologia de vanádio para se equivaler com um grande sistema de armazenamento bombeado - 10 GWh - pode ter um efeito notório no mundo do mercado de vanádio, mas não há falta a longo prazo de vanádio. A produção mundial atual de vanádio é 40 000 toneladas por ano. Um sistema de 10 GWh conteria 36 000 toneladas de vanádio - cerca de um ano da produção atual. Vanádio é atualmente produzido como um subproduto de outros processos, e o recurso mundial total de vanádio é estimado como sendo 63 milhões de toneladas.

Soluções "econômicas"

No mundo atual que não coloca nenhum custo para a poluição de carbono, a barreira financeira que um sistema de armazenamento deve vencer é difícil: armazenamento pode ser obtido simplesmente colocando uma estação extra de potência movida à queima de gás para atender a demanda extra, e se livrando do excesso de energia elétrica jogando-a fora nos aquecedores.

Flutuações sazonais

As flutuações de fornecimento e demanda que possuem as maiores escalas de tempo são sazonais. A flutuação mais importante é a de aquecimento de edificações, que aumenta todo inverno. A demanda atual de gás natural do Reino Unido varia ao longo do ano, de uma média típica de 36 kWh/d por pessoa em julho e agosto para uma média de 72 kWh/d por pessoa em dezembro, janeiro e fevereiro, com extremos de 30-80 kWh/d por pessoa (figura 26.16).

Algumas renováveis também possuem flutuações ao longo do ano - a potência solar é mais forte no verão e a potência eólica mais fraca.

Como sobreviver estas flutuações de escala de tempo muito longas? Veículos elétricos e armazenamento bombeado

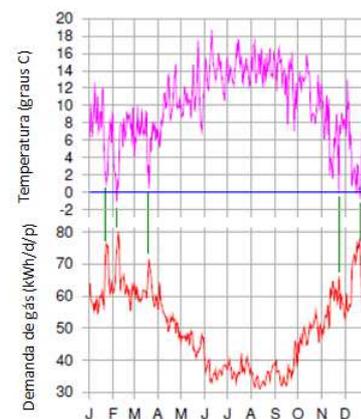


Figura 26.16. Demanda de gás (gráfico de baixo) e temperatura (gráfico de cima) na Grã-Bretanha durante 2007.

não ajudarão a armazenar a quantidade de energia necessária. Uma tecnologia útil que funcionará a longo prazo será o armazenamento térmico. Uma grande rocha ou um grande tanque de água pode armazenar a quantidade de calor para um edifício no inverno - Apêndice E discute essa ideia em mais detalhes. Na Holanda, o calor das rodovias no verão é armazenado em aquíferos até o inverno; e então fornecido para as edificações através de bombas de calor. [2wmuw7]

Observações

N pg

242 O total produzido pela frota eólica da República da Irlanda. Dados do eirgrid.com [2hxf6c].

- "Queda do vento causa emergência na rede elétrica do Texas". [2199ht] Na verdade, a minha leitura do artigo de notícias sobre este evento é que, embora incomum, foi um exemplo da operação *normal* da rede de energia. A rede possui clientes industriais cujo fornecimento é ininterrupto, no evento de uma má combinação entre o fornecimento e a demanda. A produção de eólica caiu 1,4 GW ao mesmo tempo que a demanda do Texas aumentou 4,4 GW, causando exatamente esta não combinação entre o fornecimento e a demanda. Os fornecimentos ininterruptos foram interrompidos. Tudo funcionou como deveria.

Aqui está outro exemplo, onde um melhor planejamento do sistema de potência teria ajudado: "A energia eólica da Espanha atinge recorde, corte na produção foi determinado". [3xx2kvv] O consumo médio de eletricidade da Espanha é 31 GW. Na terça-feira de 4 de março de 2008, seus geradores eólicos estavam fornecendo 10 GW. "O mercado de energia da Espanha se tornou particularmente sensível às flutuações de vento".

- Apoiadores da energia eólica minimizam este problema: "Não se preocupe -parques eólicos individuais podem ser intermitentes, mas ao juntar todos, a soma de todos os parques eólicos em localidades diferentes é muito menos intermitente."

Por exemplo, veja o *website* yes2wind.com, que, na sua página "derrubando o mito de que a energia eólica não é confiável" diz que "a variação na produção dos parques eólicos distribuídos pelo país é quase

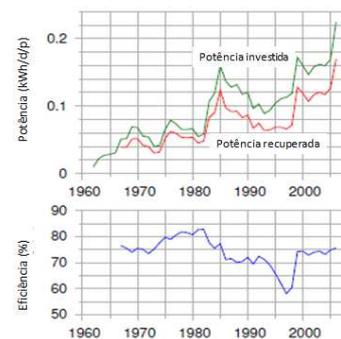


Figura 26.17. A eficiência de quatro sistemas de armazenamento bombeado da Grã-Bretanha.

- imperceptível". www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html
- O vento é intermitente, mesmo se nós adicionarmos várias turbinas cobrindo o país inteiro. O Reino Unido é um pouco maior do que a Irlanda, mas o mesmo problema acontece lá também. Fonte: Oswald et al. (2008).
- 247 A eficiência do armazenamento bombeado de Dinorwig é 75%. A figura 26.17 mostra os dados. Mais informações sobre Dinorwig e os diferentes locais para armazenamento bombeado: Baines et al. (1983, 1986).
- 248 Tabela 26.7. O volume de trabalho necessário, V , é computado da altura de queda, h , como segue. Se ϵ é a eficiência da conversão de energia potencial em energia elétrica,
- $$V = 100 \text{ GWh}/(\rho gh\epsilon),$$
- onde ρ é a densidade da água e g é a aceleração da gravidade. Eu assumi que os geradores possuem uma eficiência de $\epsilon=0,9$.
- 248 Tabela 26.8, lugares alternativos para instalações de armazenamento bombeado. O reservatório superior proposto para Bowydd foi Llyn Newydd, rede de referência SH 722 470; para Croesor: Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.
- Se dez instalações de armazenamento bombeado escocesas tivessem o mesmo potencial que Loch Sloy, então nós poderíamos armazenar 400 GWh. Esta estimativa é suportada por um estudo da Universidade de Strathclyde [5o2xgu] que lista 14 lugares que possuem uma capacidade estimada de armazenamento de 514 GWh.
- 253 Refrigeradores podem ser modificados para alterarem seus termostatos internos um pouquinho para cima e para baixo em resposta à frequência de alimentação. [2n3pmb] Mais links: Dynamic Demand www.dynamicdemand.co.uk; www.rltec.com; www.responsiveload.com.
- 254 Na África do Sul sistemas de gerenciamento de demanda feito por rádio estão sendo instalados. Fonte: [2k8h4o].
- Quase toda a energia eólica da Dinamarca é exportada para os seus vizinhos europeus. Fonte: Sharman (2005).

255 Por mais de 25 anos (desde 1982), a ilha Fair Isle possui duas redes de eletricidade.

www.fairisle.org.uk/FIECo/

As velocidades do vento estão entre 3 m/s e 16 m/s a maior parte do tempo; 7 m/s é a velocidade mais provável.

256 **Figura 26.13. Instalações de armazenamento.** Baterias de lítio: 88% eficientes.

Fonte:

www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf

Baterias de chumbo-ácido: 85-95% eficientes.

Fonte: www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm.

Armazenamento de ar comprimido: 18% eficiente.

Fonte: Lemofouet-Gatsi e Rufer (2005); Lemofouet-Gatsi (2006). Veja também Denholm et al. (2005).

Ar/óleo: acumuladores hidráulicos, como aqueles utilizados para frenagem regenerativa em caminhões, são aparelhos de armazenamento de ar comprimido que podem ser 90% eficientes na carga e descarga e permitem que 70% da energia cinética possa ser capturada. Fontes: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27].

- **Tabela 26.14.** Fontes: Xtronics xtronics.com/reference/energy_densitu.htm; Battery University [2sxlyj]; informações sobre pêndulos de Ruddell (2003).

As últimas baterias com maiores densidades de energia são as de lítio-enxofre e sulfeto de lítio, que possuem uma densidade de energia de 300 Wh/kg.

Alguns entusiastas desiludidos do hidrogênio devem estar indo para a tabela periódica e tornando-se entusiastas do boro. O boro (assumindo-se que você vá queimá-lo como B_2O_3) possui uma densidade de energia 15 000 Wh por quilograma, o que é ótimo e alto. Mas eu imagino que a minha principal preocupação sobre o hidrogênio se aplicará ao boro também: que a produção do combustível (aqui o boro do óxido de boro) será ineficiente em termos energéticos, assim como o processo de combustão.

257 **Baterias de fluxo de vanádio.** Fontes: www.vrbpower.com; Parque eólico da Irlanda [ktd7a]; taxa de carga [627ced]; produção mundial [5fas17].



Figura 26.18. Um possível local para outra instalação de armazenamento bombeado de 7 GWh. O vale Croesor está no centro-esquerdo, entre o pico afiado (Cnicht) na esquerda e os demais picos (os Moelwyns) à direita.

259 O calor das rodovias no verão é armazenado em aquíferos até o inverno. [2wmuw7].

27 Cinco planos energéticos para a Grã-Bretanha

Se nós queremos acabar com o nosso atual vício em combustíveis fósseis nós precisamos de um plano para uma ação radical. E o plano precisa fazer a diferença. O plano também precisa de apoio político e financeiro. Política e economia não fazem parte do escopo deste livro, então aqui eu discutirei apenas a parte técnica de como um plano que faça a diferença se pareceria.

Existem muitos planos que fariam a diferença. Neste capítulo eu descreverei cinco. Por favor, não pegue qualquer um dos planos que eu apresentar como "a solução recomendada pelo autor". Minha única recomendação é esta:

Tenha certeza que as suas políticas incluam um plano que faça a diferença.

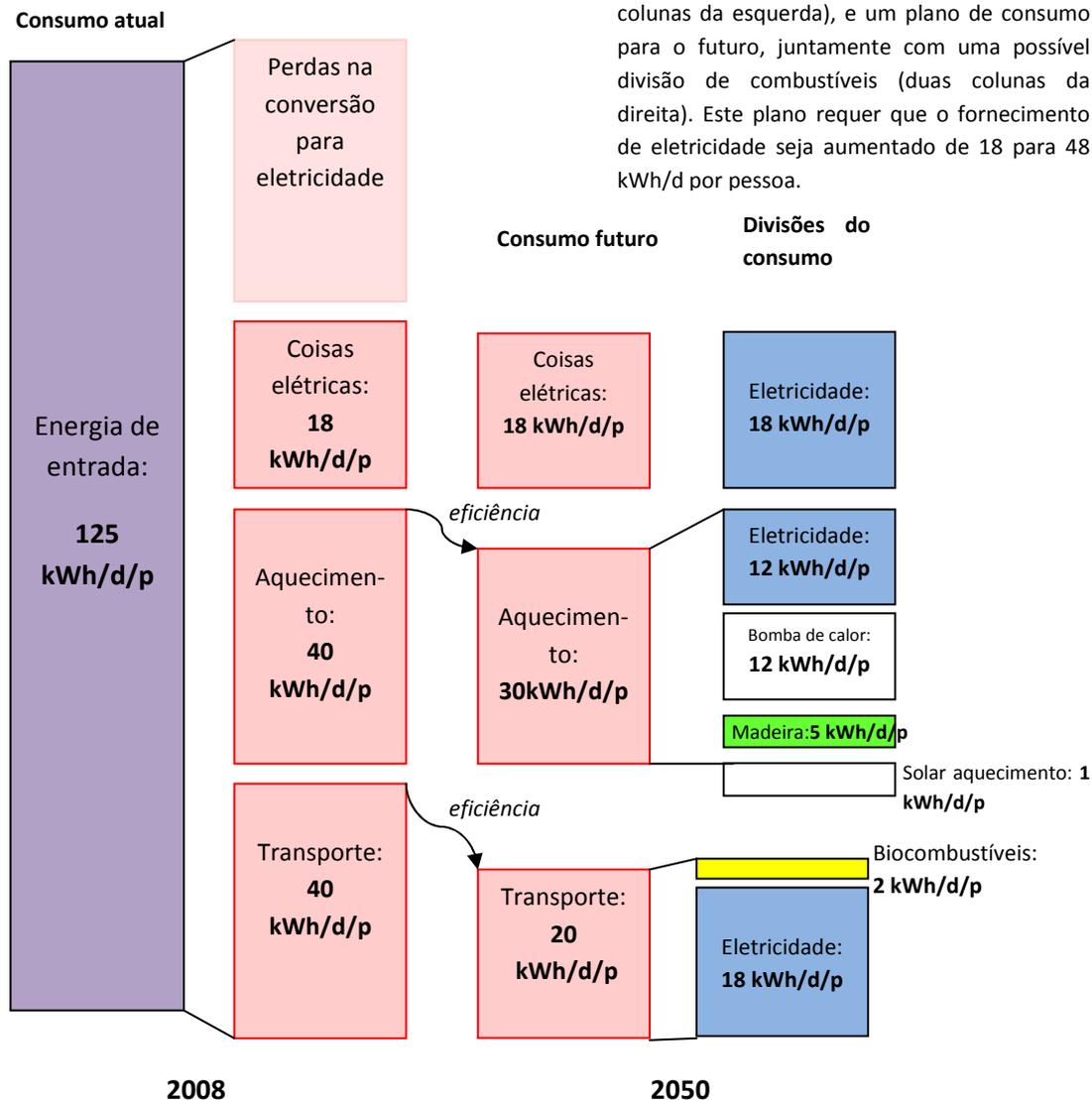
Cada plano possui um lado de produção e um lado de consumo: nós temos que especificar quanta energia o nosso país estará consumindo, e como essa energia será produzida. Para evitar que os planos tomem muitas páginas, eu trabalho com um esboço do nosso país, no qual nós consumimos energia de apenas três formas: transporte, aquecimento e eletricidade. Esta é uma simplificação drástica, omitindo a indústria, agricultura, produção de bens, importações e assim por diante. Mas eu espero que seja uma simplificação que nos ajude, nos permitindo comparar e contrastar os planos alternativos em um minuto. Eventualmente nós precisaremos de planos mais detalhados, mas hoje, nós estamos tão longe do nosso destino que eu acho que um simples esboço é a melhor maneira de capturar as questões.

Eu apresentarei alguns planos que eu acho que são tecnicamente acessíveis para o Reino Unido até 2050. Todos dividirão o mesmo lado de consumo. Eu enfatizo novamente, eu não acho que este seja o plano correto para consumo, ou o único plano. Eu apenas quero evitar sobrecarregar você com uma proliferação de planos. No lado da produção, eu descreverei uma gama de planos utilizando diferentes misturas de renováveis, "carvão limpo", e energia nuclear.

A atual situação

A atual situação no esboço do nosso país é como segue. O transporte (tanto de humanos quanto de objetos) consome 40 kWh/d por pessoa. A maior parte desta energia é atualmente consumida como petróleo, diesel ou querosene. Aquecimento de ambientes e de água consome 40 kWh/d por pessoa. Muita desta energia é atualmente fornecida como gás natural. A eletricidade fornecida soma 18 kWh/d por pessoa e usa combustível (principalmente carvão, gás e nuclear) com um conteúdo energético de 45 kWh/d/p. Os restantes 27 kWh/d/p vão para torres de refrigeração (25 kWh/d/p) e são perdidos nas linhas da rede de distribuição (2 kWh/d/p). A energia total consumida neste esboço do país é 125 kWh/d/p.

Figura 27.1. O consumo atual por pessoa no "esboço da Grã-Bretanha de 2008" (as duas colunas da esquerda), e um plano de consumo para o futuro, juntamente com uma possível divisão de combustíveis (duas colunas da direita). Este plano requer que o fornecimento de eletricidade seja aumentado de 18 para 48 kWh/d por pessoa.



Características comuns dos cinco planos

No meu esboço do país do futuro, o consumo energético é reduzido ao se utilizar tecnologia mais eficiente para transporte e aquecimento.

E todos os cinco planos para o futuro, **o transporte** é largamente eletrificado. Motores elétricos são mais eficientes do que os movidos à petróleo, então a energia necessária para o transporte é reduzida. O transporte público (também largamente eletrificado) é melhor integrado, melhor personalizado, e mais condescendente. Eu assumi que a eletrificação torna o transporte público cerca de quatro vezes mais eficiente, e que o crescimento econômico cancela algumas destas economias, de modo que o efeito na rede é uma queda do consumo energético com transporte pela metade. Existem alguns veículos essenciais que não podem ser facilmente eletrificados, e para estes nós produziremos os nossos próprios combustíveis líquidos (por exemplo biodiesel ou biometanol ou bioetanol celulósico). A energia para o transporte são 18 kWh/d/p de eletricidade e 2 kWh/d/p de combustíveis líquidos. As baterias de veículos elétricos servem como uma instalação de armazenamento de energia, ajudando a lidar com as flutuações do fornecimento e demanda de eletricidade. A área necessária para a produção de biocombustível é cerca de 12% do Reino Unido (500 m² por pessoa), assumindo que a produção de biocombustível venha de plantas 1% eficientes e que a conversão da planta para o combustível seja 33% eficiente. Alternativamente, os biocombustíveis poderiam ser importados se nós pudéssemos persuadir outros países a dedicar a área necessária (do tamanho do País de Gales) para a agricultura de biocombustíveis para nós.

Em todos os cinco planos, a energia com **aquecimento** é reduzida pela melhora do isolamento de todas as edificações, e a melhora do controle de temperatura (através de termostatos, educação, e a promoção do uso de suéters por personalidades charmosas). Novas edificações (todas elas construídas de 2010 em diante) são realmente bem isoladas e quase não necessitam de aquecimento de ambientes. Edificações antigas (que ainda serão maioria em 2050) são aquecidas principalmente por bombas de calor de fonte de ar e bombas de calor de fonte subterrânea. Parte do aquecimento de água será fornecido por painéis solares (2,5 metros quadrados em todas as casas), outra parte por bombas de calor, e um pouco por eletricidade. Algumas edificações

localizadas perto de florestas gerenciadas e de plantações de cultura de energia são aquecidas por biomassa. A potência necessária para aquecimento é então reduzida de 40 kWh/d/p para 12 kWh/d/p de eletricidade, 2 kWh/d/p de aquecimento solar da água, e 5 kWh/d/p de madeira.

A madeira para produção de calor (ou possivelmente a combinação de calor e potência) vem de florestas próximas e plantações de energia (talvez grama *mischanthus*, salgueiro ou choupo) cobrindo uma área de terra de 30 000 km², ou 500 m² por pessoa; isto corresponde a 18% da terra para agricultura do Reino Unido, que possui uma área de 2800 m² por pessoa. As plantações de energia crescem principalmente na terra de baixa qualidade, deixando a terra de alta qualidade para a agricultura de alimentos. Cada 500 m² de culturas energéticas produz 0,5 toneladas de queima seca por ano, o que possui um conteúdo energético de cerca de 7 kWh/d; desta potência, cerca de 30% é perdido no processo de produção e fornecimento de calor. O calor final fornecido é 5 kWh/d por pessoa.

Nestes planos, eu assumo que a atual demanda de **eletricidade** para aparelhos, iluminação, e assim por diante é mantida. Então nós ainda precisamos de 18 kWh(e)/d/p de eletricidade. Sim, a eficiência da iluminação é melhorada pela troca para diodos de luz-emitida (LED) para quase todas as lâmpadas, e muitos outros aparelhos também ficarão mais eficientes; mas graças à benção do crescimento econômico, nós teremos aumentado o número de aparelhos nas nossas vidas - por exemplo sistemas de vídeo conferências para nos ajudar a viajar menos.

O consumo total de eletricidade sob este plano *aumenta* (por causa dos 18 kWh/d/p para transporte elétrico e os 12 kWh/d/p para bombas de calor) para 48 kWh/d/p (ou 120 GW nacionalmente). Isto é quase uma triplicação do consumo de eletricidade do Reino Unido. De onde virá toda essa energia?

Vamos descrever algumas alternativas. Nem todas essas alternativas são "sustentáveis" como definidas neste livro; mas todas elas são planos de baixo carbono.

Produzindo muita eletricidade - os componentes

Para produzir muita eletricidade, cada plano usa uma certa quantidade de energia eólica em terra e no mar; um pouco de solar fotovoltaica; possivelmente um pouco de energia solar vinda de países com desertos; incineração de lixo (incluindo

lixo e resíduos agrícolas); hidroeletricidade (a mesma quantidade que nós utilizamos hoje em dia); talvez energia das ondas; barragens de marés, lagoas de marés, e a energia das marés; talvez energia nuclear; e talvez algum "combustível fóssil limpo", ou seja, carvão queimado em estações de potência que fazem captura e armazenamento de carbono. Cada plano tem por objetivo uma produção total de eletricidade de 50 kWh/d/p em média - eu cheguei a este valor ao arredondar os 48 kWh/d/p da média de demanda, permitindo alguma perda na rede de distribuição de energia.

Alguns dos planos que seguem importarão energia de outros países. Por comparação, pode ser útil saber quanto da nossa energia atual é importada hoje em dia. A resposta é que, em 2006, o Reino Unido importou 26 kWh/d/p de combustível - 23% do seu consumo primário. Estas importações são dominadas pelo carvão (18 kWh/d/p), petróleo cru (5 kWh/d/p), e gás natural (6 kWh/d/p). Combustível nuclear (urânio) não é normalmente contado como uma importação uma vez que ele é facilmente armazenado.

Em todos os cinco planos eu assumirei que nós podemos aumentar a incineração dos resíduos municipais de modo que todos os resíduos que não podem ser reciclados de maneira útil seja incinerado ao invés de aterrado. Incinerar 1 kg por dia por pessoa de resíduos produz aproximadamente 0,5 kWh/d por pessoa de eletricidade. Eu assumirei que uma quantidade parecida de resíduos agrícolas também seja incinerada, produzindo 0,6 kWh/d por pessoa. Incinerar estes resíduos requer aproximadamente 3 GW de capacidade de conversão de resíduos para energia, um aumento de dez vezes sobre as estações de potência de 2008 (figura 27.2). Londres (7 milhões de pessoas) teria doze instalações de conversão de resíduos para energia de 30 MW como a instalação SELCHP no sul de Londres (veja P370). Birmingham (1 milhão de pessoas) teria duas delas. Cada cidade com 200 000 pessoas teria uma instalação de conversão de resíduos para energia de 10 MW. Quaisquer medos de que a incineração de resíduos nesta escala seria difícil, suja, ou perigosa devem ser acalmados pela figura 27.3, que mostra muitos países na Europa incineram *muito* mais resíduos por pessoa do que o Reino Unido; estes países amantes da incineração incluem a Alemanha, a Suécia, Dinamarca, a Holanda e a Suíça - não são nações associadas com problemas de higiene! Um bom efeito colateral deste plano de incineração de resíduos é que ele elimina as futuras emissões de metano dos aterros.

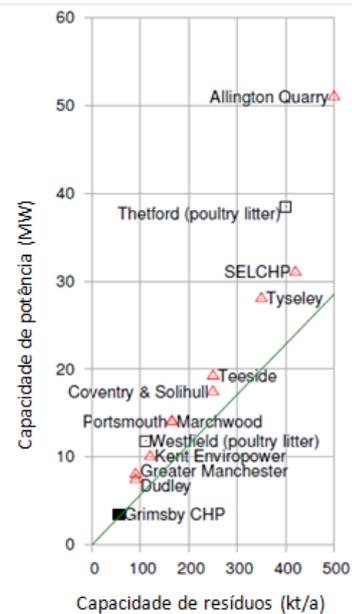
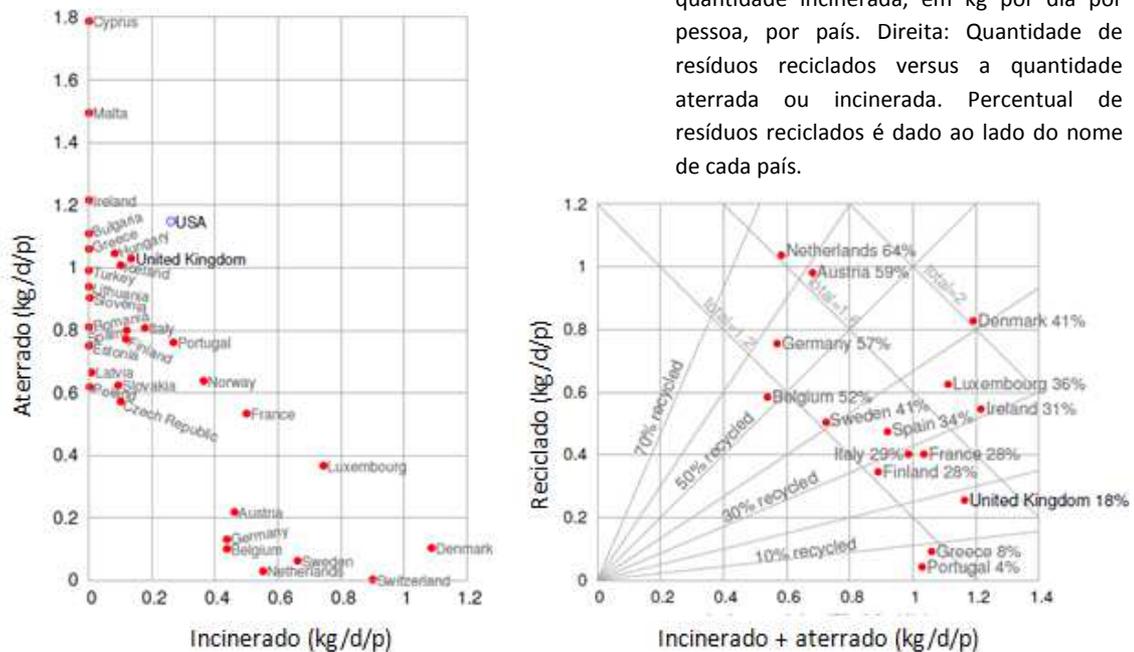


Figura 27.2. Instalações de conversão de resíduos para energia na Grã-Bretanha. A linha mostra a produção média de potência assumindo 1 kg de resíduo --> 0,5 kWh de eletricidade.

Em todos os cinco planos, a hidroeletricidade contribui com 0,2 kWh/d/p, o mesmo que hoje em dia.

Veículos elétricos são utilizados como cargas dinamicamente ajustáveis na rede de eletricidade. A potência média necessária para carregar os veículos elétricos é 45 GW (18 kWh/d/p). Então as flutuações nas renováveis como solar e eólica podem ser balançadas ao ligar e desligar estas cargas, desde que as flutuações não sejam muito grandes ou longas. Oscilações diárias na demanda de energia elétrica serão maiores do que as atuais por causa da substituição de gás para cozinha e aquecimento por eletricidade (veja a figura 26.16, p258). Para garantir que os picos de demanda de 10 GW durando até 5 horas possam ser cobertos, todos os planos construirão cinco novas instalações de armazenamento bombeado como Dinorwig (ou melhorar as instalações hidrelétricas para fornecerem armazenamento bombeado). 50 GWh de armazenamento é igual a cinco Dinorwigs, cada uma com uma capacidade de 2 GW. Alguns dos planos que seguem requererão mais armazenamento bombeado do que isto. Para garantia adicional, todos os planos construirão um interconector com a Noruega, com uma capacidade de 2 GW.

Figura 27.3. Esquerda: Resíduos sólidos municipais postos em aterro, versus a quantidade incinerada, em kg por dia por pessoa, por país. Direita: Quantidade de resíduos reciclados versus a quantidade aterrada ou incinerada. Percentual de resíduos reciclados é dado ao lado do nome de cada país.



Produzindo muita eletricidade - plano D

Plano D ("D" vem de "diversidade doméstica") utiliza muito de todas as possíveis fontes domésticas de eletricidade, e

depende relativamente pouco do fornecimento de energia de outros países.

Aqui está da onde o plano D tira os 50 kWh/d/p de eletricidade. Vento: 8 kWh/d/p (20 GW em média; 66 GW pico) (mais cerca de 400 GWh de instalações de armazenamento bombeado associado). Solar fotovoltaica: 3 kWh/d/p. Incineração de resíduos: 1,3 kWh/d/p. Hidroeletricidade: 0,2 kWh/d/p. Ondas: 2 kWh/d/p. Marés: 3,7 kWh/d/p. Nuclear: 16 kWh/d/p (40 GW). "Carvão limpo": 16 kWh/d/p (40 GW).

Para obter 8 kWh/d/p do vento necessita-se um aumento na energia eólica de 30 vezes na potência eólica instalada em 2008. A Grã-Bretanha teria que ter aproximadamente 3 vezes mais equipamentos eólicos do que a Alemanha possui atualmente. Instalar esta quantidade de eólica marítima em um período de dez anos necessitaria de aproximadamente 50 plataformas auto-elevatórias.

Conseguir 3 kWh/d/p de solar fotovoltaica necessita 6 m² de painéis com eficiência de 20% por pessoa. A maioria dos telhados orientados para o sul teriam que ser completamente cobertos com painéis; alternativamente, isto pode ser mais econômico, e causar menos estresse para a Liga de Preservação de Edifícios Antigos, pode-se instalar vários destes painéis na zona rural de maneira tradicionalmente Bavária (figura 6.7, p50).

A incineração de resíduos corresponde a 1 kg por dia por pessoa de resíduos domésticos (contendo 0,5 kWh/d/p) e uma quantidade similar de resíduos agrícolas contendo 0,6 kWh/d/p; a hidroeletricidade é 0,2 kWh/d/p, a mesma quantidade que nós já retiramos hoje em dia da hidroeletricidade.

A energia das ondas requer 16 000 aparelhos Pelamis de ondas de mar ocupando 830 km de linha de costa do Atlântico (veja o mapa na p91).

A energia das marés vem de 5 GW de instalações de marés, uma barragem do tipo Severn de 2 GW, e 2,5 GW de lagoas de marés, que também podem servir como sistemas de armazenamento bombeado.

Para conseguir 16 kWh/d/p de energia nuclear são necessários 40 GW de armas nucleares , o que é um aumento de quatro vezes na frota nuclear de 2007. Se nós produzíssemos 16 kWh/d/p de energia nuclear, nós ficaríamos entre a Bélgica, Finlândia, França, e Suécia, em termos de produção per-capita: Bélgica e Finlândia cada uma delas produz aproximadamente 12 kWh/d/p; França e Suécia produzem 19 kWh/d/p e 20 kWh/d/p, respectivamente.



Figura 27.4. Plano D

Para conseguir 16 kWh/d/p de "carvão limpo" (40 GW), nós teríamos que pegar a atual frota de estações de carvão, que fornece cerca de 30 GW, introduzir sistemas de captura de carvão nelas, o que reduziria a produção delas para 22 GW, e então construir mais 18 GW de novas estações de carvão limpo. Este nível de potência de carvão requer uma entrada de energia de cerca de 53 kWh/d/p de carvão, o que é um pouco maior do que a taxa total na qual nós atualmente queimamos *todos* os nossos combustíveis fósseis nas estações de potência, e bem acima do nível que nós estimamos como sendo "sustentável" no Capítulo 23. Esta taxa de consumo de carvão é aproximadamente três vezes a taxa atual de importação de carvão (18 kWh/d/p). Se nós não reabrirmos as minas de carvão do Reino Unido, este plano teria 32% da eletricidade do Reino Unido dependendo de carvão importado. Reabrir as minas de carvão do Reino Unido poderia fornecer uma entrada de energia de cerca de 8 kWh/d/p, então de qualquer forma, o Reino Unido não seria auto-suficiente para o carvão.

Alguma das características deste plano parece irracional ou censurável? Se sim, talvez um dos próximos planos agrade mais.

Produzindo muita eletricidade - plano N

O plano N é o plano "NNMQ", para pessoas que não gostam de industrializar a zona rural britânica com instalações de energias renováveis, e também não querem novas estações de energia nuclear. Vamos revelar o plano em estágios.

Primeiro nós reduzimos os níveis das renováveis de suas altíssimas configurações do plano D para: vento: 2 kWh/d/p (5 GW em média); solar fotovoltaica: 0; ondas: 0; marés: 1 kWh/d/p.

Nós acabamos de perder 14 kWh/d/p (35 GW nacionalmente) ao desligar as renováveis. (Não entenda errado! O vento ainda está aumentado oito vezes com relação aos níveis de 2008.)

No plano NMQ, nós reduzimos a contribuição da energia nuclear para 10 kWh/d/p (25 GW) - uma redução de 15 GW comparado com o plano D, mas ainda é um aumento substancial com relação aos níveis atuais. 25 GW de energia nuclear poderia, eu acredito, serem espremidos entre as instalações nucleares já existentes, de forma a evitar a imposição dela em outros quintais. Eu deixei a contribuição de carvão limpo sem alterações para 16 kWh/d/p (40 GW). As

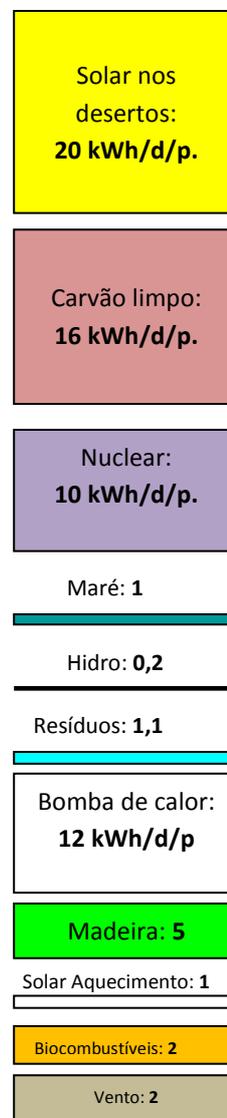


Figura 27.5. Plano N

contribuições de eletricidade para hidroeletricidade e incineração de resíduos permanecem as mesmas do plano D.

Da onde nós conseguiremos extras 50 GW? O NNMQ diz, "não do meu quintal, mas no de outra pessoa". Então o plano NNMQ paga outros países para importar energia solar de seus desertos ao tom de 20 kWh/d/p (50 GW).

Este plano requer a criação de cinco gotas cada uma do tamanho de Londres (44 km de diâmetro) no deserto transmediterrâneo, preenchidas com estações de energia solar. Ela também necessita de sistemas de transmissão de potência para transmitir 50 GW de potência para o Reino Unido. A conexão de eletricidade de alta voltagem atual da França pode fornecer apenas 2 GW de potência. Então este plano requer um aumento de 25 vezes na capacidade da conexão elétrica com o continente. (Ou uma solução equivalente de transmissão de potência - talvez navios cheios de metanol ou boro saindo das costas dos desertos.

Tendo menos energia eólica, o plano N não precisa construir na Grã-Bretanha as instalações extras de armazenamento bombeado mencionadas no plano D, mas dado a sua dependência da energia solar, serão necessários sistemas de armazenamento a serem construídos em algum lugar para armazenar a energia flutuante do sol. Sistemas de armazenamento de sal derretido nas estações de energia solar são uma opção. Usar um pouco dos sistemas de armazenamento bombeado nos Alpes também pode ser possível. Converter a eletricidade em um combustível armazenável como metanol é outra opção, apesar de que essas conversões acarretam em perdas e requerem mais estações de energia solar.

Este plano consegue 32% + 40% = 72% da energia do Reino Unido a partir de outros países.

Produzindo muita eletricidade - plano L

Algumas pessoas dizem "nós não queremos energia nuclear!" Como nós podemos deixá-los satisfeitos? Talvez deveria ser trabalho dessa porção de gente que é anti-nuclear a persuadir a porção de pessoas da NNMQ que eles querem sim ter energias renováveis no nosso quinta no fim das contas.

Nós podemos criar um plano livre de energia nuclear pegando o plano D, mantendo todas aquelas renováveis no nosso quintal, e fazendo uma troca direta da nuclear para energia dos desertos. Como no plano N, o fornecimento da potência dos desertos necessita um amplo aumento nos

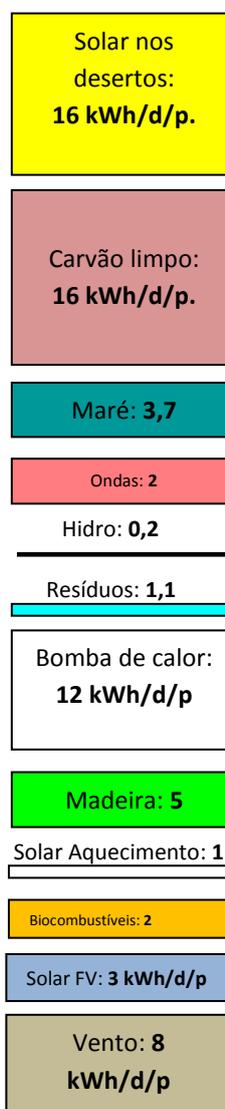


Figura 27.6. Plano L

sistemas de transmissão entre o norte da África e a Grã-Bretanha; os inter-conectores entre a Europa e o Reino Unido teriam que aumentar de 2 GW para pelo menos 40 GW.

Aqui está da onde o plano L retira seus 50 kWh/d/p de eletricidade. Vento: 8 kWh/d/p (20 GW em média) (mais cerca de 400 GWh de instalações de armazenamento bombeado associadas a ele). Solar fotovoltaica: 3 kWh/d/p. Hidroeletricidade e incineração de resíduos: 1,3 kWh/d/p. Ondas: 2 kWh/d/p. Marés: 3,7 kWh/d/p. "Carvão limpo": 16 kWh/d/p (40 GW). Energia solar nos desertos: 16 kWh/d/p (40 GW de potência média).

Este plano importa 64% da eletricidade do Reino Unido de outros países.

Eu chamo este de o "plano L" porque ele se alinha bastante bem com as políticas dos Democratas Liberais - pelo menos ele se alinhava na primeira vez que eu escrevi este capítulo no meio de 2007; recentemente, eles têm falado sobre "independência real energética para o Reino Unido", e anunciaram uma política de zero-carbono, sob a qual a Grã-Bretanha seria uma *exportadora* de energia; a política deles não detalha como estas metas seriam atingidas.

Produzindo muita eletricidade - plano V

Algumas pessoas dizem "nós não queremos energia nuclear e nós não queremos carvão!" Este parece um objetivo desejável, mas nós precisamos de um plano para atingi-lo. Eu chamo este de "plano V" porque eu acho que o Partido Verde³¹ não quer nuclear ou carvão, embora eu ache que nem todos os verdes vão gostar do resto do plano. O Greenpeace, eu sei, *ama* a eólica, então o plano V é dedicado a eles também, porque ele possui *muito* vento.

Eu faço o plano V começando pelo plano D, aumentando a contribuição das ondas para 1 kWh/d/p (investindo dinheiro na pesquisa de energia de ondas e aumentando a eficiência do conversor Pelamis) e aumentando a potência eólica quatro vezes (comparado ao plano D) para 32 kWh/d/p, de forma que o vento forneça 64% de toda a eletricidade. Isto é um aumento de 120 vezes nos atuais níveis de potência eólica da Grã-Bretanha. Sob este plano, a energia eólica *do mundo* em 2008 é multiplicada por 4, com todo o aumento sendo alocado na ou em volta das Ilhas Britânicas.



Figura 27.7. Plano V

³¹ *Green Party* em inglês, ou Partido Verde.

A imensa dependência do plano V em renováveis, especialmente vento, cria dificuldades para o nosso método principal de balancear fornecimento e demanda, ou seja, ajustando a taxa de carga de milhões de baterias recarregáveis para transporte. Então no plano V nós temos que incluir substancial número adicional de instalações de armazenamento bombeado, capazes de balancear as flutuações do vento em uma escala de tempo de dias. Instalações de armazenamento bombeado iguais a 400 Dinorwigs podem substituir completamente o vento por uma calmaria nacional que dure 2 dias. Aproximadamente 100 dos maiores lagos e lagoas da Grã-Bretanha seriam necessários aos sistemas de armazenamento bombeado associado aos sistemas eólicos.

A divisão da eletricidade do plano Vé mostrada a seguir. Vento: 32 kWh/d/p (80 GW em média) (mais 4000 GWh de instalações de armazenamento bombeado associadas). Solar fotovoltaica: 3 kWh/d/p. Hidroeletricidade e incineração de resíduos: 1,3 kWh/d/p. Ondas: 3 kWh/d/p. Marés: 3,7 kWh/d/p. Potência solar em desertos: 7 kWh/d/p.

Este plano recebe 14% da sua eletricidade de outros países.

Produzindo muita eletricidade - plano E

O "e" vem de "economia". O quinto plano é um palpite aproximado do que pode acontecer em um mercado de energia liberado com um alto preço de carbono. Em um nível de campo de jogo econômico com um alto preço para evitar a emissão de CO₂, nós não esperamos uma solução diversa com uma ampla gama de custos de potência; ao invés disso, nós esperamos uma solução ótima que forneça potência necessária ao menor custo. E quando o "carvão limpo" e a energia nuclear ficam parelhas em termos de preço, é a nuclear que vence. (Engenheiros no gerador de eletricidade do Reino Unido me disseram que o custo capital de estações de potência de carvão *normal* é de £1 bilhão por GW, cerca do mesmo que a nuclear; porém o custo capital da energia de "carvão limpo", incluindo a captura e armazenamento de carbono, é aproximadamente £2 bilhões por GW.) Eu assumi que a energia solar no deserto de outras pessoas perde para a energia nuclear quando nós levamos em conta o custo nas linhas de transmissão de 200 km de comprimento necessárias (apesar de que van Voorthuysen (2008) afirma com desenvolvimentos na produção de combustíveis químicos por

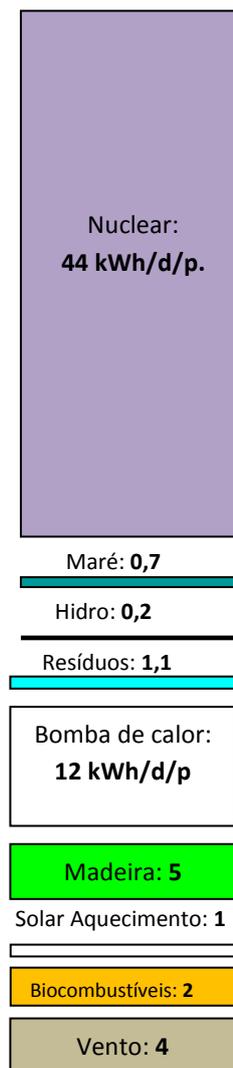


Figura 27.8. Plano E

energia que valem prêmio Nobel, a energia solar em desertos seria economicamente igual à energia nuclear). A eólica em mar também perde para a nuclear, mas eu assumi que a eólica em terra custa o mesmo que a nuclear.

Aqui está da onde o plano E retira seus 50 kWh/d/p de eletricidade. Vento: 4 kWh/d/p (média de 10 GW). Solar fotovoltaica: 0; Hidroeletricidade e incineração de resíduos: 1,3 kWh/d/p. Ondas: 0. Marés: 0,7 kWh/d/p. E nuclear: 44 kWh/d/p (110 GW).

Este plano tem um aumento de dez vezes na nossa energia nuclear com relação aos níveis de 2007. A Grã-Bretanha teria 110 GW, o que é aproximadamente o dobro do que a frota nuclear Francesa. Eu incluí um pouco de energia das marés porque eu acredito que uma instalação de lagoa de maré bem projetada possa competir com a energia nuclear.

Neste plano, a Grã-Bretanha não possui importações de energia (exceto para o urânio, o que, como dito antes, não é convencionalmente contabilizado como importação).

A figura 27.9 mostra os cinco planos.

Como estes planos se relacionam com consumo de carbono e viagens aéreas

Em um mundo do futuro, onde a poluição de carbono tem um preço apropriado para prevenir mudanças climáticas catastróficas, nós estaremos interessados em qualquer esquema de energia que puder a um baixo custo colocar o carbono extra em um buraco na terra. Tais projetos de neutralização do carbono podem nos permitir continuar voando nos níveis de 2004 (enquanto o petróleo durar). Em 2004, a média das emissões de CO₂ do Reino Unido dos vãos foi 0,5 t CO₂ por ano por pessoa. Contabilizando o total de impacto de gases de efeito estufa por causa dos vãos, talvez as emissões efetivas sejam cerca de 1 t CO₂e por ano por pessoa. Agora, em todos esses cinco planos eu assumi que um oitavo do Reino Unido era devotado à produção de plantações de energia que eram então utilizadas para o aquecimento ou para a combinação de calor e potência. Se ao invés disso nós direcionássemos todas estas culturas energéticas para estações de potência com captura e armazenamento de carbono - as plantas de "carvão limpo" que foram caracterizadas em três dos planos - então a quantidade extra de CO₂ capturado seria 1 t CO₂ por ano por pessoa. Se os incineradores municipal e agrícola fossem alocados em plantas

1 tCO₂e significa emissões de gases de efeito estufa equivalentes a uma tonelada de CO₂.

de carvão limpo também elas poderiam dividir a mesma chaminé e então o total capturado seria aumentado para 2 t CO₂ por ano por pessoa. Este arranjo teria custos adicionais: a biomassa e os resíduos talvez teriam que ser transportados por maiores distâncias; o processo de captura de carbono necessitaria de uma fração significativa de energia das plantações; e o aquecimento de edificações que foi perdido teria que ser substituído por mais bombas de calor de fonte de ar. Mas, se a neutralidade de carbono é o nosso objetivo, valeria à pena planejar para mais adiante procurando alocar novas plantas de carvão limpo com incineradores de resíduos em regiões próximas a locais potenciais para plantações de biomassa.

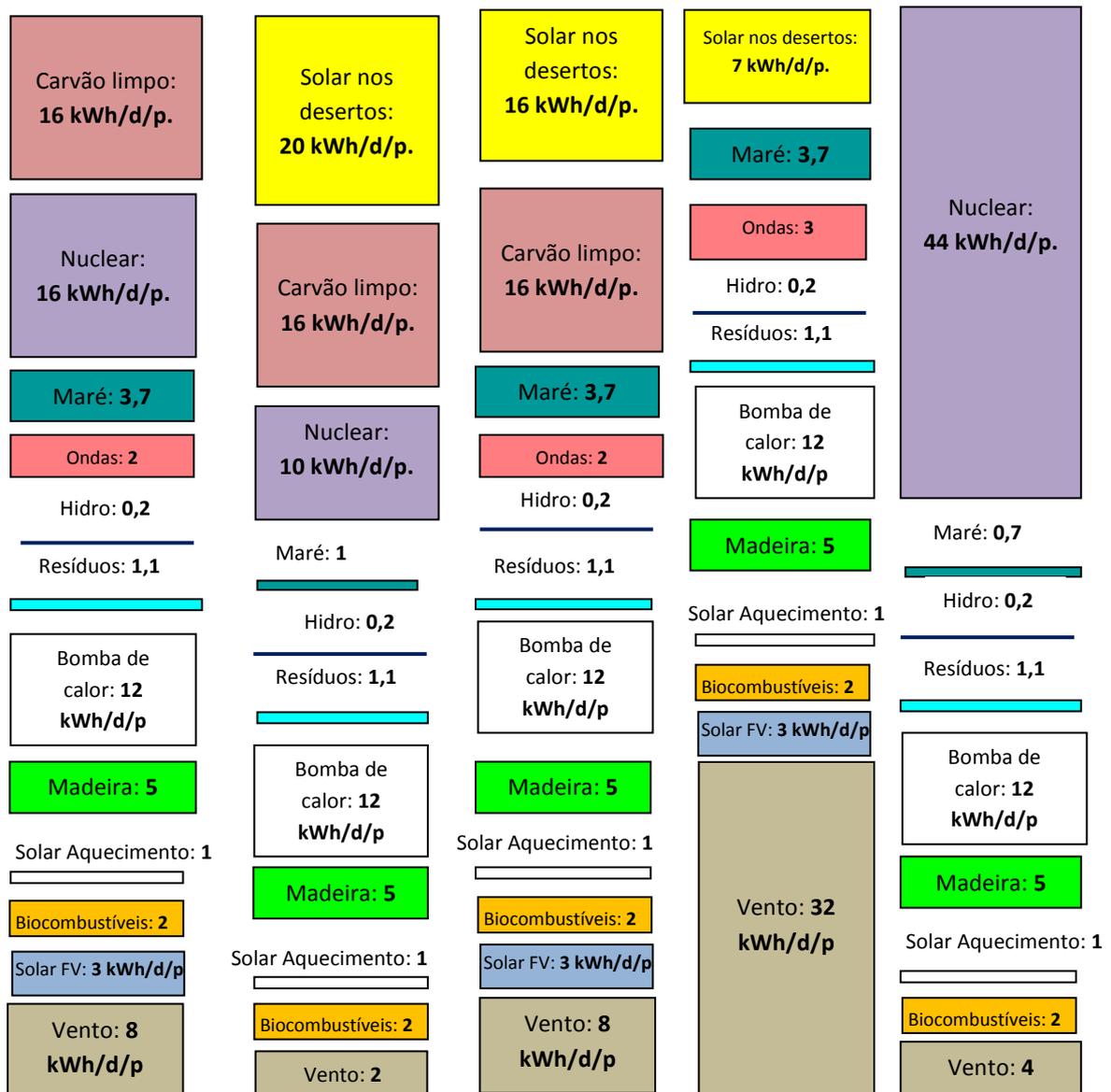


Figura 27.9. Todos os cinco planos.

Todos estes planos são absurdos!

Se você não gosta destes planos, eu não estou surpreso. Eu concordo que há algo de intragável em cada um deles. Sinta-se livre para fazer outros planos que sejam mais do seu gosto. Mas tenha certeza que eles façam a diferença!

Talvez você conclua que um plano viável tenha que envolver menos potência de consumo per capita. Eu posso concordar com isto, mas é uma política difícil de vender - lembre-se da resposta de Tony Blair (p286) quando alguém sugeriu que ele deveria voar para o exterior durante as férias com menos frequência!

Alternativamente, você pode concluir que nós temos uma densidade populacional muito grande, e que um plano viável requer menos pessoas. Novamente, uma política difícil de vender.

Observações e Leitura Complementar

Nº da página

267 Incinerar 1 kg por dia por pessoa de resíduos produz aproximadamente 0,5 kWh/d por pessoa de eletricidade.

O poder calorífico dos resíduos sólidos municipais é cerca de 2,6 kWh por kg; as estações de potência queimando resíduos produzem eletricidade com uma eficiência de cerca de 20%. Fonte: guia de tours da SELCHP.

268 Figura 27.3. Dados da Eurostat, www.epa.gov, e www.esrcsocietytoday.as.uk/ESRCInfoCentre/.

272 As políticas dos Democratas Liberais. Veja www.libdems.org.uk; [5os7dy], [yrw2oo].

28 Colocando os planos em perspectiva

Um plano no mapa

Deixe-me tentar deixar clara a escala dos planos do capítulo anterior mostrando a você um mapa da Grã-Bretanha contendo um sexto plano. O sexto plano fica no meio dos cinco primeiros planos, então eu o chamo de plano M (figura 28.1).

As áreas e custos aproximados destas instalações são mostrados na tabela 28.3. Por simplicidade, os custos financeiros são estimados utilizando-se os preços atuais de instalações parecidas, muitas das quais são protótipos iniciais. Nós podemos esperar que muitos dos preços caiam significativamente. Os preços aproximados dados aqui são os custos de construção, não incluindo os custos de operação e de desativação. Os custos "por pessoa" são encontrados ao dividir o custo total por 60 milhões. Por favor lembre-se, este não é um livro de economia - que necessitaria outras 400 páginas! Eu estou fornecendo estas estimativas de preços apenas para dar uma indicação *aproximada* do custo que nós devemos esperar ver em um plano que faça a diferença.

Eu gostaria de enfatizar que eu não estou defendendo este plano em particular - ele inclui diversas características que eu, como ditador da Grã-Bretanha, não escolheria. Eu deliberadamente incluí todas as tecnologias disponíveis, de modo que você possa tentar montar seus próprios planos com outras misturas.

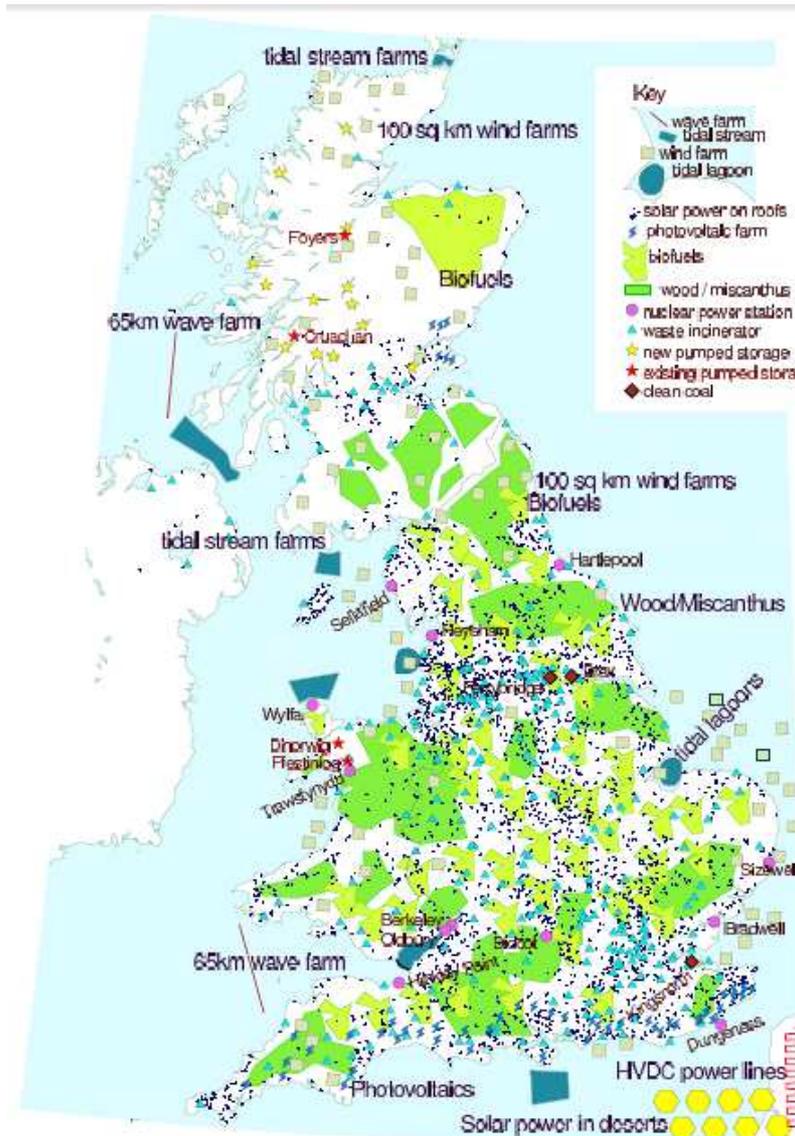
Por exemplo, se você disser que "a fotovoltaica será muito cara, eu gostaria de um plano com mais energia das ondas ao invés disto", você pode ver como fazê-lo: você precisa aumentar os parques de ondas oito vezes. Se você não gosta da localização dos parques eólicos, sintá-se à vontade para movê-los (mas para onde?). Mantenha em mente que manter mais deles no mar aumentará os custos. Se você preferir menos parques eólicos, sem problemas - apenas especifique quais das outras tecnologias você preferiria no lugar. Você pode substituir cinco dos parques eólicos de 100 km² ao adicionar uma estação de energia nuclear de 1 GW, por exemplo.

Talvez você ache que este plano (como cada um dos planos do capítulo anterior) dedica áreas exageradamente grandes para os biocombustíveis. Muito bem: você pode então concluir que a demanda para combustíveis líquidos para o transporte deve ser reduzida para menos do que os 2 kWh por



Figura 28.1 Plano M.

dia por pessoa que este plano assumiu; ou que os combustíveis líquidos devem ser criados de outro modo.



O custo de mudar de combustíveis fósseis para renováveis

Todo parque eólico custa alguns milhões de libras para ser construído e fornecer alguns megawatts. Como um valor estimado muito aproximado em 2008, instalar um watt de capacidade custa uma libra; um quilowatt custa 1000 libras; um megawatt de eólica custa um milhão de libras; um gigawatt de nuclear custa um bilhão, ou talvez dois. Outras renováveis são mais caras. Nós (o Reino Unido) atualmente consumimos uma potência total de aproximadamente 300 GW, a maioria sendo de combustíveis fósseis. Então nós podemos prever que

Figura 28.2. Um plano que faça a diferença para a Escócia, Inglaterra e País de Gales.

Os quadrados verdes são parques eólicos. Cada um com tamanho de 100 km² é mostrado em escala.

As linhas vermelhas no mar são parques de ondas, mostrados em escala.

Polígonos na forma de raios de cor azul clara: parques solares fotovoltaicos - 20 km² cada, mostrados em escala.

Polígonos com pontas afiadas azuis no mar: parques de marés. Gotas azuis no mar (Blackpool e Wash): lagoas de marés.

Áreas de terra em verde-claro: madeiras e bosques de pequeno porte (em escala).

Áreas amarelo-esverdeadas: biocombustível (em escala).

Pequenos triângulos azuis: plantas de incineração de resíduos (fora de escala).

Grandes diamantes marrons: estações de potência de carvão limpo, com co-incineração de biomassa, e captura e armazenamento de carbono (fora de escala).

Pontos roxos: estações de energia nuclear (fora de escala) - 3,3 GW de produção em média em cada um dos 12 lugares.

Hexágonos amarelos ao longo do canal: instalações solares de concentração em desertos remotos (em escala, 335 km² cada). A linha ondulada rosa na França representa novas linhas HVDC, 2000 km de comprimento, transportando 40 GW de desertos remotos para o Reino Unido.

Estrelas amarelas na Escócia: novas instalações de armazenamento bombeado.

Estrelas vermelhas: instalações de armazenamento bombeado já existentes.

Pontos azuis: painéis solares para água quente em todos os telhados.

uma grande mudança de combustíveis fósseis para renováveis e/ou nuclear necessitará 300 GW aproximadamente de renováveis e/ou nuclear e então ter um custo estimado de £300 bilhões.

	Capacidade	Custo aproximado		Potência média fornecida
		total	por pessoa	
52 parques eólicos em terra: 5200 km ²	35 GW	£27bn	£450	4,2 kWh/d/p
29 parques eólicos no mar: 2900 km ²	29 GW	£36bn	£650	3,5 kWh/d/p
Armazenamento bombeado: 15 instalações similares a Dinorwig	30 GW	£15bn	£250	
Parques fotovoltaicos: 1000 km ²	48 GW	£190bn	£3200	2 kWh/d/p
Painéis solares de água quente: 1 m ² de painel em telhado por pessoa (50 km ² total)	2,5 GW(th) (média)	£72bn	£1200	1 kWh/d/p
Incineradores de resíduos: 100 novos incineradores de 30	3 GW	£8,5bn	£140	1,1 kWh/d/p
Bombas de calor	210 GW(th)	£60bn	£1000	12 kWh/d/p
Parques de ondas - 2500 Pelamis, 130 km de mar	1,9 GW (0,76 GW média)	£6bn?	£100	0,3 kWh/d/p
Barragem Severn: 550 km ²	8 GW (2 GW média)	£15bn	£250	0,8 kWh/d/p
Lagoas de marés: 800 km ²	1,75 GW média	£2,6bn?	£45	0,7 kWh/d/p
Correntes de marés: 15 000 turbinas - 2000 km ²	18 GW (5,5 GW média)	£21bn?	£350	2,2 kWh/d/p
Energia nuclear: 40 estações	45 GW	£60bn	£1000	16 kWh/d/p
Carvão limpo	8 GW	£16bn	£270	3 kWh/d/p
Energia solar de concentração em desertos: 2700 km ²	40 GW média	£340bn	£5700	16 kWh/d/p
Terra na Europa para 1600 km de linhas de potência HVDC: 1200 km ²	30 GW	£1bn	£15	
200 km de linhas de potência HVDC: 5200 km ²	30 GW	£1bn	£15	
Biocombustíveis: 30 000				2 kWh/d/p
Medeira/Miscanthus: 31 000 km ²				5 kWh/d/p

Tabela 28.3. Áreas de terra e mar necessárias para o plano M, e custos aproximados. Custos com um ponto de interrogação são para tecnologias onde nenhum custo preciso já foi disponibilizado a partir dos protótipos. "1GW(th)" significa um GW de potência térmica.

Os custos aproximados na tabela 28.3 somam £870bn³², com as instalações de energia solar dominando o total - a fotovoltaica custa £190bn e as estações de energia solar de concentração £340bn. Ambos estes custos podem diminuir dramaticamente no que nós formos aprendendo ao produzi-

³² N.T. Bilhões

los. Um boletim do governo que vazou pelo *the Guardian* em agosto de 2007 estimava que atingir "20% até 2020" (isto é, 20% de toda a energia ser de fontes renováveis, o que necessitaria um aumento na potência renovável de 80 GW) poderia custar "até £22 bilhões" (o que daria em média £1,7 bilhões por ano). Mesmo que esta estimativa seja menor do que os £80 bilhões que a regra geral que eu acabei de mencionar teria sugerido, os autores do boletim vazado parecem ver £22 bilhões como um custo "irracional", preferindo uma meta de apenas 9% de renováveis. (Outra razão que eles dão para não gostarem da meta "20% até 2020" é que as economias de gases de efeito estufa resultantes "arriscam fazer o regime de comércio de emissões da Europa redundante". Pensamento aterrorizante!)

Outras coisas que custam um bilhão

Bilhões são números grandes e difícil de sentir. Para tentar ajudar a colocar o custo de chutar os combustíveis fósseis em perspectiva, vamos agora listar outras coisas que vêm em bilhões de libras, ou em bilhões por ano. Eu também expressarei muitos destes gastos "por pessoa", dividindo o total por um número apropriado de população.

Talvez a quantidade mais relevante para comparar com é o dinheiro que nós *já* gastamos em energia todos os anos. No Reino Unido, o dinheiro gasto com energia por usuários finais é £75 bilhões por ano, e o valor total do mercado de toda a energia consumida é £130 bilhões por ano. Então a ideia de gastar £1,7 bilhões por ano em investimentos na infraestrutura energética do futuro não parece ser algo irracional - isto é menos do que 3% do nosso gasto atual com energia!

Outra boa comparação para fazer é com o nosso gasto anual com seguro: alguns dos investimentos que nós precisamos fazer oferecem um retorno incerto - assim como o seguro. Os indivíduos e os negócios no Reino Unido gastam £90bn por ano em seguro.

Subsídios

£56 bilhões por 25 anos: o custo para desativação das usinas nucleares do Reino Unido. Este é o valor de 2004; em 2008 isto chegou a £73 bilhões (£1200 por pessoa no Reino Unido). [6eoyhg]



Figura 28.4. A M1, da junção 21 até a 30.

Transporte

£4,3 bilhões: O custo do Terminal 5 do Aeroporto Heathrow de Londres (£72 por pessoa no Reino Unido).

£1,9 bilhões: o custo do alargamento de 91 km da M1 (da junção 21 até a 30, figura 28.4). [yu8em5]. (£32 por pessoa no Reino Unido).

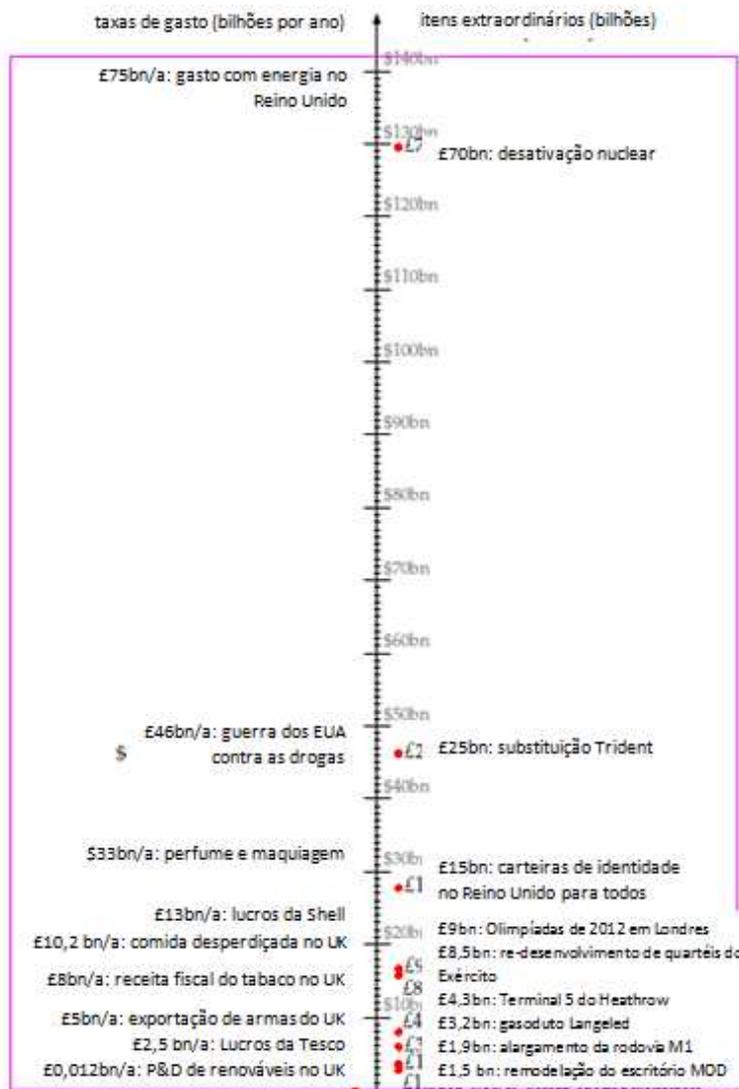


Figura 28.5. Coisas que chegam aos bilhões. A escala para baixo do centro possui grandes intervalos de \$10 bilhões e pequenos intervalos de \$1 bilhão.

Ocasões especiais

Custo das Olimpíadas de 2012 em Londres: £2,4 bilhões; não, me desculpe, £5 bilhões [3x2cr4]; ou talvez sejam £9 bilhões[2dd4mz]. (£150 por pessoa[2dd4mz]). (£150 por pessoa no Reino Unido.)

Negócios como sempre

£2,5 bilhões/ano: lucros da Tescó (anunciado em 2007). (£ 42 por ano por pessoa no Reino Unido.)
£10,2 bilhões/a: gastos pelos britânicos em comida que eles não consomem (£170 por ano por pessoa no Reino Unido).
£11 bilhões/a: Lucros da BP (2006).
£13 bilhões/a: Lucros da Royal Dutch Shell (2006).
\$40 bilhões/a: Lucros da Exxon (2006).
\$33 bilhões/a: Gastos mundiais com perfumes e maquiagens.
\$700 bilhões por ano: Gastos dos EUA com petróleo estrangeiro (2008). (\$2300 por ano por pessoa nos EUA.)



Negócios como sempre do governo

£1,5 bilhões: o custo da remodelagem dos escritórios do Ministério de Defesa. (*Private Eye* No. 1176, 19 de Janeiro de 2007, página 5.) (£25 por pessoa no Reino Unido.)
£15 bilhões: O custo de introduzir o projeto de carteira de identidade no Reino Unido [7vixp]. (£250 por pessoa no Reino Unido.)

Planejamento para o futuro

£3,2 bilhões: o custo para o oleoduto Langeled, que transporta gás dos produtores noruegueses para a Grã-Bretanha. A capacidade do oleoduto é de 20 bilhões de m³ por ano, correspondendo a uma potência de 25 GW. [6x4nvu] [39g2wz] [3ac8sj]. (£53 por pessoa no Reino Unido.)

Impostos no tabaco e semelhantes

£8 bilhões/a: receita anual dos impostos no tabaco no Reino Unido [y7kg26]. (£130 por ano por pessoa no Reino Unido.) A União Europeia gasta cerca de €1 bilhões por ano subsidiando o cultivo de tabaco. www.ash.org.uk.
\$46 bilhões/a: Custo anual do "combate às drogas" dos EUA. [r9fcf] (\$150 por ano por pessoa nos EUA.)

Espaço

\$1,7 bilhões: o custo de um ônibus espacial (\$6 por pessoal nos EUA).

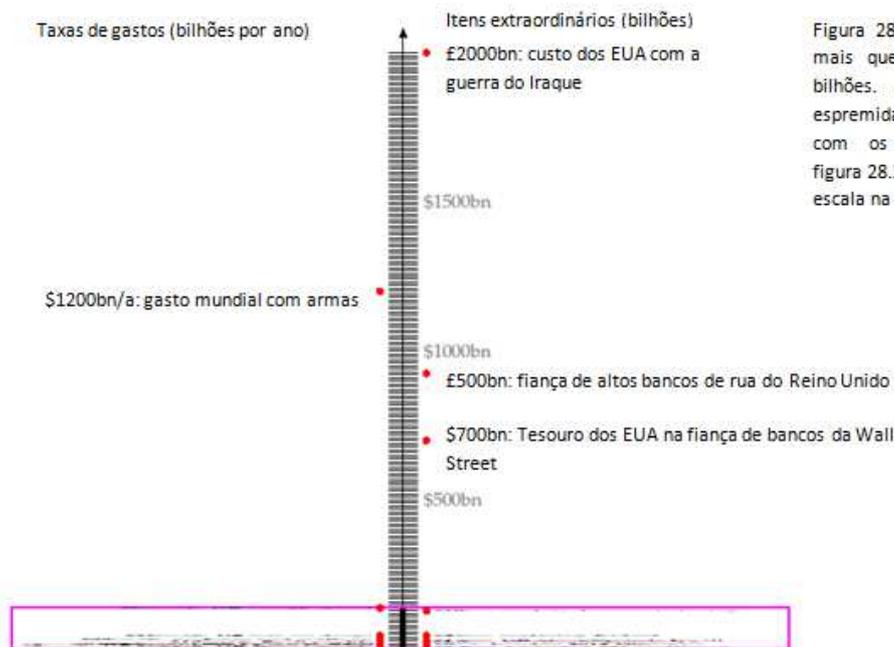


Figura 28.6. Algumas coisas a mais que podem chegar aos bilhões. A escala vertical é espremida 20 vezes comparada com os valores anteriores, figura 28.5, que é mostrada em escala na caixa magenta.

Bancos

\$700 bilhões: em outubro de 2008, o governo americano destinou \$700 bilhões para resgatar Wall Street, e...

£500 bilhões: o governo do Reino Unido destinou £500 bilhões para resgatar os bancos britânicos.

Militar

£5 bilhões por ano: Exportação de armas do Reino Unido (£83 por ano por pessoa no Reino Unido), dos quais £2,5 bilhões vão para o Oriente Médio, e £1 bilhão vai para a Arábia Saudita. Fonte: Observer, 3 de dezembro de 2006.

£8,5 bilhões: custo do desenvolvimento de quartéis do exército em Aldershot e Salisbury Plain. (£140 por pessoa no Reino Unido.)

£3,8 bilhões: o custo de dois novos porta-aviões (£63 por pessoa no Reino Unido).
news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm

\$4,5 bilhões por ano: o custo de produzir novas armas nucleares - o orçamento do Departamento de Energia dos EUA destina pelo menos \$4,5 bilhões por ano para atividades de "estocagem de arsenal" para manter o arsenal nuclear *sem* testes nucleares e *sem* produção em larga escala de novas armas. (\$15 por ano por pessoa na América.)

£10-25 bilhões: o custo de substituir Trident, o sistema de arma nuclear britânico. (£170-420 por pessoa no Reino Unido.) [ysncks]

\$63 bilhões: Doação Americana de "auxílio militar" (i.e, armamento) para o Oriente Médio por mais de 10 anos - aproximadamente metade para Israel e metade para os estados árabes [2vq59t]. (\$210 por pessoa nos EUA.)

\$1200 bilhões por ano: gasto mundial em armas [ym46a9]. (\$200 por ano por pessoa no mundo.)

\$200 bilhões ou mais: o custo, para os EUA, da [99bpt] guerra do Iraque de acordo com o economista vencedor do Prêmio Nobel Joseph Stiglitz. (\$7000 por pessoa na América.)

De acordo com o Relatório Stern, o custo global para evitar alterações perigosas no clima (se nós agirmos agora) é de \$440 bilhões por ano (\$440 por ano por pessoa, se nós dividirmos igualmente entre as 1 bilhão de pessoas mais ricas). Em 2005, o governo dos EUA gastou sozinho \$480 bilhões em guerras e preparação para guerras. O gasto militar total dos 15 países que mais gastam com o exército foi de \$840 bilhões.

*Gastos que **não** chegam aos bilhões*

£0,012 bilhões por ano: o menor item mostrado na figura 28.5 é o investimento anual do governo em pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis. (£0,20 por pessoa no Reino Unido, por ano.)

Observações e Leitura Complementar

N pg

278 **Figura 28.2.** Eu assumi que os parques solares fotovoltaicos possuem uma potência por unidade de área de 5 W/m^2 , o mesmo que o parque na Bavária na p50, então cada parque no mapa fornece 100 MW em média. A produção total média deles seria 5 GW, o que requer aproximadamente 50 GW de capacidade de pico (isto é 16 vezes a capacidade fotovoltaica da Alemanha em 2006).

Os hexágonos amarelos representando a energia solar de concentração possuem uma potência média de 5 GW cada; são necessários dois destes hexágonos para alimentar uma das "gotas" do Capítulo 25.

- 280 Um boletim do governo que vazou pelo *the Guardian*...
O boletim do *the Guardian* disse, em 13 de agosto de 2007, [2bmuod] "autoridades do governo informaram secretamente ministros que a Grã-Bretanha não possui esperança de chegar remotamente perto do objetivo de energias renováveis da União Europeia que Tony Blair assinou na primavera - e sugeriram que eles encontrassem meios de escapar disto".
O documento vazado está em [3g8nn8].
- 282 ...perfume... Fonte: Worldwatch Institute.
www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07
- 284 ...guerras e preparação para guerras...
www.conscienceonline.org.uk
- Investimentos do governo em pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis... Em 2002-3, o Governo do Reino Unido se comprometeu em investir £12,2 milhões com pesquisa e desenvolvimento relacionados à energias renováveis.
Fonte: House of Lord Science and Technology Committee, 4º Boletim de Seção 2003-04. [3jo7q2]
Comparativamente pequena é a alocação do governo para o Programa de Edificações de Baixo Carbono³³, £0,018bn/a divididos entre vento, biomassa, aquecimento de água solar/fotovoltaica, bombas de calor de fonte subterrânea, micro-hidro e micro PCH.

³³ *Low Carbon Buildings Programme.*

29 O que fazer agora

A não ser que nós ajamos agora, não em algum tempo no futuro mas agora, estas consequências, desastrosas como elas são, serão irreversíveis. Então não há nada mais sério, mais urgente ou que demande maior liderança.

Tony Blair, 30 de outubro de 2006.

são um pouco impraticáveis, na verdade...

Tony Blair, dois meses depois, respondendo à sugestão de que ele deveria *mostrar* liderança não voando para Barbados nos feriados.

O que nós podemos fazer depende, em parte, da nossa motivação. Lembre-se que na página 6 nós discutimos três motivações para parar de utilizar combustíveis fósseis: o fim de combustíveis fósseis baratos; segurança de fornecimento; e mudanças climáticas. Vamos assumir primeiro que nós temos a motivação das mudanças climáticas - que nós queremos reduzir as emissões de carbono radicalmente. (Qualquer um que não acredite em mudanças climáticas pode pular esta seção e nos encontrar novamente na página 288)

O que fazer a respeito da poluição de carbono

Nós não estamos a caminho de um futuro zero-carbono. Investimentos de longo prazo não estão acontecendo. Companhias de sequestro de carbono não estão engrenando, apesar dos conselhos dos especialistas em clima e especialistas em economia serem parecidos de que sugar dióxido de carbono do ar muito provavelmente será necessário para evitar perigosas mudanças climáticas. O carbono não está nem sendo capturado em alguma estação de potência de carvão (exceto por um pequeno protótipo na Alemanha).

Por que não?

O problema principal é que a poluição de carbono não tem um preço correto. E não há confiança de que vão dar um preço correto para ela no futuro. Quando eu digo "correto", eu quero dizer que o preço de emitir dióxido de carbono deveria ser grande o suficiente para que toda estação de potência de carvão em operação tenha captura de carbono instalada nela.

Resolver as mudanças climáticas é um tópico complexo, mas em uma única pincelada rápida, aqui está a solução: o preço do dióxido de carbono deve ser tal que as pessoas *parem de queimar carvão sem captura de carbono*. A maior parte da solução é capturada nesta única pincelada rápida porque, em longo prazo, carvão é o grande combustível fóssil. (Tentar reduzir as emissões do petróleo e gás é de importância secundária porque espera-se que ambos os fornecimentos de petróleo e gás declinem nos próximos 50 anos.)

Então o que os políticos precisam fazer? Eles precisam garantir que todas as estações de potência a carvão trabalhem com captura de carbono. O primeiro passo para este objetivo é que o governo financie um projeto de demonstração de larga escala para aperfeiçoar a tecnologia para captura e armazenamento de carbono; segundo, os políticos precisam alterar as regulamentações de longo prazo para estações de potência para que a tecnologia aperfeiçoada seja utilizada em todo lugar. Minha simples sugestão para este segundo passo é aprovar uma lei que diga que - a partir de alguma data - *todas as estações de potência de carvão devem utilizar a captura de carbono*. Contudo, políticos mais democráticos parecem pensar que o modo de fechar uma porta estável é criar um mercado que permita deixar as portas abertas. Então, se nós estamos em conformidade com o dogma de que mudanças climáticas devem ser resolvidas através de mercados, qual é a maneira baseada no mercado de garantir que nós atinjamos nosso simples objetivo - que todas as estações de potência de carvão tenham captura de carbono? Bem, nós podemos brincar com o comércio de carbono - o comércio de licenças para emitir carbono e de certificados de captura de carbono, com um certificado de uma tonelada de captura de carbono sendo convertível em licenças de uma tonelada de emissão de carbono. Mas os proprietários de estações de potência de carvão só investirão na captura e armazenamento de carbono se eles estiverem convencidos que o preço do carbono será alto o suficiente e por tempo o suficiente para que as instalações de captura de carbono se paguem. Especialistas dizem que garantia a longo prazo no preço do carbono de algo como \$100 por tonelada de CO₂ fará o trabalho.

Então os políticos precisam concordar em reduções de longo prazo de CO₂ que sejam suficientemente fortes para que os investidores tenham a confiança de que o preço do carbono aumentará permanentemente para pelo menos \$100 por ton de CO₂. Alternativamente, eles poderiam emitir licenças de

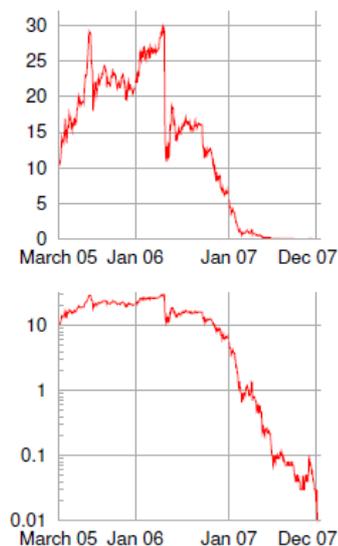


Figura 29.1. Aquilo foi inútil! O preço, em euro, de uma tonelada de CO₂ sobre o primeiro período do esquema europeu de comércio de emissões de carbono. Fonte: www.eex.com.

poluição de carbono em um leilão com um preço mínimo fixado. Outra maneira seria os governos subscreverem investimentos em captura de carbono garantindo que eles vão resgatar certificados de captura de carbono por \$100 por ton de CO₂, independente do que aconteça com o mercado das licenças de emissão de carbono.

Eu ainda me pergunto se seria mais sábio fechar uma porta estável diretamente, ao invés de brincar com um mercado internacional que possui meramente a *intenção* de encorajar o fechamento estável de portas.

A política energética da Grã-Bretanha não soma. Ela não fornecerá segurança. Ela não atingirá os nossos compromentimentos em mudanças climáticas. Ela chega perto do que os países mais pobres do mundo precisam atingir.

Lord Patten of Barnes, Presidente da força-tarefa de Oxford sobre energia e alterações climáticas, 4 de junho de 2007.

O que fazer sobre o fornecimento de energia

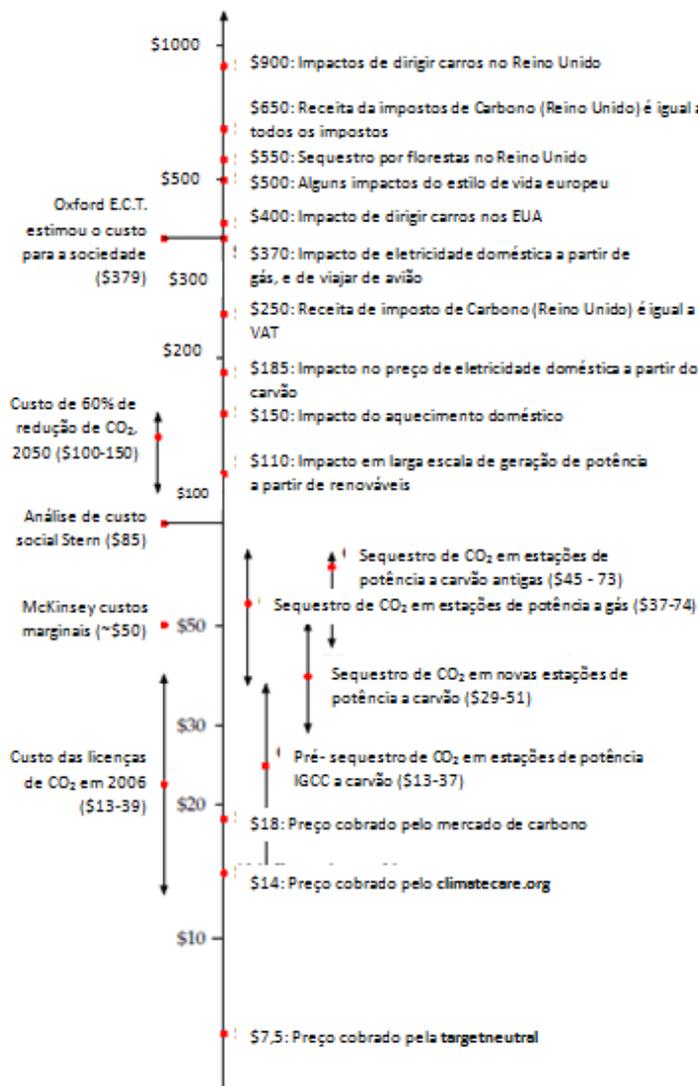
Vamos agora expandir o nosso conjunto de motivações e assumir que nós queremos parar de utilizar combustíveis fósseis para garantir a segurança de fornecimento de energia.

O que nós podemos fazer para trazer o desenvolvimento do fornecimento de energia não fóssil, e de medidas de eficiência? Uma atitude é "Apenas deixe o mercado cuidar disto. No que os combustíveis fósseis se tornarem caros, as renováveis e a energia nuclear se tornarão relativamente mais baratas, e o consumidor racional preferirá tecnologias eficientes." Eu acho estranho que as pessoas tenham tanta fé nos mercados, dada a frequência com que o mercado nos dá prosperidade e depressão econômica, crises de crédito e colapso dos bancos. Os mercados podem ser uma boa maneira de fazer decisões de curto prazo - sobre investimentos que se pagarão em dez anos mais ou menos - mas nós podemos esperar que os mercados façam um bom trabalho para tomar decisões sobre energia, decisões cujos impactos durarão muitas décadas ou séculos?

Se o mercado livre tem permissão para construir casas, nós terminamos com casas que são pouco isoladas. Casas modernas só são mais eficientes energeticamente graças à legislação.

O mercado livre não é responsável pela construção de estradas, ferrovias, corredores dedicados a ônibus,

estacionamentos ou ciclovias. Mas a construção de estrada a provisão de estacionamentos e ciclovias possuem impactos significativos nas escolhas de transportes das pessoas. Similarmente, o planejamento de leis, que determinam onde residências e locais de trabalho podem ser criados e quão densamente as casas podem ser empacotadas na área, possuem uma incrível influência no comportamento futuro de viagem das pessoas. Se uma nova cidade que não possui estação ferroviária é criada, é improvável que os residentes desta cidade farão viagens de longa distância por trem. Se as residências e os locais de trabalho estiverem mais do que alguns quilômetros longes um do outro, muitas pessoas sentirão que não possuem opção a não ser ir de carro para o trabalho.



Um dos maiores ralos de energia é a produção de objetos; em um mercado livre, muitos produtores nos fornecem objetos com

Figura 29.2. Que preço o CO₂ teria que ter para levar a sociedade a fazer mudanças significativas na poluição de CO₂?

O diagrama mostra os custos de dióxido de carbono (por tonelada) nas quais investimentos particulares se tornarão econômicos, ou comportamentos particulares se tornarão impactantes, assumindo que resulte um maior impacto comportamental em atividades como voar e dirigir se o custo do carbono dobrar o preço da atividade.

No que o preço aumenta para \$20-70 por tonelada, CO₂ poderia se tornar suficientemente custoso de forma que seria econômico adicionar a captura de carbono em novas e antigas estações de potência.

Um preço de \$110 por tonelada transformaria projetos de geração de eletricidade de larga escala por renováveis que atualmente custam 3p por kWh a mais do que o gás dos gasodutos em aventuras financeiramente viáveis. Por exemplo, a barragem proposta de Severn produziria energia das marés com um custo de 6p por kWh, o que são 3,3p acima do preço típico de venda de 2,7p por kWh; se cada 1000 kWh da barragem evitassem a poluição de 1 ton CO₂ a um valor de \$60 por ton, a barragem de Severn mais do que pagaria por ela mesma.

À \$150 por tonelada, usuários domésticos de gás notariam o custo do carbono nas suas contas de aquecimento.

A um preço de \$250 por tonelada o barril de petróleo aumentaria seu custo efetivo em \$100.

À \$370, a poluição por carbono custaria o suficiente para reduzir significativamente a inclinação das pessoas a viajarem de avião.

À \$500 por ton, europeus de classe média que não mudassem seu estilo de vida gastariam 12% dos gastos com carbono ao dirigirem, viajarem de avião, e aquecerem suas residências com gás.

E à \$900 por ton, o custo do carbono ao dirigir seria notável.

obsolescência planejada, objetos que devem ser jogados fora e substituídos, gerando mais negócios para os produtores.

Então enquanto os mercados podem cumprir um papel, é estúpido dizer "vamos deixar o mercado cuidar *de tudo*." Com certeza nós precisamos falar sobre legislação, regulamentos e impostos.

Deixando os impostos mais verdes

Nós precisamos rever profundamente todos os nossos impostos e taxas. O objetivo é cobrar mais pela poluição - notavelmente combustíveis fósseis - e cobrar menos pelo trabalho.

Nicholas Sarkozy, Presidente da França.

No presente, é muito mais barato comprar um microondas novo, um DVD player, ou um aspirador de pó do que consertar um que esteja com defeito. Isto é loucura.

Esta loucura é em parte causada pelo nosso sistema de impostos, que taxa o trabalho de um homem que conserta microondas, e cerca o trabalho dele com papelada que consome tempo. Ele está fazendo algo *bom*, consertando o meu microondas! - ainda assim o sistema de impostos dificulta para que ele faça o seu negócio.

A ideia de "tornar o sistema de impostos mais verde" é mover os impostos das "coisas boas" como trabalho, para "coisas ruins" como impactos ambientais. Defensores do imposto ambiental sugerem balancear cortes nos impostos das "coisas boas" aumentando de forma equivalente os impostos nas "coisas ruins", de modo que a reforma nos impostos tenha uma receita neutra.

Imposto de carbono

O imposto mais importante a ser aumentado, se nós queremos promover tecnologias livres de combustíveis fósseis, é o imposto do carbono. O preço do carbono precisa ser alto o suficiente para promover o investimento em alternativas para os combustíveis fósseis, e investimentos em questões de eficiência. Observe que esta é exatamente a mesma política que foi sugerida na seção anterior. Então, seja a nossa motivação resolver o problema de mudanças climáticas ou garantir o fornecimento de demanda, a política resultante é a

mesma: nós precisamos que o preço do carbono seja estável e alto. A figura 29.2 indica aproximadamente os vários preços do carbono que são necessários para trazer várias mudanças comportamentais e de investimentos; e os preços bem mais baratos cobrados pelas organizações que dizem "compensar" as emissões de gases de efeito estufa. Qual a melhor forma de organizar o alto preço do carbono? O esquema europeu de comércio de carbono (figura 29.1) é o jeito certo de fazer isto? Esta questão fica dentro do domínio de economistas e especialistas em política internacional. O ponto de vista dos economistas de Cambridge Michael Grubb e David Newberry é que o esquema europeu de comércio de emissões de carbono não fará o trabalho - "os instrumentos atuais não fornecerão uma resposta adequada ao investimento".

O *The Economist* recomenda um imposto de carbono como o mecanismo primário para apoio governamental de fontes de energia limpas. O Grupo de Políticas de Qualidade de Vida do Partido Conservador também recomenda aumentar os impostos ambientais e reduzir outros impostos - "um mudança de *pague o quanto você recebe para pague o quanto você polui*". A Comissão Real de Poluição Ambiental também diz que o Reino Unido deveria introduzir um imposto de carbono. "Ele deveria se aplicar a montante e abranger todos os setores".

Então, há um apoio claro para um grande imposto de carbono, acompanhado pelas reduções de impostos de emprego, impostos corporativos e impostos de valores aditivos. Mas apenas impostos e o mercado sozinhos não trarão todas as ações necessárias. A abordagem imposto-e-mercado falha se os consumidores algumas vezes escolherem irracionalmente, ou se a pessoa escolhendo o que comprar não pagar todos os custos associados com a sua escolha.

De fato, muitas marcas são "*tranquilizadamente caras*". A escolha do consumidor não é determinada somente pelos sinais de preço. Muitos consumidores se preocupam mais com a imagem e percepção, e alguns compram mais caro deliberadamente.

Uma vez que algum objeto ineficiente é comprado, é tarde demais. É essencial que coisas ineficientes não sejam produzidas em primeiro lugar; ou que o consumidor, quando estiver comprando, sintá-se influenciado a não comprar coisas ineficientes.

Aqui estão alguns outros exemplos da falha os mercados livres.

A barreira de admissão

Imagine que os impostos de carbono estão suficientemente altos que um novo aparelho com extremo baixo carbono custaria 5% menos do que o seu rival de longa data de alto carbono, o aparelho Dino, se ele fosse produzido nas mesmas quantidades. Graças à esperta tecnologia, as emissões dos aparelhos Eco são incríveis 90% menores do que as dos aparelhos Dino. Está claro que seria uma coisa boa para a sociedade se todas as pessoas comprassem o aparelho Eco agora. Mas no momento as vendas do novo aparelho Eco estão baixas, então os custos econômicos são maiores do que os dos aparelhos Dino. Apenas alguns abraçadores de árvores e pessoas de jalecos comprarão o aparelho Eco, e a empresa de aparelhos Eco Inc. falirá.

Talvez intervenções governamentais sejam necessárias para a transição do petróleo e para que a inovação tenha uma chance para acontecer. Apoio para pesquisa e desenvolvimento? Incentivos fiscais favorecendo os novos produtos (como os incentivos fiscais que conduziram a transição da gasolina com chumbo para a sem chumbo)?

O problema das pequenas diferenças de custo

Imagine que a Eco Inc. passe de girino a sapo, e que os impostos de carbono são suficientemente altos de modo que o aparelho Eco realmente custe 5% menos do que o seu rival de longa data e alto carbono Dino Inc. Com certeza agora os impostos farão o seu trabalho e todos os consumidores comprarão o aparelho de baixo carbono? Ha! Primeiramente, muitos consumidores não se importam muito com uma diferença de 5% no preço. A imagem é tudo. Em segundo lugar, se eles se sentirem ameaçados pelo aparelho Eco, a Dino Inc. relançará o seu aparelho Dino, enfatizando que ele é mais patriótico, anunciando que agora ele está disponível em verde, e mostrando pessoas legais usando o bom e velho aparelho Dino. "Homens de verdade compram aparelhos Dino". Se isto não funcionar, a Dino lançará notas na imprensa dizendo que cientistas não descartaram a possibilidade de que o uso a longo prazo dos aparelhos Eco possam causar câncer, enfatizando o caso de uma velha senhora que foi morta por um aparelho Eco, ou sugerindo que os aparelhos Eco prejudicam o menor morcego manchado. Medo, incerteza, dúvida. Como um plano reserva, os aparelhos Dino sempre

podem comprar a companhia do aparelho Eco. O produto vencedor não terá nada a ver com a economia de energia se o incentivo ao consumidor for de apenas 5%.

Como resolver este problema? Talvez o governo devesse simplesmente banir a venda dos aparelhos Dino (assim como ele baniu a venda de carros com gasolina com chumbo)?

O problema de Larry e Tina

Imagine que Larry o senhorio aluga um apartamento para Tina a inquilina. Larry é responsável por manter o apartamento e fornecer os aparelhos nele, e Tina paga as contas mensais de aquecimento e eletricidade. Aqui está o problema: Larry não se sente motivado a investir em modificações no apartamento que reduziriam as contas de Tina. Ele poderia instalar lâmpadas mais eficientes, e ligar um refrigerador mais eficiente; estes aparelhos amigáveis ao meio ambiente pagariam com facilidade o custo extra deles ao longo de suas vidas úteis; mas é Tina quem teria os benefícios, não Larry. Similarmente, Larry não se sente motivado a melhorar o isolamento do apartamento ou instalar vidros duplos, especialmente quando ele leva em conta o risco de que o namorado de Tina, Wayne, possa quebrar um dos vidros quando estiver bêbado. Em princípio, em um mercado perfeito, Larry e Tina fariam ambos as decisões "certas": Larry instalaria todas as características de economia de energia, e cobraria de Tina um aluguel levemente mais alto; Tina reconheceria que o apartamento moderno e bem equipado seria mais barato de se viver e ficaria feliz em pagar o aluguel mais alto; Larry exigiria um aumento do depósito no caso dos vidros caros serem quebrados; e Tina responderia racionalmente e baniria Wayne. Contudo, eu não acho que Larry e Tina conseguiriam fornecer um mercado perfeito. Tina é pobre, então possui dificuldades em pagar grandes depósitos. Larry quer muito alugar o apartamento, então Tina desconfia das afirmações dele sobre as contas de baixa energia da propriedade, suspeitando que Larry esteja exagerando.

Então algum tipo de intervenção é necessária, para que Larry e Tina façam a coisa certa - por exemplo, o governo poderia legislar um grandíssimo imposto em aparelhos ineficientes; banir do mercado todos os refrigeradores que não atendem às características de economia; exigir que todos os apartamentos atinjam altos padrões de isolamento; ou introduzir um sistema de avaliação mandatória de

apartamentos independentes, de modo que Tina pudesse ler sobre o perfil energético do apartamento antes de alugá-lo.

Investimento em pesquisa e desenvolvimento

Nós lamentamos as quantidades mínimas que o governo se comprometeu a investir em pesquisa e desenvolvimento relacionadas a energias renováveis (£12,2 milhões em 2002-03) ... Se outros recursos além do vento forem para ser explorados no Reino Unido isto precisa mudar. Nós não podemos evitar a conclusão de que o governo não está levando os problemas energéticos suficientemente à sério.

Casa dos Lords da Ciência e Comitê de Tecnologia

A ausência de entendimento científico com frequência leva à tomada de decisões superficiais. O artigo da energia limpa de 2003³⁴ foi um bom exemplo disto. Eu não chamaria isso publicamente de amadorismo, mas ele não atingiu o problema de uma forma realística.

Sir David King, Ex-assessor científico de chefe de governo

Trabalhando no Conselho de Energias Renováveis do governo... eu senti como se estivesse assistindo várias dúzias de episódios de Yes Minister³⁵ em câmera lenta. Eu não acho que alguma vez este governo tenha falado sério sobre energias renováveis.

Jeremy Leggett, fundador do **Solarcentury**

Eu acho que os números falam por si mesmos. Apenas olhe para a figura 28.5 (P281) e compare os bilhões gastos em reformas de escritórios e brinquedos militares com o comprometimento cem vezes menor com pesquisa e desenvolvimento relacionada à energia renovável. Leva-se décadas para desenvolver tecnologias renováveis tais como a de energia de correntes de marés, energia solar de concentração, e fotovoltaica. A fusão nuclear leva décadas também. Todas estas tecnologias precisam de suporte se for para elas darem certo.

³⁴ No original "Energy White Paper: our energy future - creating a low carbon economy"

³⁵ **Yes Minister** é um seriado cômico britânico transmitido pela BBC entre 1980 e 1984.

Ação individual

As pessoas às vezes me perguntam "o que eu devo fazer?" A tabela 29.3 indica oito ações simples pessoais que eu recomendaria, e uma indicação *muito* aproximada das economias associadas com cada ação. Termos e condições se aplicam. Suas economias dependerão do seu ponto de partida. Os números na tabela 29.3 assumem o ponto de partida acima de um consumidor acima da média.

Ação simples	Possível economia
Coloque um casaco de lã e diminua o termostato do seu aquecedor (para 15 ou 17°, digamos). Coloque termostatos individuais em todos os radiadores. Tenha certeza de que o aquecimento está desligado quando ninguém estiver em casa. Faça o mesmo no trabalho.	20 kWh/d
Leia todos os seus medidores (gás, eletricidade, água) toda semana, e identifique mudanças fáceis para reduzir o consumo (ex, desligar as coisas). Compare competitivamente com um amigo. Leia os medidores no seu local de trabalho também, criando uma auditoria energética perpétua ao vivo.	4 kWh/d
Pare de viajar de avião.	35 kWh/d
Dirija menos, dirija mais devagar, dirija mais gentilmente, pegue carona, use um carro elétrico, ande de bicicleta, caminhe, use trens e ônibus.	20 kWh/d
Continue utilizando aparelhos antigos (ex, computadores); não os substitua antes do tempo.	4 kWh/d
Mude as lâmpadas para fluorescentes ou LED.	4 kWh/d
Não compre besteiras. Evite o acúmulo de tralha.	20 kWh/d
Coma de forma vegetariana, seis dias a cada sete.	10 kWh/d

Tabela 29.3. Oito ações pessoais simples.

Se as ações acima são fáceis de serem implementadas, as na tabela 29.4 demandam um pouco mais de planejamento, determinação e dinheiro.

Ação maior	Possível economia
Elimine vazamentos.	5 kWh/d
Vidro duplo.	10 kWh/d
Melhore o isolamento da parede, do telhado e do piso.	10 kWh/d
Painéis de aquecimento de água solar.	8 kWh/d
Painéis fotovoltaicos.	5 kWh/d
Derrube edificações antigas e substitua por novas.	35 kWh/d
Substitua o aquecimento com combustíveis fósseis por bombas de calor subterrânea ou de fonte de ar.	10 kWh/d

Tabela 29.4. Sete ações mais difíceis.

Finalmente, a tabela 29.5 mostra alguns vice-campeões: algumas ações simples com pequenas economias.

Ação	Possível economia
Lavar roupa com água fria.	0,5 kWh/d
Parar de usar secadores elétricos; utilize um varal de corda ou um varal de chão.	0,5 kWh/d

Tabela 29.5. Mais algumas ações simples com pequenas economias

Observações e Leitura Complementar

Nº da página

286 "São um pouco impraticáveis, na verdade". O transcrição completa da entrevista com Tony Blair (9 de janeiro de 2007) está aqui [2ykfgw]. Aqui estão mais algumas citações dela:

Entrevistador: Você já pensou em talvez não voar para Barbados nos feriados e não consumir todas estas milhas aéreas?

Tony Blair: Eu, francamente, desistiria com relutância de viajar para fora nos meus feriados.

Entrevistador: No entanto, isto mandaria uma mensagem clara, não? Se nós não víssemos aquela grande jornada por ar em direção ao pôr do sol? ... - um feriado mais perto de casa?

Tony Blair: Sim - mas eu pessoalmente acho que estas coisas são um pouco impraticáveis, na verdade, esperar de verdade que as pessoas façam isso. Eu acho que o que nós precisamos fazer é ver como tornar as viagens de avião mais eficientes, como desenvolver combustíveis novos que nos permitirão queimar menos energia e emitir menos. Como - por exemplo - nas novas frotas de aviões, elas serão muito mais eficientes.

Eu sei que todos acham sempre - as pessoas provavelmente acham que o Primeiro Ministro não deveria sair nos feriados, mas eu acho que se o que nós fizemos nesse setor é colocar objetivos não realísticos para as pessoas, você sabe se nós dissermos para as pessoas que nós cancelaremos todas as viagens baratas de aviões... Você sabe, eu ainda estou esperando pelo primeiro político que esteja realmente concorrendo a algum cargo que apareça e diga isto - e eles não o farão.

A outra citação: "A não ser que nós ajamos agora, não em um futuro distante, mas agora, estas consequências, desastrosas como são, serão irreversíveis. Então não há nada mais sério, mais urgente ou que demande mais liderança" é o discurso de Tony Blair no lançamento do Relatório Stern, 30 de outubro de 2006 [2nsvx2]. Veja também [yxq5xk] para mais comentários.

290 **Reforma dos impostos ambientais.** Veja a Comissão Fiscal Verde em, www.greenfiscalcommission.org.uk.

291 **The Economist recomenda um imposto de carbono.** "Nova era da energia nuclear", *The Economist*, 8 de setembro de 2007.

- **O Grupo de Políticas de Qualidade de Vida do Partido Conservador** - Gummer et al. (2007)

30 Planos energéticos para a Europa, América, e o Mundo

A figura 30.1 mostra o consumo de energia de diversos países ou regiões, versus seus respectivos produtos internos brutos (PIBs). Esta é uma suposição bastante divulgada de que o desenvolvimento humano e o crescimento são coisas boas, então quando se esquematiza planos mundiais de energia sustentável eu assumirei que todos os países com baixo PIB per capita progredirá em direção à figura 30.1. E no que seus PIBs aumentam, é inevitável que os seus consumos energéticos aumentem também. Não está claro para qual consumo nós devemos planejar, mas eu acho que o nível do europeu de classe média (125 kWh por dia por pessoa) parece uma suposição razoável; alternativamente, nós poderíamos assumir que as medidas de eficiência, como aquelas vistas na Grã-Bretanha simplificada nos Capítulos 19-28, permita que todos os países atinjam o padrão de vida europeu com um menor consumo de potência. No plano de consumo na p264 o esboço da Grã-Bretanha caiu cerca de 68 kWh/d/p. Tendo-se em mente que o esboço da Grã-Bretanha não possui muita atividade industrial, talvez seria sensível assumir um objetivo levemente mais alto, tal qual os 80 kWh/d/p de Hong Kong.

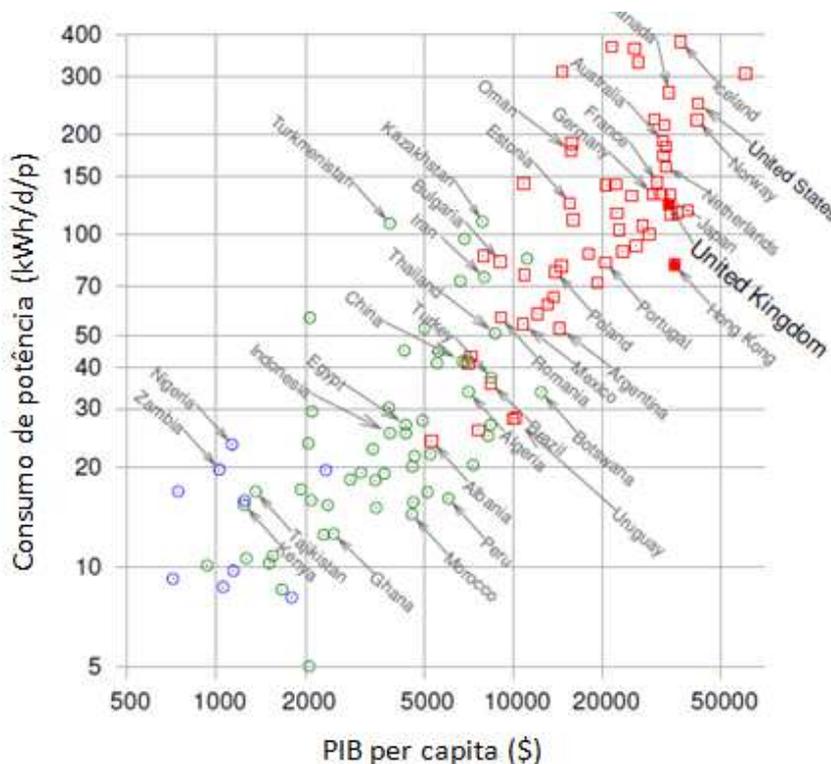


Figura 30.1. Consumo de potência per capita versus PIB per capita, em paridade de potência comprada em dólares americanos.

Dados do Boletim de Desenvolvimento Humano da UNDP, 2007. Os quadrados mostram países tendo "alto desenvolvimento humano"; círculos, "médio" ou "baixo". Ambas variáveis estão em escalas logarítmicas. A figura 18.4 mostra os mesmos dados em escalas normais.

Refazendo os cálculos para a Europa

A Europa pode viver de renováveis?

A densidade populacional média da Europa é aproximadamente metade da Grã-Bretanha, então existe mais área de terra na qual colocar instalações enormes de renováveis. A área da União Europeia é aproximadamente **9000 m² por pessoa**. Contudo, muitas das renováveis possuem menor densidade de potência na Europa do que na Grã-Bretanha: a maior parte da Europa possui menos vento, menos ondas e menos marés. Algumas partes possuem mais hidroelétrica (na Escandinávia e na Europa Central); e algumas partes possuem mais solar. Vamos desenvolver alguns valores aproximados.

Vento

O coração da Europa continental possui menores velocidades típicas de vento do que as Ilhas Britânicas - e grande parte da Itália, por exemplo, as velocidades de vento estão abaixo dos 4 m/s. Vamos assumir que um quinto da Europa possua velocidades de vento grandes o suficiente para parques eólicos econômicos, tendo uma densidade de potência de 2 W/m², e então assumamos que nós daremos a estas regiões o mesmo tratamento que nós demos à Grã-Bretanha no Capítulo 4, preenchendo 10% destas regiões com parques eólicos. A área da União Europeia é aproximadamente 9000 m² por pessoa. Então o vento nos dá

$$\frac{1}{5} \times 10\% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W}$$

o que são **9 kWh/d por pessoa**.

Hidroeletricidade

A produção hidrelétrica na Europa soma um total de 590 TWh/a, ou 67 GW; divididos entre 500 milhões, isto são 3,2 kWh/d por pessoa. Esta produção é dominada pela Noruega, França, Suécia, Itália, Áustria, e Suíça. Se todos os países dobrassem duas instalações de hidroeletricidade - o que eu acho que seria difícil - então a hidroelétrica nos daria **6,4 kWh/d por pessoa**.

Ondas

Pegando-se toda a linha de costa do Atlântico (cerca de 4000 km) e multiplicando por uma suposta taxa de produção média de 10 kWh/m, nós conseguimos **2 kWh/d por pessoa**. As linhas de costa do Mar Báltico e do Mar Mediterrâneo não possuem recurso suficiente de ondas que valha à pena falar sobre.

Marés

Dobrando o recurso total em volta das Ilhas Britânicas (11 kWh/d por pessoa, do Capítulo 14) para levar em conta os recursos de marés franceses, irlandeses e noruegueses, e então dividindo entre a população de 500 milhões, nós conseguimos **2,6 kWh/d por pessoa**. As linhas de costa do Mar Báltico e do Mar Mediterrâneo não possuem recursos de marés que valham à pena ser considerados.

Solar Fotovoltaica e painéis térmicos em telhados

A maioria dos lugares é mais ensolarada do que o Reino Unido, então os painéis solares forneceriam mais potência na Europa continental. 10 m² de painéis fotovoltaicos instalados em telhados forneceriam cerca de **7 kWh/d** em todos os lugares ao sul do Reino Unido. Similarmente, 2 m² de painéis de aquecimento de água poderiam fornecer, em média, **3,6 kWh/d** de energia térmica de baixo nível. (Eu não vejo muito sentido em sugerir ter mais do que 2 m² por pessoa de painéis de aquecimento de água, uma vez que esta capacidade já é o suficiente para saturar a demanda típica de água quente.)

O que mais?

O total até agora é $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/d por pessoa. Os únicos recursos não mencionados até agora são a energia geotérmica, e parques solares de larga escala (com espelhos, painéis ou biomassa).

A energia geotérmica pode funcionar, mas ainda está em estágios de pesquisa. Eu sugiro tratá-la como a energia de fusão nuclear: um bom investimento, mas não podemos contar com ela.

E os parques solares? Nós podemos imaginar utilizar 5% da Europa (450 m² por pessoa) para parques solares



Figura 30.2. Um aquecedor solar de água fornecendo água quente para uma família em Michigan. A bomba do sistema é alimentada por um pequeno painel fotovoltaico à esquerda.

fotovoltaicos como o da Bavária na figura 6.7 (que possui uma densidade de potência de 5 W/m²). Isto forneceria uma potência média de

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = 540 \text{ kWh/d por pessoa.}$$

Parques solares fotovoltaicos iriam, então, adicionar uma quantia substancial de energia. O principal problema com os painéis fotovoltaicos é o custo deles. Conseguir energia durante o inverno também é uma preocupação!

Culturas energéticas? Plantas capturam apenas 0,5 W/m² (figura 6.11). Dado que a Europa precisa se alimentar, a contribuição energética que não é comida das plantas na Europa nunca poderá ser enorme. Sim, haverá alguma colza aqui e alguma silvicultura ali, mas eu não imagino a contribuição total das plantas sem serem alimentos como sendo maior do que 12 kWh/d por pessoa.

O ponto de partida

Sejamos realistas. Assim como a Grã-Bretanha, *a Europa não pode viver das suas próprias renováveis*. Então se o objetivo é parar de utilizar combustíveis fósseis, a Europa precisa de energia nuclear, ou energia solar nos desertos de outras pessoas (como discutido na p234), ou ambos.

Refazendo os cálculos para a América do Norte

Um norte-americano de classe média consome 250 kWh/d. Nós podemos atingir este objetivo com renováveis? E se nós imaginarmos impor medidas de eficiência extremas (tais como carros eficientes e trens elétricos de alta velocidade) de forma que os norte-americanos fossem reduzidos à miséria de viver com apenas 125 kWh/d que um japonês ou um europeu de classe média vivem?

Vento

Um estudo por Elliot et al. (1991) avaliou o potencial eólico dos EUA. Os pontos mais ventosos são Dakota do Norte, Wyoming e Montana. Eles concluíram que, ao redor de todo o país, 435 000 km² de terras com bastante vento poderiam ser exploradas sem levantar muita polêmica, e que a eletricidade gerada seria 4600 TWh por ano, o que são 42 kWh/d por

peessoa se divididos entre 300 milhões de pessoas. Os cálculos deles assumiram uma densidade média de potência de 1,2 W/m², incidentalmente - menos do que os 2 W/m² que nós assumimos no Capítulo 4. A área destes parques eólicos, 435 000 km², é aproximadamente a mesma área da Califórnia. A quantidade de equipamentos para o vento necessária (assumindo um fator de carga de 20%) seria uma capacidade de 2500 GW, o que seria um aumento de 200 vezes nas instalações eólicas dos EUA.

Vento marinho

Se nós assumirmos que as águas rasas com uma área igual à soma de Delaware e Connecticut (20 000 km², uma parcela substancial de águas rasas na costa leste dos EUA) são preenchidas com parques eólicos marinhos tendo uma densidade de potência de 3 W/m², nós obtemos uma potência média de 60 GW. Isto são 4,8 kWh/d por pessoa se divididos por 300 milhões de pessoas. O maquinário eólico necessário teria que ser 15 vezes mais do que o total atualmente disponível nos EUA.

Geotérmica

Eu mencionei o estudo do MIT sobre energia geotérmica (Instituto de Tecnologia de Massachussets, 2006) no Capítulo 16. Os autores são otimistas sobre o potencial de energia geotérmica na América do Norte, especialmente nos estados do oeste onde há mais rochas quentes. "Com um investimento razoável em P&D, sistemas geotérmicos aprimorados poderiam fornecer 100 GW(e) ou mais de capacidade de geração com custo competitivo nos próximos 50 anos. Além disso, sistemas geotérmicos aprimorados fornecem uma fonte segura de energia em longo prazo". Vamos assumir que eles estejam certos. 100 GW de eletricidade são 8 kWh/d por pessoa quando divididos entre 300 milhões de pessoas.

Hidroelétrica

As instalações hidrelétricas do Canadá, dos EUA, e do México geram cerca de 660 TWh por ano. Divididos entre 500 milhões de pessoas, isto soma-se em 3,6 kWh/d por pessoa. A geração de hidroeletricidade na América do Norte poderia ser dobrada? Se sim, isto resultaria em 7,2 kWh/d por pessoa.

O que mais?

O total até agora é de $42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62$ kWh/d por pessoa. Não é o suficiente nem para a existência europeia! Eu poderia discutir várias outras opções tais como a da queima sustentável das florestas canadenses em estações de potência. Mas ao invés de prolongar a agonia, vamos para a tecnologia que realmente fará a diferença: energia solar de concentração.

A figura 30.3 mostra uma área na América do Norte que poderia fornecer para todos lá (500 milhões de pessoas) uma potência média de **250 kWh/d**.

O ponto de partida

As renováveis *não-solares* da América do Norte não são o suficiente para que a América do Norte viva delas. Mas quando nós incluímos uma expansão massiva da energia solar, há o suficiente. Então a América do Norte precisa de energia solar nos seus próprios desertos, ou energia nuclear, ou ambos.

Refazendo os cálculos para o mundo

Como podem 6 bilhões de pessoas obter a potência necessária para o padrão de vida europeu - 80 kWh/d por pessoa, digamos?

Vento

Os pontos excepcionais no mundo com vento forte e constante são os estados centrais dos EUA (Kansas, Oklahoma); Saskatchewan, Canadá; as extremidades do sul da Argentina e do Chile; nordeste da Austrália; nordeste e noroeste da China; noroeste do Sudão; sudeste da África do Sul; Somália; Irã; e Afeganistão. E em todo lugar no mar exceto por uma faixa tropical de 60 graus de largura centrada no equador.

Para a nossa estimativa global, vamos trabalhar com os números do Greenpeace e da Associação Europeia de Energia Eólica: "os recursos totais de vento ao redor do mundo são estimados como 53 000 TWh por ano". Isto são **24 kWh por dia por pessoa**.

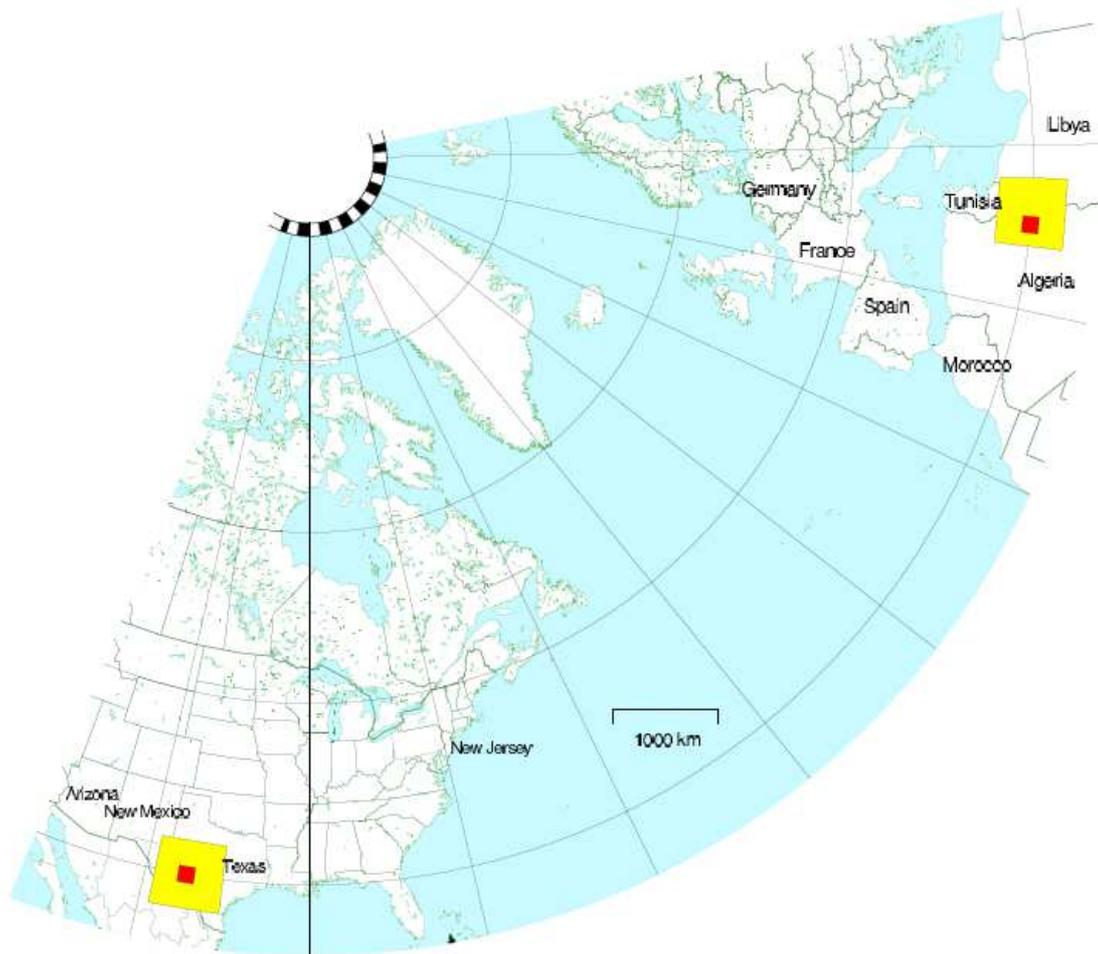


Figura 30.3. Os pequenos quadrados atacam novamente. O quadrado de 600 km por 600 km na América do Norte, completamente preenchido com energia solar de concentração, forneceria energia suficiente para dar a 500 milhões de norte-americanos de classe média o consumo de 250 kWh/d.

Este mapa também mostra o quadrado de 600 km por 600 km na África, que nós conhecemos mais cedo. Eu assumi uma densidade de potência de 15 W/m², como antes.

A área de um quadrado amarelo é um pouco maior do que a área do Arizona, e 16 vezes a área de Nova Jersey. Dentro de cada quadrado grande há um menor de 145 km por 145 km mostrando a área necessária no deserto - uma Nova Jersey - para fornecer 250 kWh/d por pessoa para 30 milhões de pessoas.

Hidrelétrica

Ao redor do mundo a hidroeletricidade atualmente contribui com cerca de 1,4 kWh/d por pessoa.

Do website www.ieahydro.org "A Associação de Energia Hidrelétrica e a Agência Internacional de Energia estimaram o potencial hidrelétrico plausível total mundial em 14 000 TWh/ano [6,4 kWh/d por pessoa no mundo], dos quais 8000 TWh/ano [3,6 kWh/d por pessoa] é atualmente considerado economicamente possível para desenvolvimento. A maior parte do potencial para desenvolvimento está na África, Ásia e América Latina."

Marés

Existem diversos lugares no mundo com recursos de marés na mesma escala que a do estuário Severn (figura 14.8). Na Argentina existem dois locais: San José e Golfo Nuevo; a Austrália possui o Walcott Inlet; os EUA e o Canadá dividem a Baía de Fundy; Canadá possui Cobequid; a Índia tem o Golfo de Khambat; os EUA possuem o Turnagain Arm e o Knit Arm; e a Rússia possui Tugur.

E então há a maior maré do mundo, um lugar chamado Penzhinsk na Rússia com um recurso de 22 GW - dez vezes maior do que Severn!

Kowalik (2004) estimou que, ao redor do mundo, 40-80 GW de potência de marés poderia ser gerada. Divididas entre 6 bilhões de pessoas, isto se torna **0,16 - 0,32 kWh/d por pessoa**.

Ondas

Nós podemos estimar a potência total extraível das ondas multiplicando o comprimento de linha de costa exposta (aproximadamente 300 000 km) pela potência típica por comprimento de linha de costa (10 kW por metro): a potência bruta é então 3000 GW.

Assumindo que 10% desta potência bruta seja interceptada por sistemas que são 50% eficientes na conversão da potência para eletricidade, a potência das ondas poderia fornecer **0,5 kWh/d por pessoa**.

Geotérmica

De acordo com D. H. Freeston do Instituto Geotérmico Auckland, a potência geotérmica soma em média cerca de 4 GW, ao redor do mundo, em 1995 - o que são 0,01 kWh/d por pessoa.

Se nós assumirmos que os autores do MIT da p302 estavam certos, e se nós assumirmos que o mundo todo é como a América, então a potência geotérmica oferece **8 kWh/d por pessoa**.

Energia solar de plantações

As pessoas ficam todas excitadas a respeito de culturas energéticas como a jatropha, que, diz-se, não precisaria competir com alimentos por terra, porque ela pode ser

cultivada em terrenos baldios. As pessoas precisam olhar para os números antes de ficarem excitadas. Os números para jatropha na p371. Mesmo se *toda* a África fosse completamente coberta com plantações de jatropha, a potência produzida, dividida entre seis bilhões de pessoas, seria de **8 kWh/d por pessoa** (o que é apenas um terço do atual consumo global de petróleo). Você não pode resolver o seu vício por petróleo trocando-o por jatropha!

Vamos estimar um limite de potência que as culturas energéticas poderiam fornecer para o mundo todo, usando o mesmo método que nós aplicamos para a Grã-Bretanha no Capítulo 6: imagine pegar toda a terra arável e devotá-la para as culturas energéticas. 18% da terra do mundo é atualmente terra arável - uma área de 27 milhões de km². Isto são **4500 m² por pessoa**, se divididos entre 6 milhões de pessoas. Assumindo uma densidade de potência de 0,5 W/m², e perdas de 33% no processamento e agricultura, nós descobrimos que as culturas energéticas, tomando conta de toda a terra para agricultura, forneceria **36 kWh/d por pessoa**. Agora, talvez esta seja uma subestimação uma vez que na figura 6.11 (p54) nós vimos que a cana de açúcar brasileira pode fornecer uma densidade de potência de 1,6 W/m², três vezes maior do que eu acabei de calcular. Ok, talvez as culturas energéticas do Brasil tenham algum futuro. Mas eu gostaria de seguir para a última opção.

Aquecedores solares, solar fotovoltaica, e energia solar de concentração

Aquecedores solares de água não têm mistério. Eles funcionarão quase em qualquer lugar do mundo. A China é a líder nesta tecnologia. Existem mais de 100 GW de capacidade de aquecimento solar ao redor do mundo, e mais da metade disto está na China.

A solar fotovoltaica é tecnicamente aplicável na Europa, mas eu a considerarei muito cara. Eu espero estar errado, obviamente. Será maravilhoso se o custo da energia solar fotovoltaica cair da mesma forma que o custo da energia dos computadores caiu ao longo dos últimos quarenta anos.

Meu palpite é que em muitas regiões, a melhor tecnologia solar para produção de eletricidade será a energia solar de concentração que nós discutimos nas páginas 231 e 304. Nestas páginas nós já estabelecemos que um bilhão de pessoas na Europa e no norte da África poderiam ser

Sheffield	28%
Edinburgh	30%
Manchester	31%
Cork	32%
London	34%
Cologne	35%
Copenhagen	38%
Munich	38%
Paris	39%
Berlin	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Beijing 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pula, Croatia	57%
Nice, France	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Thailand	60%
Chicago	60%
New York	61%
Lisbon, Portugal	61%
Kingston, Jamaica	62%
San Antonio	62%
Seville, Spain	66%
Nairobi, Kenya	68%
Johannesburg, SA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Upington, SA	91%
Yuma, AZ	93%
Sahara Desert	98%

Figura 30.4. Os valores mais ensolarados do mundo [3doaeag]

sustentadas por instalações de energia solar do tamanho de um país em desertos próximos do Mediterrâneo; e que metade de um bilhão na América do Norte poderia ser sustentada por instalações do tamanho do Arizona nos desertos dos EUA e do México. Eu deixarei como um exercício para o leitor identificar os desertos apropriados para ajudar as outras 4,5 bilhões de pessoas do mundo.

O ponto de partida

Os números não solares somam-se assim: Vento: 24 kWh/d/p; hidroelétrica: 3,6 kWh/d/p; marés: 0,3 kWh/d/p; ondas: 0,5 kWh/d/p; geotérmica: 8 kWh/d/p - um total de 36 kWh/d/p. Nosso objetivo era um consumo pós-europeu de 80 kWh/d por pessoa. Nós temos uma conclusão clara: as renováveis não solares podem ser "enormes", mas elas não são grandes o suficiente. Para completar um plano que faça a diferença, nós devemos nos apoiar em outras formas de energia solar. Ou usar energia nuclear. Ou ambas.

Observações e Leitura Complementar

Nº da página

- 302 **Recursos de Vento Marinho da América do Norte.**
www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html
- 303 **A América do Norte precisa de energia solar nos seus próprios desertos, ou energia nuclear, ou ambos.** Para ler o plano de 2008 do Google para uma diminuição de 40% de combustíveis fósseis dos EUA, veja o artigo de Jeffrey Greenblatt *Energia Limpa 2030* [3lcw9c]. As principais características deste plano são medidas de eletrificação eficiente do transporte, e a produção de eletricidade a partir de renováveis. O plano de produção de eletricidade deles inclui
- 10,6 kWh/d/p de energia eólica,
 - 2,7 kWh/d/p de solar fotovoltaica,
 - 1,9 kWh/d/p de energia solar de concentração,
 - 1,7 kWh/d/p de biomassa,
 - e 5,8 kWh/d/p de energia geotérmica
- até 2030. Isto é um total de 23 kWh/d/p de novas renováveis. Eles também assumem um pequeno aumento na energia nuclear de 7,2 kWh/d/p para 8,3 kWh/d/p, e nenhuma mudança na hidrelétrica. O gás

natural continuaria a ser usado, contribuindo com 4 kWh/d/p.

304 O potencial hidrelétrico total do mundo.

Fonte: www.ieahydro.org/faw.htm

- A potência global de ondas nas linhas de costa é estimada como sendo 3000 GW.

Veja Quayle e Changery (1981).

- Potência geotérmica em 1995. Freeston (1996).

305 Culturas energéticas. Veja Rogner (2000) para uma estimativa parecida com a minha.

Leitura Complementar: Revista *Nature* possui um artigo de 8 páginas discutindo como fornecer energia para o mundo (Schiermeier et al., 2008).

31 A última coisa sobre a qual precisamos falar

A captura de dióxido de carbono do ar é a última coisa sobre a qual precisamos falar.

Quando eu digo isto, eu estou deliberadamente falando com duplo sentido. Primeiro, as necessidades energéticas para capturar carbono do ar são tão enormes, que parece até absurdo falar sobre isto (e existe a preocupação de que criar a possibilidade de consertar as mudanças climáticas por este tipo de geo-engenharia possa promover uma certa inatividade atualmente). Mas em segundo lugar, eu realmente acho que nós devemos falar sobre isso, contemplar como fazer isto da melhor maneira, e investir em pesquisas de como fazer isto melhor, porque a captura de carbono do ar pode acabar sendo a nossa última linha de defesa, se as mudanças climáticas forem tão ruins quanto os cientistas climatologistas afirmam ser, e se a humanidade falhar em pegar as opções mais baratas e sensíveis que podem ainda estar disponíveis atualmente.

Antes de nós discutirmos a captura de carbono do ar, nós precisamos compreender melhor o carbono em si.

Entendendo o CO₂

Na primeira vez que eu planejei este livro, a minha intenção era ignorar as mudanças climáticas. Em alguns círculos, "As mudanças climáticas estão acontecendo?" era uma pergunta controversa. Assim como "Elas são causadas pelos humanos?" e "Isto importa?" E, pendendo no final da linha da controvérsia, "O que nós devemos fazer a respeito disto?" Eu achava que energia sustentável era um assunto instigante por si mesmo, e era melhor evitar as controvérsias. Meu discurso costumava ser: "Não se preocupe com quando os combustíveis fósseis acabarão; não se preocupe se as mudanças climáticas estão acontecendo; *queimar combustíveis fósseis não é sustentável de qualquer maneira*; vamos imaginar como viver de forma sustentável, e descobrir quanto de energia sustentável está disponível."

Contudo, as mudanças climáticas cresceram na consciência das pessoas, e levantaram todo tipo de perguntas interessantes. Então eu decidi discutir um pouco no prefácio e neste capítulo de encerramento. Não uma discussão completa, apenas alguns números interessantes.

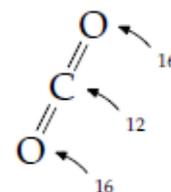


Figura 31.1. O peso de um átomo de carbono e uma molécula de CO₂ são na fração de 12 para 44, porque o átomo de carbono pesa 12 unidades e dois átomos de oxigênio pesam 16 cada. $12 + 16 + 16 = 44$.

Unidades

As taxas de poluição de carbono são geralmente medidas em dólares ou euros por ton de CO₂, então eu utilizarei *ton de CO₂* como a unidade principal quando eu estiver falando sobre poluição per capita, e a *ton de CO₂ por ano* para medir taxas de poluição. (A emissão média de gases de efeito estufa da Europa são equivalentes a 11 tons por ano de CO₂; ou 30 kg por dia de CO₂.) Mas quando se fala sobre carbono em combustíveis fósseis, vegetação, solo, e água, eu falarei sobre toneladas de carbono. Uma tonelada de CO₂ contém 12/44 tons de carbono, um pouco mais do que um quarto de tonelada. Em uma escala planetária, eu falarei sobre gigatoneladas de carbono (GtC). Uma gigatonelada de carbono é um bilhão de toneladas. Gigatoneladas são difíceis de imaginar, mas se você quiser diminuí-la para uma escala humana, imagine queimar uma tonelada de carvão (o que é o que você deve utilizar para aquecer a sua casa ao longo de um ano). Agora imagine todos no planeta queimando uma tonelada de carvão por ano: isto são 6 GtC por ano, já que o planeta possui 6 bilhões de pessoas.

Onde está o carbono?

Onde está todo o carbono? Nós precisamos saber quanto está nos oceanos, no solo, na vegetação, comparado com a atmosfera, se nós quisermos entender as consequências das emissões de CO₂.

A figura 31.2 mostra onde está o carbono. A maior parte dele - 40 000 Gt - está nos oceanos (na forma de gás CO₂ dissolvido, carbonatos, plantas vivas e vida animal, e materiais decadentes). Solo e vegetação contém juntos cerca de 3700 Gt. Combustíveis fósseis acessíveis - principalmente o carvão - contém cerca de 1600 Gt. Finalmente, a atmosfera contém cerca de 600 Gt de carbono.

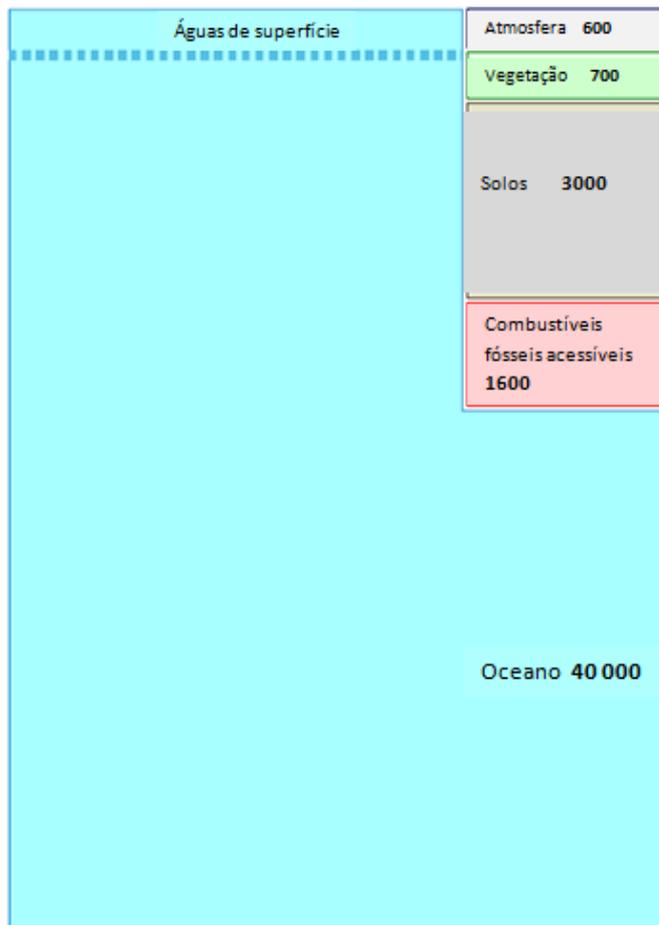


Figura 31.2. Quantidades estimadas de carbono, em gigatoneladas, em lugares acessíveis da Terra. (Existe uma carga a mais de carbono nas rochas também; este carbono se move em ciclo em uma escala de tempo de milhões de anos, com um balanço de longo prazo entre o carbono nos sedimentos passando por subducção nos limites das placas tectônicas, e o carbono saindo de vulcões de tempos em tempos. Para fins de simplificação, eu ignoro este carbono geológico.)

Até recentemente, todas estas piscinas de carbono estavam aproximadamente em equilíbrio: todos os fluxos de carbono de saída da piscina (digamos solo, vegetação, ou atmosfera) eram balanceados por fluxos iguais de carbono para dentro da piscina. Os fluxos de entrada e saída da piscina de combustíveis fósseis eram desprezíveis. Então os humanos começaram a queimar combustíveis fósseis. Isto adicionou dois fluxos extras e *desequilibrados*, como mostrado na figura 31.3.

Como este significativo fluxo extra de carbono modificou os valores mostrados na figura 31.2? Bem, isto não é exatamente conhecido. A figura 31.3 mostra as principais coisas que *são* conhecidas. Muito dos extras 8,4 GtC por ano que nós estamos colocando na atmosfera permanece na atmosfera, aumentando a concentração atmosférica de dióxido de carbono. A atmosfera se equilibra bastante rapidamente com as águas de superfície dos oceanos (este equilíbrio leva apenas cinco ou dez anos), e existe um fluxo de CO₂ da atmosfera para as águas de superfície dos oceanos, somando 2 GtC por ano. (Pesquisas recentes indicam esta taxa de absorção de carbono pelos oceanos pode estar se

reduzindo, contudo.) Este fluxo desequilibrado para as águas superficiais fazem com que o oceano se acidifique, o que é ruim para os corais. Um pouco de carbono extra está indo para a vegetação e para o solo também, talvez cerca de 1,5 GtC por ano, mas estes fluxos não são tão bem medidos. Porque aproximadamente metade das emissões de carbono estão permanecendo na atmosfera, a poluição contínua de carbono a uma taxa de 8,4 GtC por ano continuará a aumentar os níveis de CO₂ na atmosfera, e nas águas de superfície.

Qual é o destino de longo prazo para o CO₂ extra? Bem, uma vez que a quantidade nos combustíveis fósseis é muito menor do que o total nos oceanos, "a longo prazo" o carbono extra fará seu caminho para o oceano, e as quantidades de carbono na atmosfera, vegetação e solo voltarão ao normal. Contudo, o "longo prazo" significa milhares de anos. O equilíbrio entre a atmosfera e a água de superfície é rápida, como eu disse, mas as figuras 31.2 e 31.3 mostram uma linha pontilhada separando as águas de superfície do oceano do resto do oceano. Em uma escala de tempo de 50 anos, este limite é virtualmente uma parede sólida. Carbono radioativo disperso ao redor do globo pelos testes de bombas atômicas dos anos 1960 e 70 penetraram os oceanos a uma profundidade de apenas 400 m. Em contraste com a profundidade média do oceano de 4000 m.

Os oceanos circulam devagar: uma porção de água profunda do oceano leva cerca de 1000 anos para rolar para a superfície e voltar para o fundo novamente. A circulação das águas profundas é movida por uma combinação de gradientes de temperatura e gradientes de salinidade, então é chamada de circulação termoalina (em contraste com as circulações das águas de superfície, que são movidas pelo vento).

O movimento lento dos oceanos possui uma consequência crucial: nós temos combustíveis fósseis para influenciar seriamente o clima pelos próximos 1000 anos.

Para onde o carbono está indo?

A figura 31.3 é uma simplificação grosseira. Por exemplo, humanos estão causando fluxos adicionais não mostrados neste diagrama: a queima de turfa e florestas em Borneo em 1977 sozinha liberou 0,7 GtC. Incêndios acidentais com carvão parecem liberar cerca de 0,25 GtC por ano.

Ainda assim, este desenho nos ajuda a entender aproximadamente o que acontecerá a curto e médio prazo sob

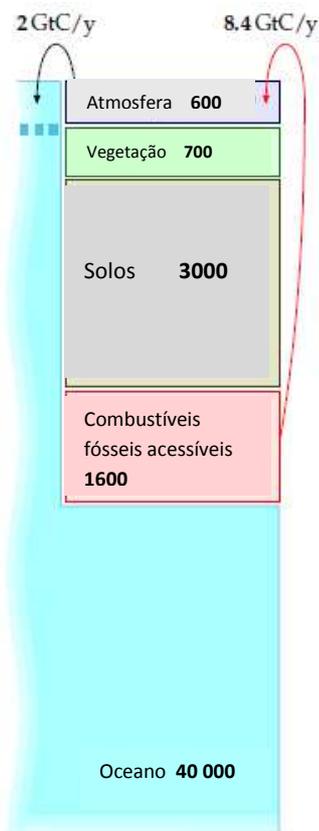


Figura 31.3. As setas mostram dois fluxos extras de carbono produzidos pela queima de combustíveis fósseis. Existe um desequilíbrio entre as 8,4 GtC/a emitidas na atmosfera da queima de combustíveis fósseis e os 2 GtC/a de CO₂ que são absorvidos pelos oceanos. Este desenho omite os fluxos não tão bem quantificados entre a atmosfera, o solo, a vegetação, e assim por diante.

várias políticas. Primeiro, se a poluição de carbono continuar "como sempre", ao queimar outros 500 GtC pelos próximos 50 anos, nós podemos esperar que o carbono continue a crescer gradualmente nas águas superficiais dos oceanos em uma taxa de 2 GtC por ano. Por volta de 2055, pelo menos 100 GtC destes 500 terão ido para as águas de superfícies, e as concentrações de CO₂ na atmosfera serão aproximadamente o dobro dos níveis pré-industriais.

Se a queima de combustíveis fósseis fosse reduzida a zero na década de 2050, o fluxo de 2 GT da atmosfera para o oceano seria significativamente menor. (Eu costumava imaginar que este fluxo para o oceano persistiria por décadas, mas isto apenas seria verdade se as águas de superfície estivessem em equilíbrio com a atmosfera; mas como eu mencionei antes, as águas de superfície e a atmosfera atingem o equilíbrio em uns poucos anos.) Muito dos 500 Gt que nós colocamos na atmosfera seria absorvido gradualmente pelas águas dos oceanos apenas pelos próximos mil anos, no que a superfície da água vai para o fundo e é substituída pelas águas mais profundas.

Então as nossas perturbações das concentrações de carbono podem eventualmente serem ajustadas, mas apenas após milhares de anos. E isto assumindo-se que a grande perturbação na atmosfera não altere o ecossistema drasticamente. É concebível, por exemplo, que a acidificação das águas de superfície do oceano possam causar extinção suficiente das vidas de plantas marinhas de modo que um novo ciclo vicioso ataque: a acidificação significa a extinção de vida de plantas, significando que as plantas absorverão menos CO₂ dos oceanos, significando que os oceanos ficarão ainda mais ácidos. Tais ciclos viciosos (que os cientistas chamam de "respostas positivas" ou "respostas fugitivas") já aconteceram na Terra antes: acredita-se, por exemplo, que as eras glaciares terminaram relativamente rápido por causa dos ciclos de resposta positiva nas quais as temperaturas crescentes faziam com que a superfície de neve e gelo derretesse, o que reduzia a reflexão do chão da luz do sol, o que significava que o chão absorvia mais calor, que levava ao aumento de temperaturas. (Neve derretida - água - é muito mais escura do que neve congelada.) Outra possibilidade de resposta positiva para nos preocuparmos envolve hidratos de metano, que estão congeladas em quantidades de gigatoneladas em locais como o Ártico da Sibéria, e em quantidades de 100-gigatoneladas nas plataformas continentais. Aquecimento global maior do que 1°C possivelmente derreteria esses hidratos de metano, que

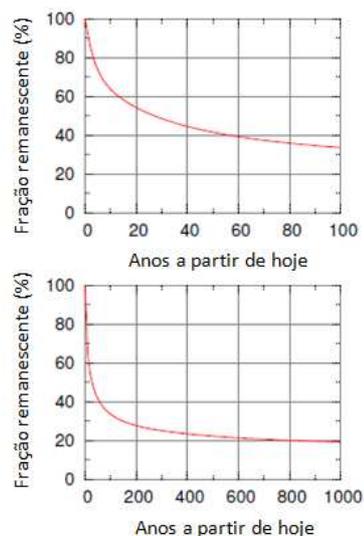


Figura 31.4. Decaimento do pequeno pulso de CO₂ adicionado até hoje na atmosfera, de acordo com o modelo de Bern do ciclo do carbono. Fonte: Hansen et al. (2007).

liberariam metano para a atmosfera, e o metano aumentaria o aquecimento global mais do que o CO₂ faz.

Aqui não é o lugar para discutir as incertezas das mudanças climáticas em mais detalhes. Eu recomendo fortemente os livros *Evitando Mudanças Climáticas Perigosas*³⁶ (Schellnhuber et al., 2006) e *Mudança Climática Global*³⁷ (Dessler e Parson, 2006). Também os artigos de Hansen et al. (2007) e Charney et al. (1979).

O propósito deste capítulo é discutir a ideia de resolver as mudanças climáticas sugando dióxido de carbono do ar; nós discutiremos o custo energético deste processo a seguir.

O custo de sugar

Hoje em dia, bombear carbono do solo é muito caro. No futuro, talvez bombear carbono *para* o solo seja muito caro. Assumindo que ações inadequadas sejam tomadas hoje para deter a poluição global de carbono, talvez a coligação de vontades vá em poucas décadas pagar para criar um gigante aspirador de pó, e limpar a bagunça de todo mundo.

Antes que nós entremos em detalhes sobre como capturar carbono do ar, vamos discutir o custo inevitável da captura de carbono. Quaisquer tecnologias que nós utilizemos, elas têm que respeitar as leis da física, e infelizmente pegar CO₂ do ar e concentrá-lo requer energia. As leis da física dizem que a energia necessária deve ser pelo menos 0,2 kWh por kg de CO₂ (tabela 31.5). Dado o fato que processos reais são geralmente 35% eficientes na melhor das hipóteses, eu ficaria maravilhado se o custo da captura de carbono for algum dia menor do que 0,55 kWh por kg.

Agora vamos assumir que nós queremos neutralizar a produção de CO₂ de 11 toneladas por ano, que são 30 kg por dia por pessoa. A energia necessária, assumindo um custo de 0,55 kWh por kg é de **16, 5 kWh por dia por pessoa**. Este é exatamente **o consumo britânico de eletricidade**. Então alimentar o gigante aspirador de pó faria com que nós precisássemos *dobrar* a nossa produção de eletricidade - ou, pelo menos, obter de alguma forma uma potência extra igual à nossa atual produção de eletricidade.

Se o custo para operar os gigantes aspiradores de pó puder ser diminuído, brilhante, vamos trabalhar com eles. Mas nenhuma quantidade de pesquisa e desenvolvimento pode

³⁶ Título original: *Avoiding Dangerous Climate Change*.

³⁷ Título original: *Global Climate Change*.

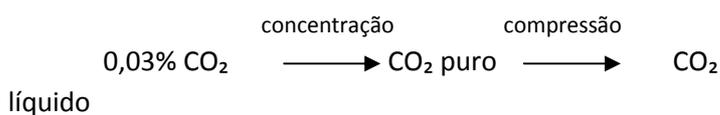
passar por cima das leis da física, que diz que retirar CO₂ do ar e concentrá-lo em CO₂ líquido requer pelo menos 0,2 kWh por kg de CO₂.

Agora, qual a melhor maneira de sugar CO₂ do ar? Eu discutirei quatro tecnologias para construir o aspirador de pó gigante:

- A. bombas químicas;
- B. árvores;
- C. intemperismo acelerado de rochas;
- D. nutrição do oceano.

A. Tecnologias químicas para a captura do carbono

As tecnologias químicas geralmente lidam com o dióxido de carbono em dois passos.



Primeiro elas *concentram* o CO₂ de sua baixa concentração na atmosfera; então elas o *comprimem* em um pequeno volume pronto para ser enterrado em algum lugar (ou dentro de um buraco na terra ou no fundo do oceano). Cada um destes passos possui um custo energético. Os custos necessários pelas leis da física são mostrados na tabela 31.5.

Em 2005, os melhores métodos para a captura de CO₂ do ar publicados foram bastante ineficientes: o custo energético era cerca de 3,3 kWh por kg, com um custo financeiro de cerca de \$140 por tonelada de CO₂. Com este custo energético, capturar os 30 kg por dia por pessoa da Europa custaria **100 kWh por dia** - quase o mesmo que o consumo energético europeu de 125 kWh por dia. Será que podemos projetar melhores aspiradores de pó?

Recentemente, Wallace Broecker, climatologista, "talvez o intérprete mais importante das operações dos sistemas biológicos, químicos e físicos da Terra", tem promovido como uma tecnologia ainda não publicada desenvolvida pelo físico Klaus Lackner para a captura de CO₂ do ar. Broecker imagina que o mundo poderia continuar com a queima de combustíveis fósseis mais ou menos na mesma taxa com que queima atualmente, e 60 milhões de lavadores de

	custo (kWh/kg)
concentração	0,13
compressão	0,07
total	0,20

Tabela 31.5. O inevitável custo energético da concentração e compressão de CO₂.

CO₂ (cada um do tamanho de um contêiner de transporte de navio) que aspirarão o CO₂. Quanta energia o processo de Lackner requer? Em junho de 2007 Lackner me disse que o laboratório dele estava conseguindo 1,3 kWh por kg, mas desde então eles desenvolveram um novo processo baseado em uma resina que absorve o CO₂ quando seca e o libera quando úmida. Lackner me disse em junho de 2008 que, em clima seco, o custo de concentração foi reduzido para cerca de 0,18 - 0,37 kWh por kg de CO₂. O custo de compressão é 0,11 kWh por kg. Então o custo total de Lackner é 0,48 kWh ou menos por kg. Para as emissões européias de 30 kg de CO₂ por dia por pessoa, nós ainda estamos falando de um custo de **14 kWh por dia**, dos quais **3,3 kWh por dia** seriam de eletricidade, e o resto calor.

Viva para o progresso técnico! Mas por favor não ache que isto é um custo *pequeno*. Isto necessitaria de um aumento de pelo menos 20% na produção de energia mundial, apenas para fazer os aspiradores de pó funcionarem.

B. E as árvores?

Árvores são sistemas de captura de carbono; elas sugam CO₂ do ar, e elas não violam nenhuma das leis da física. Elas são duas máquinas em uma: elas são instalações de captura de carbono alimentadas por estações de potência solares. Elas capturam carbono utilizando a energia obtida através da luz do sol. Os combustíveis fósseis que nós queimamos foram originalmente criados por esse processo. Então, a sugestão é, que tal fazer o contrário da queima de combustíveis fósseis? Que tal criar madeira e enterrá-la em um buraco no chão enquanto, na vizinhança, a humanidade continua a desenterrar madeira fóssil e botar fogo nela? É loucura imaginar criar madeira enterrada ao mesmo tempo em que se desenterra madeira enterrada. Mesmo assim, vamos estimar a área de terra necessária para resolver o problema climático com as árvores.

As melhores plantas na Europa capturam carbono a uma taxa de aproximadamente 10 toneladas de madeira seca por hectare por ano - equivalente a cerca de 15 toneladas de CO₂ por hectare por ano - então para consertar a produção da Europa de 11 toneladas de CO₂ por ano nós precisamos de **7500 metros quadrados** de floresta por pessoa. Esta área necessária de 7500 metros quadrados por pessoa é *duas vezes a área da Grã-Bretanha* por pessoa. E então você teria que achar um lugar para armazenar permanentemente 7,5



toneladas de madeira por pessoa por ano! A uma densidade de 500 kg por m³, a madeira de cada pessoa ocuparia 15 m³ por ano. A madeira do tempo de uma vida - o que, lembre-se, precisa ser armazenada em algum lugar e nunca queimada - ocuparia 1000 m³. Isto são cinco vezes o volume de uma casa normal. Se alguém propuser utilizar árvores para desfazer as mudanças climáticas, eles precisam perceber que as instalações necessárias seriam do tamanho de um país. Eu não vejo como isso funcionaria.

C. Intemperismo acelerado de rochas

Existe uma maneira sorrateira de evitar o custo energético da abordagem química de extração de carbono? Aqui está uma ideia interessante: pulverizar rochas que são capazes de absorver CO₂, e deixá-las soltas no ar. Esta ideia pode ser lançada como a aceleração do processo geológico natural. Deixe-me explicar.

Dois fluxos de carbono que eu omiti da figura 31.3 são o fluxo de carbono das rochas para os oceanos, associado com o intemperismo natural das rochas, e a precipitação natural do carbono em sedimentos marinhos, que eventualmente se transformam novamente em rochas. Estes fluxos são relativamente pequenos, envolvendo cerca de 0,2 GtC por ano (0,7 GtCO₂ por ano). Então eles são desprezíveis se comparados à atual emissão humana de carbono, que é cerca de 40 vezes maior. Mas a sugestão de intemperismo forçado defende que nós podemos consertar as mudanças climáticas ao aumentar a taxa com que as rochas são quebradas e absorvem CO₂. As rochas apropriadas para quebrarem incluem olivinas ou minerais de silicato de magnésio, que são muito difundidas. A ideia seria encontrar minas em lugares cercados por muitos quilômetros quadrados de terra onde se poderia espalhar rochas esmagadas, ou talvez espalhar as rochas quebradas diretamente nos oceanos. De qualquer forma, as rochas absorveriam CO₂ e virariam carbonatos e os carbonatos resultantes acabariam sendo lavados para os oceanos. Para pulverizar as rochas em grãos apropriadamente pequenos para que a reação com o CO₂ aconteça, necessita-se de apenas **0,04 kWh por kg de CO₂**. Espere aí, isto não é menor do que os 0,20 kWh por kg necessários pelas leis da física? Sim, mas nada está errado: as rochas em si são as fontes da energia perdida. Silicatos possuem maior energia do que os carbonatos, então as rochas pagam a energia para sugar o CO₂ do ar.

Eu gosto do pequeno custo energético deste cenário, mas a questão difícil é quem gostaria de se voluntariar a cobrir o seu país com rochas pulverizadas?

D. Nutrição do oceano

Um problema com os métodos químicos, métodos de cultivo de árvores, e métodos de pulverização de rochas para a extração de CO₂ do ar é que todos eles necessitariam de muito trabalho, e ninguém tem nenhum incentivo para fazer isso - a não ser que algum acordo internacional pague pelo custo da captura de carbono. No momento, os preços do carbono estão muito baixos.

Uma ideia final para a extração de carbono pode contornar esta dificuldade. A ideia é persuadir os oceanos a capturarem carbono um pouco mais rapidamente do que o normal como um sub-produto da piscicultura.

Algumas regiões do mundo têm escassez de alimentos. Existe escassez de peixes em muitas áreas, por causa da pesca excessiva ao longo dos últimos 50 anos. A ideia da *nutrição do oceano* é fertilizar os oceanos, suportando a base da cadeia alimentar, fazendo com que os oceanos sejam capazes de suportar maior vida de plantas e mais peixes, e incidentalmente absorver mais carbono. Liderado pelo cientista australiano Ian Jones, os engenheiros de nutrição do oceano gostariam de bobear um fertilizante contendo nitrogênio tal como uréia em certas regiões do oceano pobres em peixes. Eles alegam que 900 km² de oceano podem ser nutridos para extrair cerca de 5 MtCO₂/a. Jones e seus colegas afirmam que a nutrição do oceano é aceitável para quaisquer áreas do oceano deficientes em nitrogênio. Isto inclui a maior parte do norte do Atlântico. Vamos colocar esta ideia em um mapa. As emissões de carbono do Reino Unido são cerca de 600 MtCO₂/a. Então a neutralização completa das emissões de carbono do Reino Unido necessitariam 120 de tais áreas no oceano. O mapa na figura 31.6 mostra estas áreas em escala com as ilhas britânicas. Como sempre, um plano que realmente faça a diferença requer instalações do tamanho de um país! E nós nem chegamos ao ponto de como nós vamos produzir toda a uréia necessária.

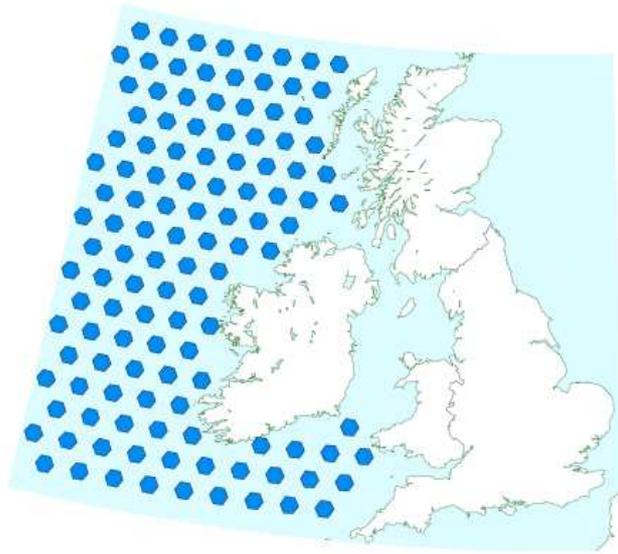


Figura 31.6. 120 áreas no Oceano Atlântico, cada uma com 900 km² de tamanho. Estas fazem a área estimada necessária para neutralizar as emissões de carbono da Grã-Bretanha por nutrição do oceano.

Mesmo sendo uma ideia que ainda não foi testada, e atualmente ilegal, eu acho a nutrição do oceano interessante porque, em contraste com o armazenamento geológico de carbono, é uma tecnologia que pode ser implementada mesmo se a comunidade internacional não concordar com o alto valor para limpar a poluição de carbono; os pescadores podem nutrir os oceanos simplesmente para pegar mais peixes.

Pode-se prever que comentadores se oporão à manipulação dos oceanos, focando nas incertezas ao invés de focarem nos benefícios em potencial. Eles estarão brincando com o medo do desconhecido que o público tem. As pessoas estão preparadas para aceitar passivamente a escolha de uma prática estabelecida (ex, despejar CO₂ na atmosfera) enquanto são cautelosas com inovações que podem melhorar o seu bem-estar futuro. Elas têm uma aversão desigual ao risco.

Ian Jones.

Nós, a humanidade, não podemos liberar na atmosfera todo, nem sequer a maior parte, do CO₂ de combustíveis fósseis. Fazer isto garantiria mudanças climáticas drásticas, produzindo um planeta diferente...

J. Hansen et al (2007)

*"Evitar mudanças climáticas perigosas" é impossível - as mudanças climáticas perigosas já estão aqui. A questão é, nós podemos evitar mudanças climáticas **catastróficas**?*

David King, Chefe Cientista do Reino Unido, 2007

Observações

Nº da página

- 309 mudanças climáticas... era uma questão controversa. De fato, ainda existe "um grande fosso entre a opinião dominante sobre mudanças climáticas entre as elites estudiosas da Europa e da América" [voxbz].
- 310 Onde está o carbono? Fontes: Schellnhuber et al. (2006), Davidson e Janssens (2006).
- 312 A taxa da queima de combustíveis fósseis... Fonte: Marland et al. (2007).
- Pesquisas recentes indicam que a absorção de carbono pelos oceanos pode estar diminuindo. www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré et al. (2007).
 - Aproximadamente metade das emissões de carbono estão permanecendo na atmosfera. Precisa-se de aproximadamente 2,1 bilhões de toneladas de carbono na atmosfera (7,5 GtCO₂) para aumentar a concentração atmosférica de CO₂ em uma parte por milhão (1 ppm). Se todo o CO₂ que nós bombeamos para a atmosfera permanecesse nela, a concentração estaria aumentando mais de 3 ppm por ano - mas ela está aumentando, na verdade, apenas 1,5 ppm por ano.
 - Carbono radioativo ... penetrou a uma profundidade de apenas 400 m. O valor médio de profundidade de penetração da bomba ¹⁴C para todos os locais de observação durante o final da década de 1970 é 390±39m (Broecker et al., 1995). Do [3e28ed].
- 313 Aquecimento global maior do que 1°C possivelmente derreteria hidratos de metano. Fonte: Hansen et al. (2007, p1942).
- 315 Tabela 31.5. Custo inevitável da concentração e compressão de CO₂ do ar. As necessidades inevitáveis de energia para concentrar CO₂ de 0,03% para 100% à pressão atmosférica é $kT \ln 100 / 0,03$ por molécula, o que são 0,13 kWh por kg. O custo ideal de energia para comprimir o CO₂ para 110 bar (uma pressão mencionada para armazenamento geológico) é 0,067 kWh por kg. Então o custo ideal da captura e compressão de CO₂ é 0,2 kWh/kg. De acordo com o relatório especial de captura e armazenamento de

carbono IPCC, o custo prático do segundo passo, a compressão de CO₂ para 110 bar, é **0,11 kWh por kg**. (0,4 GJ por tCO₂; 18 kJ por mol de CO₂; 7 kT por molécula.)

315 **Enterrar o CO₂ em um buraco na terra ou no fundo do oceano.** Veja William (2000) para discussão. "Para uma larga fração de CO₂ injetado permanecer no oceano, a injeção deve ser a grandes profundidades. Está se desenvolvendo um consenso de que a melhor estratégia de curto prazo seria descarregar o CO₂ a profundidades de 1000-1500 metros, que pode ser feito com as tecnologias já existentes."

Veja também o Boletim Especial do IPCC: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm

- **Em 2005, os melhores métodos para captura de carbono foram bastante ineficientes: o custo energético foi de cerca de 3,3 kWh por kg, com um custo financeiro de cerca de \$140 por ton de CO₂.** Fontes: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David e Herzog (2000).

- **Wallace Broecker, climatologista...** www.af-info.org.jp/eng/honor/hot/enbro.html. Seu livro promovendo árvores artificiais: Broecker e Kunzig (2008).

316 **As melhores plantas na Europa capturam carbono a uma taxa de aproximadamente 10 toneladas de madeira seca por hectare por ano.** Fonte: Comitê Seletor de Ciência e Tecnologia.

- **Intemperismo avançado de rochas.** Veja Schuiling e Krijgsman (2006).

- **Nutrição do Oceano.** Veja Judd et al. (2008). Veja também Chisholm et al. (2001). Os riscos da nutrição do oceano são discutidos em Jones (2008).

32 Dizendo sim

Como a Grã-Bretanha atualmente retira 90% da sua energia dos combustíveis fósseis, não é surpresa que parar de utilizar combustíveis fósseis requer grandes, grandes mudanças - uma mudança total na frota de transporte; uma mudança completa na maioria dos sistemas de aquecimento de edificações; e um aumento de 10 a 20 vezes na energia verde.

Dada a tendência geral do público de dizer "não" para parques eólicos, "não" para energia nuclear, "não" para barragens de marés - "não" para tudo que seja diferente de sistemas de potência de combustíveis fósseis - eu estou preocupado que nós não vamos de verdade parar de utilizar combustíveis fósseis quando nós precisarmos. Ao invés disso, nós nos acomodaremos com meias-medidas: estações de potência de combustíveis fósseis, sistemas de aquecimento de carros e edificações levemente mais eficientes; uma ajudinha de um sistema de comércio de carbono; uma pitada de turbinas eólicas; um número inadequado de estações nucleares.

Nós precisamos escolher um plano que faça a diferença. É possível fazer um plano que faça a diferença, mas não será fácil.

Nós precisamos parar de dizer não e começar a dizer sim. Nós precisamos parar com o show de Punch e Judy³⁸ e começar a construir algo.

Se você gostaria de uma política energética honesta, realística, e que faça a diferença, por favor avise todos os seus representantes políticos e candidatos políticos futuros.

³⁸ **Punch e Judy** é um show de marionetes com o Sr. Punch e sua esposa Judy, composta de várias esquetes curtas que mostram basicamente o comportamento violento do Sr. Punch com sua esposa. No Inglês, punch significa soco ou pancada com os pulsos serrados.

Agradecimentos

Por me levarem para o ambientalismo, eu agradeço Robert MacKay, Gale Ryba, e Mary Archer.

Por décadas de conversas intensas sobre todos os detalhes, obrigado Matthew Bramley, Mike Cates, e Tim Jervis.

Por boas ideias, por inspiração, por sugestões de bons trocadilhos, pelas críticas construtivas, pelo encorajamento, eu agradeço às seguintes pessoas, todas as quais moldaram este livro. John Hopfield, Sanjoy Mahajan, Iain Murray, Ian Fells, Tony Benn, Chris Bishop, Peter Dayan, Zoubin Ghahramani, Kimber Gross, Peter Hodgson, Jeremy Lefroy, Robert MacKay, William Nuttall, Mike Sheppard, Ed Snelson, Quentin Stafford-Fraser, Prashant Vaze, Mark Warner, Seb Wills, Phil Cowans, Bart Ullstein, Helen de Mattos, Daniel Corbett, Greg McMullen, Alan Blackwell, Richard Hills, Philip Sargent, Denis Mollison, Volker Heine, Olivia Morris, Marcus Frean, Erik Winfree, Caryl Walter, Martin Hellman, Per Sillrén, Trevor Whittaker, Daniel Nocera, Jon Gibbins, Nick Butler, Sally Daultrey, Richard Friend, Guido Bombi, Alessandro Pastore, John Peacock, Carl Rasmussen, Phil C. Stuart, Adrian Wrigley, Jonathan Kimmitt, Henry Jabbour, Ian Bryden, Andrew Green, Montu Saxena, Chris Pickard, Kele Baker, Davin Yap, Martijn van Veen, Sylvia Frean, Janet Lefroy, John Hinch, James Jackson, Stephen Salter, Derek Bendall, Deep Throat, Thomas Hsu, Geoffrey Hinton, Radford Neal, Sam Roweis, John Winn, Simon Cran-McGreehin, Jackie Ford, Lord Wilson of Tillyorn, Dan Kammen, Harry Bhadesia, Colin Humphreys, Adam Kalinowski, Anahita New, Jonathan Zwart, John Edwards, Danny Harvey, David Howarth, Andrew Read, Jenny Smithers, William Connolley, Ariane Kossack, Sylvie Marchand, Phil Hobbs, David Stern, Ryan Woodard, Noel Thompson, Matthew Turner, Frank Stajano, Stephen Stretton, Terry Barker, Jonathan Köhler, Peter Pope, Aleks Jakulin, Charles Lee, Dave Andrews, Dick Glick, Paul Robertson, Jürgen Matter, Alan and Ruth Foster, David Archer, Philip Sterne, Oliver Stegle, Markus Kuhn, Keith Vertanen, Anthony Rood, Pilgrim Beart, Ellen Nisbet, Bob Flint, David Ward, Pietro Perona, Andrew Urquhart, Michael McIntyre, Andrew Blake, Anson Cheung, Daniel Wolpert, Rachel Warren, Peter Tallack, Philipp Hennig, Christian Steinrück, Tamara Broderick, Demosthenis Pafitis, David Newbery, Annee Blott, Henry Leveson-Gower, John Colbert, Philip Dawid, Mary Waltham, Philip Slater, Christopher Hobbs, Margaret Hobbs, Paul Chambers, Michael Schlup, Fiona Harvey, Jeremy Nicholson,

Ian Gardner, Sir John Sulston, Michael Fairbank, Menna Clatworthy, Gabor Csanyi, Stephen Bull, Jonathan Yates, Michael Sutherland, Michael Payne, Simon Learmount, John Riley, Lord John Browne, Cameron Freer, Parker Jones, Andrew Stobart, Peter Ravine, Anna Jones, Peter Brindle, Eoin Pierce, Willy Brown, Graham Treloar, Robin Smale, Dieter Helm, Gordon Taylor, Saul Griffith, David Cebonne, Simon Mercer, Alan Storkey, Giles Hodgson, Amos Storkey, Chris Williams, Tristan Collins, Darran Messer, Simon Singh, Gos Micklem, Peter Guthrie, Shin-Ichi Maeda, Candida Whitmill, Beatrix Schlarb-Ridley, Fabien Petitcolas, Sandy Polak, Dino Seppi, Tadashi Tokieda, Lisa Willis, Paul Weall, Hugh Hunt, Jon Fairbairn, Milooš T. Kojašević, Andrew Howe, Ian Leslie, Andrew Rice, Miles Hember, Hugo Willson, Win Rampen, Nigel Goddard, Richard Dietrich, Gareth Gretton, David Sterratt, Jamie Turner, Alistair Morfey, Rob Jones, Paul McKeigue, Rick Jefferys, Robin S Berlingo, Frank Kelly, Michael Kelly, Scott Kelly, Anne Miller, Malcolm Mackley, Tony Juniper, Peter Milloy, Cathy Kunkel, Tony Dye, Rob Jones, Garry Whatford, Francis Meyer, Wha-Jin Han, Brendan McNamara, Michael Laughton, Dermot McDonnell, John McCone, Andreas Kay, John McIntyre, Denis Bonnelle, Ned Ekins-Daukes, John Daghli, Jawed Karim, Tom Yates, Lucas Kruijswijk, Sheldon Greenwell, Charles Copeland, Georg Heidenreich, Colin Dunn, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David Gelder, Damon Hart-Steve Foale, Leo Smith, Mark McAndrew, Bengt

Gustafsson, Roger Pharo, David Calderwood, Graham Pendlebury, Brian Collins, Paul Hasley, Martin Dowling, Martin Whiteland, Andrew Janca, Keith Henson, Graeme Mitchison, Valerie MacKay, Dewi Williams, Nick Barnes, Niall Mansfield, Graham Smith, Wade Amos, Sven Weier, Richard McMahon, Andrew Wallace, Corinne Meakins, Eoin O'Carroll, Iain McClatchie, Alexander Ac, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David Gelder, Damon Hart- Davis, George Wallis, Philipp Spöth, James Wimberley, Richard Madeley, Jeremy Leggett, Michael Meacher, Dan Kelley, Tony Ward-Holmes, Charles Barton, James Wimberley, Jay Mucha, Johan Simu, Stuart Lawrence, Nathaniel Taylor, Dickon Pinner, Michael Davey, Michael Riedel, William Stoett, Jon Hilton, Mike Armstrong, Tony Hamilton, Joe Burlington, David Howey, Jim Brough, Mark Lynas, Hezlin Ashraf-Ball, Jim Oswald, John Lightfoot, Carol Atkinson, Nicola Terry, George Stowell, Damian Smith, Peter Campbell, Ian Percival, David Dunand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney, and Liz Moyer. Obrigado a todos vocês.

Por me ajudar a encontrar os dados climáticos, eu agradeço Emily Shuckburgh. Eu sou muito grato à Kele Baker por juntar os dados sobre carros elétricos da figura 20.21. Eu também agradeço a David Sterratt pelas contribuições na pesquisa, e Niall Mansfield, Jonathan Zwart, e Anna Jones pelo excelente conselho editorial.

Os erros que permanecem é claro, que são meus.

Eu estou especialmente em débito com Seb Wills, Phil Cowans, Oliver Stegle, Patrick Welche, e Carl Scheffler por manterem os meus computadores funcionando.

Eu agradeço ao Instituto Africano de Ciências Matemáticas, Cape Town, e ao Instituto Isaac Newton de Ciências Matemáticas, Cambridge, pela hospitalidade.

Muitos agradecimentos ao Grupo de Tecnologia Digital, Laboratório de Computação, Departamento de Física de Universidade Cambridge e Heriot-Watt por fornecerem os dados de clima online. Eu sou grato a Jersey Water e Guernsey Electricity pelos tours nas instalações deles.

Obrigado à Gilby Productions por fornecerem o serviço de TinyURL. TinyURL é uma marca registrada da Gilby Productions. Obrigado a Eric Johnston e ao Satellite Signals Limited por fornecerem uma boa interface para os mapas [www.satsig.net].

Obrigado a David Stern pelo porta-retato, à Becky Smith pela arte icônica, e à Claire Jervis pelas fotos nas páginas 37, 113, 120, 196, 316, 382, 425. Por outras fotos, obrigado a Robert MacKay, Eric LeVin, Marcus Freen, Rosie Ward, Harry Bhadeshia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le

Quéré, David Faiman, Kele Baker, Tim Jervis, e a contribuintes anônimos da wikipedia. Eu sou grato ao escritório do Prefeito de Londres por fornecer cópias de propagandas.

A arte na página 309 é "feita em Londres", e na página 381, "Sunflowers", por Banksy www.banksy.co.uk. Obrigado, Banksy!

Serviços de compensação foram fornecidos pela cheatneutral.com.

Este livro é escrito em LATEX no sistema operacional Ubuntu GNU/Linux utilizando software gratuito. As imagens foram desenhadas utilizando-se gnuplot e metapost. Muitos dos mapas foram criados com o software gtm de Paul Wessel e Walter Smith. Obrigado também a Martin Weinelt e OMC. Obrigado à Donald Knuth, Leslie Lamport, Richard Stallman, Linus Torvalds e todos aqueles que contribuíram com o software livre.

Finalmente, eu devo o maior débito de gratidão à Fundação Gatsby Charitable, que apoiou a mim e ao meu grupo de pesquisa antes, durante e após a escrita deste livro.