

# Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho



**Um futuro com  
energia sustentável:  
iluminando o caminho**



# Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho



Título original

*Lighting the way: Toward a sustainable energy future*

ISBN 978-90-6984-531-9

Copyright InterAcademy Council, 2007

Tradução

*Maria Cristina Vidal Borba*

*Neide Ferreira Gaspar*

*Reprodução não comercial*

*A informação deste relatório foi produzida visando que estivesse prontamente à disposição para uso não comercial, pessoal e público, podendo ser reproduzida, parcial ou totalmente, através de qualquer meio, livre de pagamento ou permissão do InterAcademy Council. Apenas solicitamos que:*

- *Os usuários assegurem-se da precisão dos materiais reproduzidos;*
- *O InterAcademy Council seja identificado como fonte;*
- *Não se declare que a reprodução é a versão oficial dos materiais reproduzidos, nem que tenha sido feita por um afiliado do InterAcademy Council, nem que tenha a aprovação do mesmo.*

*Reprodução comercial*

*A reprodução parcial ou total em múltiplas cópias do material deste relatório para fins de redistribuição comercial é proibida, a menos que haja permissão escrita do InterAcademy Council. Para obter permissão para reproduzir o material deste relatório para fins comerciais, por favor contate o InterAcademy Council, através da Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, P.O. Box 19121, NL-1000 GC Amsterdam. The Netherlands, secretariat@iac.knaw.nl*

Catálogo-na-publicação elaborada pelo Centro de Documentação e Informação da FAPESP

---

Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho / Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo ; tradução, Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. - [São Paulo] : FAPESP ; [Amsterdã] : InterAcademy Council ; [Rio de Janeiro] : Academia Brasileira de Ciências, 2010.  
300 p. : il. ; 24 cm.

Tradução de: *Lighting the way: toward a sustainable energy future*, 2007.

1. FAPESP. 2. Pesquisa e desenvolvimento. 3. Ciência. 4. Tecnologia. 5. Recursos energéticos. 6. Mudança climática. I. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. II. Título: Iluminando o caminho.

CDD 507.208161

02/10

---

Depósito Legal na Biblioteca Nacional, conforme Lei n.º 10.994, de 14 de dezembro de 2004.

## Energia sustentável para o desenvolvimento

Com grande satisfação a Academia Brasileira de Ciências e a Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo apresentam a versão em português do relatório produzido sob a coordenação de José Goldemberg e Steven Chu a pedido do Conselho InterAcademias.

Intitulado *Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho* (*Lighting the way: Toward a sustainable energy future*, na edição original), o trabalho trata dos desafios perante o mundo moderno no que diz respeito à geração de energia. Como se tornou bem conhecido em nosso dias, a produção de energia tende, na maior parte dos casos, a criar emissão de gás carbônico e a contribuir para o efeito estufa que altera o clima global. O desenvolvimento econômico e social tende sempre a criar demanda por mais energia, fato bem documentado no relatório ao mostrar, por exemplo, que, enquanto em países desenvolvidos o consumo de eletricidade chega a 10 mil kWh por pessoa, nos países em desenvolvimento, nos quais está a maior parte da população mundial, esse consumo é menor do que 2 mil kWh por pessoa. A aspiração ao desenvolvimento da maior parte da população mundial só poderá ser realizada se houver um aumento notável na eficiência do uso de energia e na criação de novas fontes de energia que sejam sustentáveis.

O relatório foi preparado por um comitê de cientistas de vários países, sob a coordenação de dois reconhecidos especialistas em energia. José Goldemberg, Professor Emérito da USP, recebeu em 2008 o Prêmio Planeta Azul, foi reitor da USP de 1986 a 1990 e, entre outros cargos de liderança, foi Secretário de Ciência e Tecnologia da Presidência da República (1990 a 1991), Ministro da Educação (1991 a 1992), Secretário do

Meio Ambiente da Presidência da República (1992), e Secretário do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2002 a 2006).

Steven Chu, ganhador do Prêmio Nobel de Física em 1997, dirigiu o Laboratório Nacional Lawrence em Berkeley e é atualmente Secretário de Energia dos Estados Unidos.

Esperamos que a publicação em português contribua para o debate sobre energia sustentável no Brasil.

**Jacob Pallis**

*Academia Brasileira de Ciências, Presidente*

**Carlos Henrique de Brito Cruz**

*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado  
de São Paulo, Diretor Científico*

## Prólogo

Conforme reconhecido pelo Protocolo de Kyoto em 1997, conseguir um futuro de energia sustentável é o grande desafio do século XXI. Os padrões atuais de recursos energéticos e de uso de energia se mostram prejudiciais para o bem-estar de longo prazo da humanidade. A integridade dos sistemas naturais essenciais já está em risco por causa da mudança climática causada pelas emissões de gás estufa na atmosfera. Ao mesmo tempo, os serviços básicos de energia atualmente não estão disponíveis a um terço das pessoas do mundo e mais energia será essencial para um desenvolvimento sustentável e equitativo. Os riscos à segurança energética nacionais e globais são ainda mais exacerbados pelo custo crescente da energia e pela competição pelos recursos energéticos distribuídos irregularmente.

Esse problema global exige soluções globais. Até agora, não se tem feito bom proveito dos melhores cientistas mundiais e de suas importantes instituições, mesmo sendo essas instituições um recurso poderoso para se comunicar além das fronteiras nacionais e para se alcançar um consenso sobre abordagens racionais para se tratar dos problemas de longo prazo desse tipo. As academias de ciência e de engenharia do mundo – cujas opiniões se baseiam em evidências e análises objetivas – têm o respeito de seus governos nacionais, mas não são controladas pelos governos. Assim, por exemplo, os cientistas de todas as partes geralmente concordam mesmo quando seus governos têm agendas diferentes. Muitos líderes políticos reconhecem o valor de basear suas decisões nos melhores conselhos científicos e tecnológicos e cada vez mais convocam suas próprias academias de ciência e engenharia para obter orientações para suas nações. Mas a possibilidade e o valor de tal orientação em nível internacional – de uma fonte análoga baseada em associações de academias – é um desenvolvimento mais recente. Na verdade, apenas com o estabelecimento do Inter-



Academy Council (IAC – Conselho InterAcademias) em 2000 essa orientação pode se tornar um assunto objetivo.<sup>1</sup> Até agora, três importantes relatórios foram liberados pelo InterAcademy Council: sobre a formação de capacidade institucional em todas as nações para ciência e tecnologia (C&T), sobre agricultura africana e sobre mulheres para a ciência.<sup>2</sup>

A pedido do governo da China e do Brasil, e com forte apoio do Secretário Geral das Nações Unidas, Sr. Kofi Annan, a Diretoria do IAC reuniu a *expertise* de cientistas e engenheiros de todo o mundo para produzir *Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho*. Chamamos aqui atenção especial para as mensagens importantes dos três relatórios.

Primeiramente, a ciência e a engenharia fornecem princípios críticos de orientação para se atingir um futuro de energia sustentável. Como afirma o relatório, “a ciência fornece a base para um discurso racional sobre compensações e riscos, para selecionar prioridades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), e para identificar novas oportunidades – a abertura é um de seus valores dominantes. A engenharia, através da inexorável otimização das tecnologias mais promissoras, pode apresentar soluções – aprender fazendo está entre seus valores dominantes. Pode-se obter melhores resultados se muitos caminhos forem explorados paralelamente, se os resultados forem avaliados com medidas de desempenho real, se esses resultados forem ampla e detalhadamente relatados, e se as estratégias estiverem abertas para revisão e adaptação”.

Em segundo lugar, atingir um futuro de energia sustentável exigirá um esforço intensivo de formação de capacidade, bem como a partici-

---

1 A Diretoria do InterAcademy Council, que conta com 18 membros, é composta de presidentes de quinze academias de ciência e de organizações equivalentes que representam Brasil, Chile, China, França, Alemanha, Hungria, Índia, Irã, Japão, Malásia, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos, mais a Academia Africana de Ciências e a Academia de Ciências para o Mundo em Desenvolvimento (TWAS), representantes do InterAcademy Panel (IAP) de academias científicas, o International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS) e o InterAcademy Medical Panel (IAMP) de academias médicas.

2 InterAcademy Council, *Inventing a Better Future: A Strategy for Building Worldwide Capacities in Science and Technology*, Amsterdam, 2004; InterAcademy Council, *Realizing the Promise and Potential of African Agriculture*, 2004; InterAcademy Council, *Women for Science: An Advisory Report*, Amsterdam, 2006. (Acessível em [www.interacademycouncil.net](http://www.interacademycouncil.net))

pação de um amplo número de instituições e de grupos de apoio. O relatório enfatiza que “críticas para o sucesso de todas as tarefas à frente, são as habilidades dos indivíduos e instituições para efetuar mudanças nos recursos energéticos e seu uso. A formação de capacidade de *expertise* individual e efetividade institucional devem se tornar uma prioridade urgente de todos os principais atores – organizações multinacionais, governos, corporações, instituições educacionais, organizações sem fins lucrativos e a mídia. Acima de tudo, o público em geral pode receber informações confiáveis sobre as escolhas à frente e sobre as ações necessárias para se atingir um futuro de energia sustentável”.

Em terceiro lugar, embora atingir um futuro de energia sustentável exija abordagens de longo alcance, dados os prospectos assustadores da mudança climática global, o Painel de Estudos julga urgente que o seguinte seja feito expedita e simultaneamente:

Devem aumentar os esforços conjuntos para melhorar a eficiência energética e reduzir a intensidade de carbono da economia mundial, incluindo a introdução mundial de sinalização de preços para emissões de carbono, considerando os diferentes sistemas econômicos e energéticos em países diferentes.

Tecnologias devem ser desenvolvidas e implementadas para capturar e sequestrar carbono de combustíveis fósseis, especialmente do carvão.

O desenvolvimento e a implementação de tecnologias de energias renováveis devem ser acelerados de forma ambientalmente responsável.

Também urgente como imperativo moral, social e econômico, devem-se fornecer serviços de energia sustentável modernos, eficientes e ambientalmente compatíveis às pessoas mais pobres deste planeta – que vivem principalmente em países em desenvolvimento. As academias de ciência, engenharia e medicina do mundo, em parceria com as Nações Unidas e muitas outras instituições e indivíduos envolvidos, estão alinhadas para trabalhar juntos para ajudar a enfrentar esse desafio urgente.

Agradecemos aos membros do Painel de Estudos, revisores e aos dois ilustres monitores de revisão que contribuíram para o sucesso da conclusão deste relatório. Também merecedores de apreço especial são os copre-

sidentes e o grupo de trabalho que empenhou tanto tempo e dedicação para assegurar que o produto final fizesse a diferença.

O InterAcademy Council reconhece e agradece a liderança apresentada por: governo da China, governo do Brasil, Fundação William and Flora Hewlett, Fundação de Energia, Fundação Alemã de Pesquisa (DFG) e à Fundação das Nações Unidas, que forneceram apoio financeiro para a condução do estudo, para a impressão e distribuição deste relatório. Também agradecemos às seguintes organizações por sua contribuição em receber as oficinas regionais de energia do IAC: Academia Brasileira de Ciências, Academia Chinesa de Ciências, Academia Francesa de Ciências, Academia Nacional de Ciências da Índia e Conselho de Ciências do Japão.

**Bruce ALBERTS**

*Presidente anterior da Academia  
Nacional de Ciências dos EUA, copresidente  
do InterAcademy Council*

**LU Yonxiang**

*Presidente da Academia Chinesa de Ciências,  
copresidente do InterAcademy Council*

# Sumário

Energia sustentável para o desenvolvimento .....	5
Prólogo .....	7
Painel de Estudos .....	13
Prefácio .....	15
Revisão do relatório .....	21
Agradecimentos .....	23
Resumo executivo .....	27
<b>1. O desafio da energia sustentável .....</b>	<b>55</b>
1.1 O escopo do desafio .....	59
1.2 A escala do desafio .....	64
1.3 A necessidade de abordagens holísticas .....	72
1.4 Pontos principais .....	78
Referências bibliográficas .....	81
<b>2. Demanda energética e eficiência .....</b>	<b>83</b>
2.1 Avaliando o potencial para avanços em eficiência energética .....	89
2.2 Barreiras para a obtenção de economias custo-efetivas de energia .....	96
2.3 O setor predial .....	99
<i>Edifícios residenciais</i> .....	101
<i>Edifícios comerciais</i> .....	105
<i>Políticas para promover eficiência energética em edifícios</i> .....	107
2.4 Eficiência energética industrial .....	109
<i>Tendências de consumo de energia no setor industrial</i> .....	109
<i>Eficiência energética potencial no setor industrial</i> .....	111
<i>Políticas para promover eficiência energética no setor industrial</i> .....	113
2.5 Transporte e eficiência energética .....	116
<i>Tendências de consumo de energia no setor de transportes</i> .....	116
<i>Potencial de eficiência energética no setor de transportes</i> .....	118
<i>Políticas para promover eficiência energética no setor de transportes</i> .....	123
2.6 Pontos principais .....	128
Referências bibliográficas .....	131
<b>3. Fornecimento de energia .....</b>	<b>135</b>
3.1 Os combustíveis fósseis .....	138
Status das reservas mundiais de combustíveis fósseis .....	139
<i>Definindo o desafio da sustentabilidade para combustíveis fósseis</i> .....	141
<i>Opções de tecnologia avançada do carvão</i> .....	144
<i>Captura e sequestro de carbono</i> .....	151
CAPTURA DE CARBONO .....	152
SEQUESTRO DE CARBONO .....	155
PROJETOS EXISTENTES E PLANEJADOS PARA CAPTURA E SEQUESTRO DE CARBONO .....	159
<i>Recursos não convencionais, incluindo os hidratos de metano</i> .....	161
<i>Em resumo: Os combustíveis fósseis</i> .....	163

3.2 Energia nuclear .....	164
<i>Desafios para a energia nuclear</i> .....	172
CUSTO .....	175
SEGURANÇA DAS INSTALAÇÕES E DESCARTE DE RESÍDUOS .....	177
Proliferação nuclear e aceitação pública .....	182
Em resumo: A energia nuclear .....	184
3.3 Renováveis que não a biomassa .....	185
<i>Contribuição dos recursos renováveis</i> .....	187
<i>Questões e obstáculos para as opções não biomassa</i> .....	192
EÓLICA .....	194
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	198
ENERGIA SOLAR TÉRMICA .....	200
ENERGIA HIDRELÉTRICA .....	203
GEOTÉRMICA .....	205
<i>Em resumo: Opções renováveis que não a biomassa</i> .....	206
3.4 Biomassa .....	207
<i>O futuro da biomassa moderna</i> .....	212
<i>Em resumo: Biomassa</i> .....	221
3.5 Resumo dos pontos principais .....	222
Referências bibliográficas .....	224
<b>4. O papel dos governos e a contribuição da ciência e tecnologia</b> .....	<b>229</b>
4.1 Opções de políticas .....	233
4.2 Opções de políticas em contexto .....	239
4.3 A importância de sinais de mercado .....	241
4.4 O papel da ciência e tecnologia .....	245
4.5 O papel da política e da tecnologia no contexto de um país em desenvolvimento .....	253
4.6 Pontos principais .....	258
Referências bibliográficas .....	260
<b>5. O Caso para ação imediata</b> .....	<b>263</b>
Conclusões, recomendações, ações .....	266
Conclusão 1 .....	267
Conclusão 2 .....	269
Conclusão 3 .....	271
Conclusão 4 .....	273
Conclusão 5 .....	275
Conclusão 6 .....	277
Conclusão 7 .....	279
Conclusão 8 .....	281
Conclusão 9 .....	283
Iluminando o caminho .....	285
<b>Anexos</b> .....	<b>287</b>
Anexo A. Biografias do Painel de Estudos .....	289
Anexo B: Siglas e abreviações .....	295
Anexo C: Fatores comuns de conversão de unidade de energia e símbolos das unidades .....	296
Anexo D: Lista de quadros, figuras, e tabelas .....	297

## Painel de Estudos

### Copresidentes

**Steven CHU** (Estados Unidos), diretor do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, professor de Física e professor de Biologia Molecular e Celular da Universidade da Califórnia em Berkeley, Califórnia, EUA.

**José GOLDEMBERG** (Brasil), professor da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

### Membros

**Shem ARUNGU OLENDE** (Quênia), secretário geral da Academia Africana de Ciências e presidente e principal executivo da Quecosul Ltda., Nairobi, Quênia.

**Mohamed EL-ASHRY** (Egito), membro sênior da Fundação das Nações Unidas, Washington D.C., EUA.

**Ged DAVIS** (Reino Unido), copresidente da Global Energy Assessment, Instituto Internacional para Análise de Sistemas Aplicados (IIASA), Laxenburg, Áustria.

**Thomas JOHANSSON** (Suécia), professor de Análise de Sistemas Energéticos e diretor do Instituto Internacional para Economia Ambiental Industrial (IIIEE), Universidade de Lund, Suécia.

**David KEITH** (Canadá), diretor do Grupo ISEEE de Sistemas Energéticos e Ambientais, professor e Presidente de Pesquisa sobre Energia e Meio Ambiente do Canadá, Universidade de Calgary, Canadá.

**LI Jinghai** (China), vice-presidente da Academia Chinesa de Ciências, Pequim, China.

**Nebosja NAKICENOVIC** (Áustria), professor de Economia Energética, Universidade de Tecnologia de Viena, Viena, Áustria e líder dos Programas de Energia e Tecnologia, IIASA (Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados), Laxemburgo, Áustria.

**Rajendra PACHAURI** (Índia), diretor geral do Instituto de Energia e Recursos, Nova Délhi, Índia, e presidente do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.

**Majid SHAFIE-POUR** (Irã), professor e Membro da Diretoria da Faculdade de Meio Ambiente, Universidade de Teerã, Irã.

**Evald SHIPILRAIN** (Rússia), chefe do Departamento de Energia e de Tecnologia em Energia, Instituto para Altas Temperaturas, Academia Russa de Ciências, Moscou, Federação Russa.

**Robert SOCOLOW** (Estados Unidos), professor de Mecânica e Engenharia Aeroespacial, Universidade de Princeton, Princeton, Nova Jérsei, EUA.

**Kenji YAMAJI** (Japão), professor de Engenharia Elétrica, Universidade de Tóquio, membro do Conselho de Ciências do Japão, vice-presidente do Conselho do IIASA, presidente do Conselho de Certificação do Poder Verde, Tóquio, Japão.

**YAN Luguang** (China), presidente do Comitê Científico do Instituto de Engenharia Elétrica, Academia Chinesa de Ciências e presidente honorário da Universidade de Ningbo, Pequim, China.

### **Grupo de Trabalho**

**Jos van RENSWOUDE**, diretor de Estudos

**Dilip AHUJA**, consultor

**Marika TATSUTANI**, redator/ editor

**Stéphanie A. JACOMETTI**, coordenadora de Comunicações.

## Prefácio

A prosperidade humana sempre esteve intimamente ligada à nossa capacidade de capturar, coletar e aproveitar energia. O controle do fogo e a domesticação de plantas e animais foram dois dos fatores essenciais que permitiram que nossos ancestrais fizessem a transição de uma existência rude e nômade para sociedades estáveis e com raízes que pudessem gerar a riqueza coletiva necessária para formar civilizações. Durante milênios, a energia em forma de biomassa e biomassa fossilizada foi utilizada para cozinhar e aquecer, além da criação de materiais que iam do tijolo ao bronze. Apesar desses desenvolvimentos, na verdade a riqueza relativa em todas as civilizações foi fundamentalmente definida pelo acesso e controle da energia, conforme medido pelo número de animais e humanos que serviam às ordens de um indivíduo específico.

A Revolução Industrial e tudo o que se seguiu lançaram uma parcela cada vez maior da humanidade para uma era dramaticamente diferente e mágica. Vamos ao mercado local puxados por centenas de cavalos e podemos voar ao redor do mundo com a força de *centenas de milhares* de cavalos. Nossas casas são aquecidas no inverno, frescas no verão e iluminadas à noite. O uso amplamente disseminado de energia é a razão fundamental para centenas de milhares de humanos gozarem um alto padrão de vida.

O que tornou isso possível foi nossa habilidade de usar a energia com cada vez mais destreza. A ciência e a tecnologia (C&T) nos forneceram os meios para obter e explorar fontes de energia, principalmente combustíveis fósseis, para que o consumo de energia do mundo atual seja equivalente a cerca de mais de *dezessete bilhões* de cavalos trabalhando para o mundo 24 horas por dia, 7 dias por semana, 365 dias por ano. Visto por outro ângulo, a quantidade de energia necessária para manter um ser humano vivo e sustentado varia entre 2 000 e 3000 quilocalorias por dia. Em contraste, o consumo médio de energia por pessoa nos Estados Unidos é



de aproximadamente 350 x 10<sup>9</sup> joules por ano, ou 230 000 quilocalorias por dia. O americano médio, portanto, consome uma energia equivalente às necessidades biológicas de 100 pessoas, enquanto o resto dos países da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) usa energia equivalente às necessidades de aproximadamente 50 pessoas. Em comparação, a China e a Índia atualmente consomem cerca de 9-30 vezes menos energia por pessoa do que os Estados Unidos. O consumo mundial de energia praticamente dobrou entre 1971 e 2004, e espera-se que cresça mais 50% até 2030, à medida que os países em desenvolvimento migram – num cenário de negócios como de costume – para uma prosperidade econômica profundamente enraizada no uso crescente de energia.

O caminho que o mundo está tomando atualmente não é sustentável: há custos associados ao uso intensivo de energia. O uso atual e a grande dependência de combustíveis fósseis estão levando à degradação dos meios ambientes locais, regionais e globais. Assegurar o acesso a recursos vitais de energia, principalmente de petróleo e gás natural, tornou-se um fator definitivo nos alinhamentos políticos e estratégias. O acesso iníquo à energia, principalmente das pessoas em áreas rurais dos países em desenvolvimento, e a consequente exaustão das fontes baratas de energia terão profundos impactos sobre a segurança internacional e sobre a prosperidade econômica.

Apesar de o cenário atual de energia parecer sombrio, acreditamos que há soluções sustentáveis para o problema energético. Uma combinação de políticas fiscais e regulatórias locais, nacionais e internacionais pode acelerar consideravelmente a disseminação das eficiências energéticas existentes, que permanecem como a parte mais prontamente implementável da solução. Grandes ganhos em melhorias de eficiência energética têm sido alcançados em anos recentes, e muito mais ganhos podem ser obtidos em países industrializados com mudanças de políticas que incentivem o desenvolvimento e a implementação de tecnologias já existentes e futuras. É de grande interesse econômico e societário dos países em desenvolvimento “saltar” a trajetória energética esbanjadora seguida pelos países industrializados atualmente. Devem-se introduzir mecanismos que

incentivem e auxiliem esses países a aplicar tecnologias de energia eficientes e ambientalmente compatíveis o quanto antes.

A transição oportuna para o uso sustentável de energia também exigirá políticas para gerar ações que otimizem as consequências macroeconômicas do uso da energia de curto e de longo prazo. A descarga de efluentes brutos em um rio sempre será mais barata, em nível microeconômico, do que o tratamento dos resíduos, especialmente para os poluidores à montante. Na macroescala, porém, em que os custos de longo prazo à saúde humana, à qualidade de vida e ao meio ambiente forem incluídos nos cálculos, o tratamento dos efluentes claramente se torna uma opção de baixo custo para a sociedade como um todo. As consequências previstas da mudança climática incluem uma redução maciça na água fornecida mundialmente pela eliminação paulatina das geleiras; pela devastação cada vez maior das enchentes, secas, incêndios, tufões e furacões; deslocamento permanente de dezenas a centenas de milhares de pessoas devido à elevação do nível do mar; alterações na distribuição espacial de alguns vetores de doenças infecciosas, especialmente onde esses vetores ou patógenos dependem da temperatura e da umidade; e perda significativa da biodiversidade.<sup>1</sup> De forma semelhante, a poluição atmosférica relativa à energia impõe impactos adversos consideráveis à saúde de um grande número de pessoas em todo o mundo – criando riscos e custos que normalmente não são capturados nas escolhas do mercado de energia nem nas decisões de políticas. Assim, torna-se crítico considerar os custos adicionais que serão necessários para mitigar as potenciais consequências sociais e ambientais adversas ao tentar avaliar a verdadeira opção de baixo custo em qualquer análise macroeconômica de longo prazo sobre o uso e a produção de energia. O verdadeiro custo das emissões de carbono e outros efeitos adversos devem ser computados nas decisões de políticas.

Além dos extensivos avanços de eficiência energética e rápida im-

---

<sup>1</sup> Esses e outros impactos estão previstos com alto nível de confiança no Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007; <http://www.ipcc.ch/SPM13a-pr07.pdf>

plementação de tecnologias de baixo teor de carbono, incluindo a energia nuclear e sistemas avançados de combustíveis fósseis, com captura e sequestro de carbono, afinal, um futuro de energia sustentável pode ser mais facilmente alcançado se fontes de energia renovável se tornarem uma parte significativa do portfólio de oferta de energia. Mais uma vez, ciência e tecnologia são ingredientes essenciais para a solução. Avanços significativos na conversão de energia solar em eletricidade são necessários, enquanto o desenvolvimento de tecnologias econômicas e de grande escala de armazenagem de energia e de transmissão de longa distância permitiriam que recursos transitórios como eólico, fotovoltaico solar e geração térmica se tornassem parte da base de geração de energia. Também, métodos eficientes de conversão de biomassa celulósica em combustível de transporte moderno podem ser desenvolvidos e reduzir consideravelmente o rastro de carbono desse combustível cada vez mais precioso.

Este relatório do InterAcademy Council (IAC) é o resultado de uma série de oficinas e estudos comissionados do IAC e patrocinados pela academia, que foram usados para complementar os muitos estudos anteriores sobre questões energéticas. Talvez a característica mais marcante deste relatório seja que o Painel de Estudos que o produziu foi escolhido por indicações solicitadas a mais de 90 academias nacionais de ciências em todo o mundo. Os membros do painel usaram o conhecimento de seus quadros de especialistas internacionais de forma que a discussão sobre o desafio da energia e suas soluções potenciais se aplicasse a todos os países em seus vários estágios de desenvolvimento. O relatório fornece um mapa do caminho – apresentado no Capítulo 5: O Caso para Ação Imediata – de soluções de C&T para se obter um futuro de energia sustentável por todo o mundo.

Esperamos que este relatório do IAC seja utilizado como um ponto de partida para discussões que visem a promover a mudança internacional. A fim de iluminar ainda mais o caminho para um futuro de energia sustentável, os dois copresidentes deste estudo pessoalmente recomendam que o Secretário Geral das Nações Unidas designe um pequeno comitê de especialistas para orientá-lo, bem como as nações membros. Este comitê teria a tarefa de identificar métodos que tenham promovido

eficiência energética com sucesso, bem como inovações tecnológicas e soluções que facilitem sua modificação efetiva para exportá-los a outros países. O comitê também pode promover o diálogo entre os elaboradores de políticas e *stakeholders* industriais para identificar incentivos, políticas e regulamentações mais efetivas para estimular a implementação de soluções de energia sustentável. Mudanças adequadamente projetadas de políticas governamentais podem, como o leme de um navio, ser utilizadas para sutilmente guiar as profundas mudanças de direção. Dois exemplos de conjuntos de políticas relativamente modestas, mas de grande efeito que provocaram mudanças importantes nos sistemas econômicos, são o exemplo da Califórnia da estabilização do consumo de eletricidade *per capita* nos últimos 30 anos, e o exemplo do Brasil com o nascimento da indústria dos biocombustíveis, que saltou bem adiante de países economicamente mais desenvolvidos.

O apoio agressivo da ciência e tecnologia de energia, associado a incentivos que aceleram o desenvolvimento e implementação simultâneos de soluções inovadoras podem transformar todo o cenário de demanda e oferta de energia. Acreditamos que isso é possível, tanto técnica quanto economicamente, para elevar as condições de vida de quase toda a humanidade para o nível agora desfrutado por uma grande classe média nos países industrializados — ao mesmo tempo em que reduz substancialmente os riscos de segurança ambiental e de energia associados aos padrões atuais de produção e de uso de energia. É imperativo que sejamos bem sucedidos ao enfrentar este desafio.

**Steven CHU**

*Copresidente do Painel de Estudos*

**José GOLDEMBERG**

*Copresidente do Painel de Estudos*



## Revisão do Relatório

A primeira versão deste relatório foi revisada externamente por 15 renomados especialistas internacionais, escolhidos por suas diferentes perspectivas, conhecimento técnico e representação geográfica, de acordo com procedimentos aprovados pela Diretoria do InterAcademy Council (IAC). O objetivo desta revisão independente foi proporcionar comentários francos e críticos que auxiliassem o IAC a produzir um relatório confiável que atendesse seus padrões de objetividade, veracidade e rápida reação ao trabalho do estudo. O procedimento de revisão e o manuscrito original permanecem confidenciais para proteger a integridade do processo deliberativo. O IAC agradece as seguintes pessoas pela revisão deste relatório:

**Eric ASH**, ex-reitor do Imperial College, Londres, Reino Unido.

**Rangan BANERJEE**, professor de Engenharia de Sistemas Energéticos, Instituto Indiano de Tecnologia – Bombay, Mumbai, Índia.

**Edouard BRÉZIN**, professor de Física, Ecole Normale Supérieure, Paris, França; ex-presidente da Academia Francesa de Ciências.

**CHENG Yong**, diretor e professor do Instituto de Conversão de Energia de Guangzhou, Guangdong, China.

**Adinarayantampi GOPALAKRISHNAN**, professor de Energia e Segurança, ASCI, Hyderabad, Índia.

**Jack JACOMETTI**, vice-presidente da Shell Oil Corporation, Londres, Reino Unido.

**Steven KOONIN**, cientista principal, British Petroleum, P.L.C., Londres, Reino Unido.

**LEE Yee Cheong**, membro da Comissão de Energia da Malásia, Kuala Lumpur; ex-presidente da Federação Mundial de Organizações de Engenharia.

**Isaias C. MACEDO**, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

**Maurice STRONG**, ex-subsecretário Geral das Nações Unidas; secretário-geral da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992.

**Maurício TOLMASQUIM**, presidente da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), Rio de Janeiro, Brasil.

**Engin TURE**, diretor associado do Centro Internacional para Tecnologias da Energia do Hidrogênio – UNIDO, Istambul, Turquia.

**Hermann-Josef WAGNER**, professor de Engenharia, Ruhr-University Bochum, Alemanha.

**Dietrich H. WELTE**, ex-professor de Geologia, RWTH Aachen University; fundador da IES GmbH Integrated Exploration Systems, Aachen, Alemanha.

**Jacques L. WILLEMS**, professor emérito da Faculdade de Engenharia, Ghent University, Ghent, Bélgica.

Apesar de os revisores listados acima terem fornecido muitas sugestões e comentários construtivos, não se pediu a eles que aprovassem as conclusões e recomendações; tampouco viram a versão final do relatório antes de sua divulgação.

A revisão deste documento foi supervisionada por dois monitores de revisão:

**Ralph J. CICERONE**, presidente da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos, Washington, D.C., Estados Unidos.

**R. A. MASHELKAR**, presidente da Academia Nacional de Ciências da Índia; e Bhatnagar Fellow, Laboratório Nacional de Química, Pune, Índia.

Indicados pelos copresidentes do IAC, os monitores de revisão foram incumbidos de cuidar para que o exame independente deste relatório fosse conduzido de acordo com os procedimentos do IAC e para que todos os comentários de revisão fossem cuidadosamente considerados. No entanto, a responsabilidade pelo conteúdo final deste relatório é inteiramente dos autores do Painel de Estudos e do InterAcademy Council.

## Agradecimentos

O Painel de Estudos agradece aos participantes das sete oficinas consultivas realizadas durante este projeto. Os participantes das oficinas proporcionaram conhecimentos valiosos que permitiram identificar os principais desafios estratégicos e oportunidades, que efetivamente auxiliaram o Painel de Estudos a orientar suas deliberações e a elaborar este relatório.

Os participantes das oficinas foram:

- *Oficina de Durban.*

Robert Baeta, Douglas Banks, Abdelfattah Barhdadi, Osman Benchikh, Mosad Elmissiry, Joseph Essandoh-Yeddu, Moses Haimbodi, Manfred Hellberg, I. P. Jain, Dirk Knoesen, Isaias C. Macedo, Cédric Phillibert, Youba Sokona, Samir Succar, Annick Suzor Weiner e Brian Williams;

- *Oficina de Beijing.*

Paul Alivisatos, Bojie Fu, E. Michael Campbell, Chongyu Sun, Charles Christopher, Dadi Zhou, Fuqiang Yang, Hao Wen, Hin Mu, Hu Min, Kazunari Domen, Kebin He, Luguang Yan, Shuanshi Fan, Jack Siegel, Peng Chen, Qingshan Zhu, Xiu Yang, Xudong Yang, Wei Qin, Wenzhi Zhao, Yi Jiang, Yu Joe Huang, Zheng Li, Zhenyu Liu e Zhihong Xu;

- *Oficina de Berkeley.*

Paul Alivisatos, E. Michael Campbell, Mildred Dresselhaus, Kazunari Domen, Jeffrey Greenblatt, Adam Heller, Robert Hill, Martin Hoffert, Marcelo Janssen, Jay Keasling, Richard Klausner, Banwari Larl, Nathan S. Lewis, Jane Long, Stephen Long, Amory Lovins, Thomas A.



Moore, Daniel Nocera, Melvin Simon, Christopher Somerville, John Turner, Craig Venter e Zhongxian Zhao;

- *Oficina do Rio de Janeiro.*

Alfesio L. Braga, Kamala Ernest, André Faaij, Patrícia Guardabassi, Afonso Henriques, Gilberto Januzzi, Henry Josephy, Jr., Eric D. Larson, Lee Lynd, José R. Moreira, Marcelo Poppe, Fernando Reinach, Paulo Saldiva, Alfred Szwarc, Suani Coelho Teixeira, Boris Utria, Arnaldo Walter e Brian Williams;

- *Oficina de Nova Délhi.*

Alok Adholeya, Shoibal Chakravarty, P. Chellapandi, Ananth Chikkatur, K. L. Chopra, S. P. Gon Choudhury, Piyali Das, Sunil Dhingra, I. V. Dulera, H. P. Garg, A. N. Goswami, H. B. Goyal, R. B. Grover, A. C. Jain, S. P. Kale, Ashok Khosla, L. S. Kothari, Sameer Maithel, Dinesh Mohan, J. Nanda, C. S. R. Prasad, S. Z. Qasim, Baldev Raj, Surya P. Sethi, M. P. Sharma, R. P. Sharma, R. R. Sonde, S. Sriramachari, G.P. Talwar, A. R. Verma, R. Vljayashree e Amit Walia;

- *Oficina de Paris.*

Edouard Brézin, Bernard Bigot, Leonid A. Bolshov, Alain Bucaille, Ayse Erzan, Harold A. Feiveson, Sergei Filippov, Karsten Neuhoff, Lars Nilsson, Martin Patel, Peter Pearson, Jim Platts, Mark Radka, Hans-Holger Rogner, Oliver Schaefer e Bent Sorensen;

- *Oficina de Tóquio.*

Akira Fujishima, Hiromichi Fukui, Hideomi Koinuma, Kiyoshi Kurokawa, Takehiko Mikami, Chikashi Nishimura, Zempachi Ogumi, Ken-ichiro Ota, G. R. Narasimha Rao, Ayao Tsuge e Harumi Yokokawa.

O Painel de Estudos também agradece à Academia Brasileira de Ciências, à Academia Chinesa de Ciências, à Academia Francesa de Ciências, à Academia Nacional de Ciências da Índia e ao Conselho de Ciên-

cias do Japão por suas contribuições em sediar as oficinas regionais de energia do IAC.

O Painel de Estudos é grato pela contribuição dos autores que prepararam os artigos de base que, juntamente com as oficinas consultivas, forneceram os blocos essenciais para a construção do relatório. Os que participaram deste trabalho foram: John Ahearne, Robert U. Ayres, Isaias de Carvalho Macedo, Vibha Dhawan, J. B. Greenblatt, Jiang Yi, Liu Zhen Yu, Amory B. Lovins, Cedric Philibert, K. Ramanathan, Jack Siegel, Xu Zhihong, Qingshan Zhu e Roberto Zilles.

O Painel de Estudos expressa sua grande gratidão pelas extraordinárias contribuições de Jos van Reswoude, diretor de Estudos, por organizar todo o processo do painel, juntamente com Dilip Ahuja, consultor, e Marika Tatsutani, redatora/editora, pela bem-sucedida realização do processo de escrita do relatório.

O Secretariado do InterAcademy Council (IAC) e a Academia Real Holandesa de Artes e Ciências (KNAW) em Amsterdã, onde está sediado o IAC, forneceram orientação e apoio para este estudo. Neste sentido, menção especial é feita ao auxílio prestado por John P. Campbell, diretor executivo do IAC; Albert W. Koers, conselheiro-geral do IAC; Stéphanie Jacometti, coordenadora de comunicações; e Margreet Haverkamp, Shu-Hui Tan, Floor van der Born, Ruud de Jong e Henrietta Beers, do Secretariado do IAC. Ellen Bouma, designer de Publicação, e Sheldon I. Lippman, consultor editorial, prepararam o texto final para publicação.

O Painel de Estudos expressa sua gratidão e reconhecimento pela liderança exercida pelo governo da China, pelo governo do Brasil, pela William and Flora Hewlett Foundation, pela Energy Foundation, pela Fundação de Pesquisa Alemã (DFG), e à Fundação das Nações Unidas, que proporcionaram apoio financeiro para a condução do estudo, como também para a impressão e distribuição deste relatório.

Por fim, o Painel de Estudos agradece à diretoria do InterAcademy Council, especialmente a Bruce Alberts e a Lu Yongxiang, copresidentes do IAC, por oferecer a oportunidade de se empreender este importante estudo.



## Resumo executivo

Um dos grandes desafios para a humanidade neste século é o de fazer a transição para um futuro de energia sustentável. O conceito de sustentabilidade energética abrange não apenas a necessidade imperiosa de garantir uma oferta adequada de energia para atender as necessidades futuras, mas fazê-lo de modo que: (a) seja compatível com a preservação da integridade fundamental dos sistemas naturais essenciais, inclusive evitando mudanças climáticas catastróficas; (b) estenda os serviços básicos de energia aos mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo que atualmente não têm acesso às modernas formas de energia; e (c) reduza os riscos à segurança e potenciais conflitos geopolíticos que de outra forma possam surgir devido a uma competição crescente por recursos energéticos irregularmente distribuídos.

### O desafio da energia sustentável

A tarefa é tão desalentadora quanto complexa e suas dimensões são ao mesmo tempo sociais, tecnológicas, econômicas e políticas, além de globais. As pessoas de todas as partes do mundo têm seu papel para moldar o futuro da energia através de seu comportamento, escolha de estilo de vida e preferências. E todos compartilham um risco significativo para atingir resultados sustentáveis.

A dinâmica que impele as tendências atuais de energia é enorme e será difícil contê-la no contexto dos altos níveis de consumo existente em muitos países industrializados; do crescimento contínuo da população; da rápida industrialização em países em desenvolvimento; da infraestrutura energética bem estabelecida, capital-intensiva e de longo prazo; e crescente demanda por serviços e amenidades relacionados à energia em todo o mundo. Apesar de haver grandes disparidades no consumo de energia *per capita* de país para país, domicílios relativamente ricos em qualquer lugar

tendem a adquirir aparelhos com consumo semelhante de energia. Assim sendo, o desafio e a oportunidade existem – nos países desenvolvidos e em desenvolvimento igualmente – para tratar das necessidades energéticas resultantes de forma sustentável, através de soluções efetivas pelo lado da demanda e pelo lado do fornecimento.

Os prospectos para o sucesso dependem, em grande parte, do fato de as nações poderem trabalhar juntas para assegurar que os recursos financeiros necessários, *expertise* técnica e vontade política sejam direcionados para acelerar a implementação de tecnologias mais limpas e eficientes nas economias mundiais que se industrializam rapidamente. Ao mesmo tempo, as desigualdades atuais, que deixam uma grande porção da população mundial sem acesso às modernas formas de energia e, portanto, privada das oportunidades de desenvolvimento humano e econômico, também devem ser abordadas.

Isto pode ser atingido sem comprometer outros objetivos de sustentabilidade, especialmente se for feito um avanço simultâneo para a introdução de novas tecnologias e redução da intensidade energética de outras partes em toda a economia mundial. O processo de se afastar de uma trajetória de “negócios como de costume” necessariamente será gradual e iterativo: porque elementos essenciais da infraestrutura energética têm uma expectativa de vida da ordem de uma a várias décadas, mudanças dramáticas no cenário macroscópico de energia levarão algum tempo. A defasagem inevitável no sistema, no entanto, também cria uma grande urgência. À luz dos crescentes riscos ambientais e de segurança energética, consideráveis esforços globais para passar a um cenário diferente têm de começar dentro dos próximos dez anos. A demora apenas aumenta a dificuldade de gerenciar os problemas criados pelo atual sistema energético mundial, bem como a probabilidade de que ajustes mais perturbadores e custosos tenham de ser feitos mais tarde.

O caso para ação urgente fica ressaltado quando as realidades ecológicas, imperativos econômicos e limitações de recursos que devem ser gerenciados no próximo século são vistos no contexto das atuais tendências energéticas mundiais. Tomando apenas duas dimensões do desafio – segurança do petróleo e mudança climática – as previsões atuais da Agência

Internacional de Energia, em seu *2006 World Energy Outlook* sugerem que, a continuarem as tendências de “negócios como de costume”, haverá um aumento de cerca de 40% no consumo de petróleo (comparado aos níveis de 2005) e um aumento de 55% nas emissões de dióxido de carbono mundiais (comparadas aos níveis de 2004) nos próximos 25 anos (isto é, até 2030). À luz da expectativa generalizada de que reservas de petróleo convencional relativamente barato e prontamente acessível chegarão a seu pico nas próximas décadas e das crescentes evidências de que a mitigação dos riscos responsáveis pela mudança climática exigirá consideráveis reduções das emissões globais de gás de efeito estufa dentro do mesmo espaço de tempo, a escala de desigualdade entre as tendências de energia de hoje e as necessidades de sustentabilidade de amanhã falam por si.

Para este relatório, um Painel de Estudos examinou as várias tecnologias e opções de recursos que podem desempenhar um papel na transição para um futuro de energia sustentável, juntamente com algumas opções de políticas e prioridades de pesquisa e desenvolvimento apropriados aos desafios à mão. Os principais resultados em cada uma dessas áreas são resumidos abaixo, seguidos de nove conclusões importantes com recomendações de ações a que chegou o Painel de Estudos.

### Demanda de energia e eficiência

Atingir os objetivos de sustentabilidade exigirá mudanças não apenas no modo pelo qual a energia é fornecida, mas no modo como é usada. Reduzir a quantidade de energia necessária para a entrega de vários bens, serviços ou amenidades é uma forma de abordar as externalidades negativas associadas aos sistemas energéticos atuais e fornece um complemento essencial aos esforços que visam à mudança do conjunto de tecnologias de fornecimento de energia e recursos. Oportunidades para melhorias na equação pelo lado da demanda de energia são tão ricas e diversas quanto as do lado da oferta e quase sempre oferecem benefícios econômicos significativos de curto e de longo prazo. Níveis altamente variáveis de consumo de energia *per capita* ou por produto interno bruto (PIB) nos países com padrões de vida comparáveis – apesar de com certeza serem parcialmente atribuíveis a fatores geográficos, estruturais e a outros fatores — sugerem

que o potencial para reduzir o consumo de energia em muitos países é substancial e pode ser atingido enquanto simultaneamente se alcançam melhorias significativas na qualidade de vida dos cidadãos mais pobres do mundo. Por exemplo, se medidas de bem-estar social, como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), forem graficamente comparadas ao consumo *per capita* de modernas formas de energia, como a eletricidade, descobre-se que algumas nações atingiram níveis relativamente altos de bem-estar com índices bem mais baixos de consumo de energia do que outros países de semelhante IDH, que é composto por indicadores de saúde, educação e renda. Do ponto de vista da sustentabilidade, então, não só é possível como desejável maximizar o avanço em direção a um melhor bem-estar social ao mesmo tempo em que se minimiza o crescimento concomitante de consumo de energia.

Na maioria dos países, a intensidade energética – isto é, a razão da energia consumida para os bens e serviços fornecidos – tem se reduzido, apesar de não ser em nível suficiente para compensar o crescimento econômico geral e reduzir o consumo de energia em termos absolutos. Aumentar este índice de redução de intensidade deve ser uma prioridade de políticas públicas amplamente adotadas. De um ponto de vista puramente tecnológico, o potencial para avanços é claramente imenso: avanços de ponta em engenharia, materiais e projetos de sistemas possibilitaram a construção de edifícios que apresentem um consumo líquido de energia zero e veículos que conseguem um consumo de gasolina radicalmente mais baixo por unidade de distância percorrida. O desafio, naturalmente, é reduzir o custo dessas novas tecnologias ao mesmo tempo em que se supera um grande número de outros obstáculos do mundo real – que vão da falta de informação e incentivos fracionados a preferências de consumidores por atributos de produtos em desacordo com a maximização da eficiência energética – que normalmente dificultam a ampla adoção dessas tecnologias pelo mercado.

A experiência aponta para a disponibilidade de instrumentos de políticas para superar algumas das barreiras que existem quanto a investimentos em eficiência avançada mesmo quando tais investimentos, com base apenas em considerações de energia e custo, são altamente custo-efetivos. As

melhorias na tecnologia de refrigeradores que ocorreu como resultado de padrões de eficiência de eletrodomésticos nos Estados Unidos fornece um exemplo convincente de como a intervenção de políticas públicas pode incentivar a inovação, possibilitando atingir ganhos substanciais de eficiência ao mesmo tempo em que mantém ou melhora a qualidade do produto ou serviço oferecido. Outros exemplos podem ser encontrados nos padrões de eficiência para edifícios, veículos e equipamentos somados a mecanismos de informação, de programas técnicos e de incentivos fiscais.

### Fornecimento de energia

O misto de oferta de energia mundial atualmente é dominado pelos combustíveis fósseis. Atualmente, carvão, petróleo e gás natural fornecem cerca de 80% da demanda de energia primária. A biomassa tradicional e a energia hidrelétrica de larga escala respondem por grande parte do restante. As modernas formas de energia renovável têm um papel relativamente pequeno hoje (da ordem de uma pequena porcentagem do conjunto atual de oferta). As preocupações com a segurança energética – particularmente relacionadas à disponibilidade de suprimentos convencionais de petróleo relativamente baratos e, em menor grau, de gás natural – continuam a ser importantes determinadores de políticas nacionais de energia em muitos países e uma fonte potente de tensões geopolíticas correntes e de vulnerabilidade econômica. No entanto, os limites ambientais, mais do que restrições de oferta, podem surgir como um desafio mais fundamental associado à dependência continuada de combustíveis fósseis. As reservas mundiais de carvão mineral sozinhas estão aptas a fornecer vários séculos de consumo continuado nos níveis atuais e podem fornecer uma fonte alternativa ao petróleo no futuro. Sem alguns meios para abordar as emissões de carbono, entretanto, a dependência continuada do carvão para uma grande porção do futuro *mix* mundial de energia apresentaria riscos inaceitáveis de mudanças climáticas.

Atingir objetivos de sustentabilidade exigirá mudanças significativas no fornecimento do *mix* de recursos atuais visando a um papel bem maior para tecnologias de baixo teor de carbono e fontes de energia renovável, incluindo biocombustíveis de ponta. O potencial de energia renovável



inexplorada do planeta, particularmente, é enorme e está amplamente distribuído em países desenvolvidos e em desenvolvimento da mesma forma. Em muitos cenários, explorar esse potencial oferece oportunidades únicas para apresentar objetivos ambientais e de desenvolvimento econômico.

Recentes desenvolvimentos, incluindo substanciais comprometermos com políticas, considerável redução de custos e forte crescimento em muitas indústrias de energia renovável são promissores, mas consideráveis dificuldades tecnológicas e mercadológicas ainda existem e têm de ser superadas para que a energia renovável desempenhe um papel significativamente maior no *mix* mundial de energia. Avanços em armazenagem de energia e tecnologias de conversão e na melhoria da capacidade de transmissão de eletricidade de longa distância poderiam fazer muito para expandir a base de recursos e reduzir os custos associados ao desenvolvimento de energia renovável. Enquanto isso, é importante notar que o recente crescimento substancial da capacidade instalada de energia renovável no mundo foi grandemente impulsionada pela introdução de políticas agressivas e incentivos em uma porção de países. A expansão de compromissos semelhantes a outros países aceleraria ainda mais os índices atuais de implementação e fomentaria investimento adicional em avanços continuados em tecnologia.

Além dos meios renováveis para a produção de eletricidade, como eólica, solar e hidrelétrica, os combustíveis à base de biomassa representam uma área importante de oportunidade para substituir os combustíveis convencionais para transporte à base de petróleo. O etanol de cana-de-açúcar já é uma opção atraente, desde que se apliquem salvaguardas ambientais razoáveis. Para aumentar ainda mais o potencial de biocombustíveis no mundo, são necessários esforços intensivos de pesquisa e desenvolvimento para oferecer uma nova geração de combustíveis com base na conversão eficiente de material lignocelulósico. Ao mesmo tempo, avanços na biologia molecular e de sistemas apresentam a grande promessa para a geração de matéria-prima avançada de biomassa e métodos muito menos energo-intensivos de converter material vegetal em combustível líquido como pela produção microbial direta de combustíveis como o butanol.

No futuro, biorrefinarias integradas podem permitir a coprodução eficiente de energia elétrica, combustíveis líquidos e outros coprodutos valiosos a partir de recursos de biomassa sustentavelmente gerenciados. Uma dependência bastante expandida de biocombustíveis exigirá mais reduções nos custos de produção; minimização do uso de terra, água e fertilizantes; e tratar dos impactos potenciais sobre a biodiversidade. As opções de biocombustíveis com base na conversão de lignocelulose em vez de amidos parecem mais promissoras em termos de minimizar a competição entre o cultivo de alimentos e a produção de energia e em termos de maximizar os benefícios ambientais associados a combustíveis de transporte à base de biomassa.

Igualmente importante será acelerar o desenvolvimento e a implementação de uma combinação de tecnologias de combustíveis de base fóssil menos carbono-intensivos. O gás natural, em particular, tem um papel crítico a desempenhar como *combustível ponte* na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis. Assegurar o acesso a ofertas adequadas deste recurso relativamente limpo e promover a difusão de tecnologias eficientes de gás em uma variedade de aplicações é, portanto, uma importante prioridade de políticas públicas de curto e de médio prazo.

Simultaneamente, grande urgência tem de ser dada ao desenvolvimento e à comercialização de tecnologias que permitam o uso continuado do carvão mineral – o recurso de combustível fóssil mais abundante no mundo – de forma que não apresente riscos ambientais intoleráveis. Apesar do aumento de certeza científica e da crescente preocupação com as mudanças climáticas, a construção de usinas convencionais de longa vida útil, movidas a carvão mineral, continuou e até se acelerou em anos recentes. A expansão substancial da capacidade do carvão que ora acontece em todo o mundo pode apresentar o maior desafio aos esforços futuros para estabilizar os níveis de dióxido de carbono na atmosfera. Gerenciar o “rastros” do gás estufa deste título de capital existente enquanto se faz a transição para tecnologias avançadas de conversão que incorporem a captura e armazenagem de carbono representa assim um desafio tecnológico e econômico fundamental.

A tecnologia nuclear pode continuar a contribuir para futuras ofertas de energia de baixo teor de carbono, desde que preocupações significativas em termos de proliferação de armas, disposição de resíduos, custo e segurança pública (inclusive a vulnerabilidade a atos de terrorismo) possam ser – e são – tratadas.

### O papel do governo e a contribuição da ciência e da tecnologia

Uma vez que os mercados não irão produzir os resultados desejados a menos que os incentivos certos e sinalizações de preços estejam presentes, os governos têm um papel vital a desempenhar na criação das condições necessárias para promover resultados ótimos e no apoio a investimentos de longo prazo em nova infraestrutura energética, pesquisa e desenvolvimento em energia e tecnologias de alto risco/alto retorno. Onde existe vontade política para criar as condições para a transição para energias sustentáveis, existe uma grande variedade de instrumentos de políticas, desde incentivos de mercado, tais como preço ou limite máximo de emissões de carbono (que podem ser especialmente efetivos para influenciar decisões de investimento de capital de longo prazo), até padrões de eficiência e normas para construções, que podem ser mais eficientes do que uma sinalização de preços para efetuar a mudança pelo lado do uso final da equação. Oportunidades para importantes políticas de longo prazo também existem no nível da cidade e do planejamento do uso do solo, incluindo sistemas de ponta de fornecimento de energia, água e outros serviços, bem como avançados sistemas de mobilidade.

A ciência e a tecnologia (C&T) claramente têm um papel fundamental a desempenhar para maximizar o potencial e reduzir o custo das opções de energia existentes, ao mesmo tempo em que desenvolvem novas tecnologias que irão expandir a lista de opções futuras. Para fazer valer esta promessa, a comunidade de C&T deve ter acesso aos recursos necessários para levar adiante áreas já promissoras e explorar possibilidades mais distantes. O investimento atual em pesquisa e desenvolvimento em energia no mundo é amplamente considerado inadequado para os desafios diante de nós.

Da mesma forma, é necessário um aumento substancial – da ordem de pelo menos o dobro das verbas atuais – em recursos públicos e priva-

dos destinados a enfrentar as prioridades críticas da tecnologia de energia. Cortar subsídios das indústrias de energia estabelecidas poderia fornecer parte dos recursos necessários, e ao mesmo tempo reduzir incentivos para consumo excessivo e outras distorções que permanecem nos mercados comuns de energia em muitas partes do mundo. Também é necessário assegurar que os gastos públicos no futuro sejam direcionados e aplicados mais eficientemente, tanto para abordar prioridades e metas bem definidas para pesquisa e desenvolvimento em tecnologias fundamentais de energia e para buscar os avanços necessários nas ciências básicas. Ao mesmo tempo, será importante ampliar a colaboração, a cooperação e a coordenação entre instituições e limites nacionais no esforço para implementar tecnologias avançadas.

### Caso para ação imediata

Evidências científicas impressionantes mostram que as tendências atuais de energia são insustentáveis. Consideráveis necessidades ecológicas, de saúde humana, desenvolvimento e segurança energética exigem ações imediatas para efetuar a mudança. São necessárias mudanças agressivas de políticas para acelerar a implementação de tecnologias mais avançadas. Com uma combinação de tais políticas em nível local, nacional e internacional, deve ser possível – técnica e economicamente – elevar as condições de vida de grande parte da humanidade, ao mesmo tempo que se enfrentam os riscos apresentados pelas mudanças climáticas e por outras formas de degradação ambiental relacionadas à energia e reduzir as tensões geopolíticas e as vulnerabilidades econômicas geradas pelos padrões existentes de dependência predominante de recursos de combustíveis fósseis.

O Painel de Estudos chegou a nove conclusões principais, acompanhadas de recomendações para ações. Estas conclusões e recomendações foram formuladas dentro de uma abordagem holística para a transição rumo a um futuro de energia sustentável. Isso implica que nenhuma delas isoladamente pode ser seguida com sucesso sem a devida atenção às outras. A priorização das recomendações é, assim, intrinsecamente difícil. Entretanto, o Painel de Estudos acredita que, dado o prospecto assustador

da mudança climática, as seguintes três recomendações devem ser postas em prática **sem demora e simultaneamente**:

- Esforços combinados devem ser ampliados para melhorar a eficiência energética e reduzir a intensidade de carbono na economia mundial, incluindo a introdução mundial de sinalização de preços para emissões de carbono, considerando os diferentes sistemas energéticos e econômicos de diferentes países.
- Tecnologias devem ser desenvolvidas e implementadas para sequestrar o carbono de combustíveis fósseis, principalmente do carvão.
- O desenvolvimento e implementação de tecnologias devem ser acelerados de forma ambientalmente responsável.
- Levando-se em consideração as três recomendações urgentes acima, outra recomendação se destaca por si mesma como um imperativo moral e social e deve ser buscada com todos os meios disponíveis:
- Deve-se fornecer serviços de energia básicos modernos às pessoas mais pobres deste planeta.
- Atingir um futuro de energia sustentável exige a participação de todos. Porém, há uma divisão de trabalhos para implementar as várias recomendações deste relatório. O Painel de Estudos identificou os seguintes “atores” principais que devem assumir a responsabilidade para se atingir os resultados:
- Organizações multinacionais (exemplo, Nações Unidas, Banco Mundial, bancos regionais de desenvolvimento)
- Governos (nacionais, regionais e locais)
- Comunidade de Ciência e Tecnologia (C&T - academia)
- Setor privado (empresas, indústrias, fundações)
- Organizações não governamentais (ONGs)
- Mídia
- Público em geral

### *Conclusões, recomendações, ações*

Com base nos pontos-chave deste relatório, o Painel de Estudos oferece as seguintes conclusões com recomendações e respectivas ações para os principais atores.

**CONCLUSÃO 1. Atender as necessidades básicas de energia das pessoas mais pobres deste planeta é um imperativo moral e social que pode e deve ser buscado em concordância com os objetivos de sustentabilidade.**

Atualmente, estima-se que 2,4 bilhões de pessoas usem carvão mineral, carvão vegetal, lenha, resíduos agrícolas ou esterco como combustível primário de cozinha. Aproximadamente 1,6 bilhão de pessoas em todo o mundo vive sem eletricidade. Grandes quantidades de pessoas, especialmente mulheres e meninas, são privadas de oportunidades econômicas e educacionais, sem acesso a aparelhos básicos de custo razoável e que economizem trabalho, nem a iluminação adequada, somadas ao tempo gasto a cada dia para coletar combustível e água. A poluição interna causada pelos combustíveis tradicionais de cozinha expõe milhões de famílias a consideráveis riscos à saúde. Proporcionar formas modernas de energia aos pobres do mundo poderia gerar benefícios múltiplos, facilitando a luta diária para assegurar meios básicos de sobrevivência; reduzir riscos substanciais à saúde relacionados à poluição; liberar capital e recursos humanos escassos; facilitar a entrega de serviços essenciais, inclusive assistência médica básica; e mitigar a degradação ambiental local. Recebendo cada vez mais atenção internacional, esses elos foram um dos focos principais da Cúpula Mundial para o Desenvolvimento Sustentável de 2002 em Joanesburgo, que reconheceu a importância de acesso ampliado a serviços de energia de preço acessível como pré-requisitos para se atingir as Metas para o Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas.

### RECOMENDAÇÕES

- Dar prioridade a proporcionar um acesso bem maior dos pobres do mundo a combustíveis limpos, de preço acessível, de alta qualidade e à eletricidade. O desafio de expandir o acesso a formas modernas de energia gira primariamente em torno de questões de equidade social e distribuição – o problema fundamental não é de recursos globais inadequados, de danos ambientais inaceitáveis ou de falta de tecnologias disponíveis. Tratar das necessidades básicas de energia dos pobres do mundo claramente é fundamental para a meta maior

de desenvolvimento sustentável e tem de ser uma prioridade maior para a comunidade internacional se algum passo tem de ser dado para reduzir as desigualdades atuais.

- Formular políticas de energia em todos os níveis, da escala global à do vilarejo, com maior consciência das desigualdades substanciais no acesso a serviços de energia existentes atualmente, não apenas entre países, mas também entre populações dentro de um mesmo país e mesmo entre domicílios dentro de uma mesma cidade ou vilarejo. Em muitos países em desenvolvimento, uma pequena elite usa energia quase da mesma forma que no mundo desenvolvido, enquanto a maioria do restante da população depende das formas tradicionais de energia, normalmente de baixa qualidade e altamente poluentes. Em outros países em desenvolvimento, o consumo de energia por uma classe média crescente está contribuindo significativamente para o crescimento da demanda global por energia e aumentado substancialmente os índices nacionais de consumo per capita, apesar da pouca mudança nos padrões de consumo dos muito pobres. A realidade que bilhões de pessoas sofrem com o acesso limitado à eletricidade e a combustíveis limpos para cozinhar não deve ser desconsiderada nas estatísticas *per capita*.

### AÇÕES NECESSÁRIAS

- Dadas as dimensões internacionais do problema, organizações multinacionais como as Nações Unidas e o Banco Mundial devem tomar a iniciativa de elaborar um plano para eliminar a pobreza energética dos pobres do mundo. Como primeiro passo, os governos e as ONGs podem auxiliar fornecendo dados sobre a extensão do problema em seus países.
- O setor privado e a comunidade de C&T podem ajudar a promover a transferência de tecnologias apropriadas. O setor privado pode ajudar, ainda, fazendo os investimentos adequados.
- A mídia deve conscientizar o público em geral sobre a enormidade do problema.

## **CONCLUSÃO 2. Esforços conjuntos têm de ser feitos para melhorar a eficiência energética e reduzir a intensidade de carbono da economia mundial.**

Competitividade econômica, segurança energética e considerações ambientais, todas argumentam a favor de se buscar oportunidades custo-efetivas e de eficiência de uso-final. Essas oportunidades podem ser encontradas na indústria, transportes e ambiente construído. Para maximizar os ganhos em eficiência e minimizar custos, os avanços devem ser incorporados de forma holística e desde o princípio onde for possível, especialmente onde infraestrutura de longo prazo esteja envolvida. Ao mesmo tempo, será importante evitar que se subestime a dificuldade de se obter ganhos nominais de eficiência energética, como frequentemente acontece quando as análises supõem que o uso reduzido de energia é um fim em si, em vez de um objetivo regularmente negociado com outros atributos desejáveis.

### RECOMENDAÇÕES

- Promover uma maior disseminação dos avanços em tecnologia e inovação entre países industrializados e em desenvolvimento. Será especialmente importante para todas as nações trabalharem juntas para assegurar que países em desenvolvimento adotem tecnologias mais limpas e mais eficientes à medida que se industrializam.
- Alinhar os incentivos econômicos – especialmente para investimentos duráveis de capital – com objetivos de sustentabilidade de longo prazo e considerações de custo. Incentivos para provedores de serviços de energia regulamentada devem ser estruturados para incentivar investimento em melhorias de eficiência custo-efetivas e os lucros devem ser desvinculados das vendas de energia.
- Adotar políticas que visem a acelerar a taxa mundial de redução de intensidade de carbono da economia global, onde a intensidade de carbono é medida como o dióxido de carbono emitido na atmosfera dividido pelo produto interno bruto, uma medida bruta de bem-estar global. Especificamente, o Painel de Estudos recomenda uma ação de política imediata para introduzir uma sinalização de preço



significativa para emissões evitadas de gás de efeito estufa. Menos importante do que os preços iniciais é que expectativas claras sejam estabelecidas quanto à escalada previsível desses preços ao longo do tempo. Meramente manter as emissões de dióxido de carbono constantes nas próximas décadas implica que a intensidade de carbono da economia mundial deva cair grosseiramente, na mesma medida em que o produto mundial bruto cresça – atingindo as *reduções* absolutas nas emissões globais necessárias para estabilizar as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. Isto exigirá que o índice mundial de redução da intensidade de carbono comece a superar o do crescimento econômico mundial.

- Listar as cidades como as principais forças motrizes para a rápida implementação de passos práticos para melhorar a eficiência energética.
- Informar os consumidores sobre as características de uso energia de produtos através de etiquetagem e implementar padrões mínimos de eficiência obrigatórios para eletrodomésticos e equipamentos. Padrões devem ser regularmente atualizados e têm de ser efetivamente cumpridos.

### AÇÕES NECESSÁRIAS

- Governos, em diálogo com o setor privado e com a comunidade de C&T, devem desenvolver e implementar políticas e regulamentações (adicionais) que visem obter maior eficiência energética e menor intensidade energética para uma ampla variedade de processos, serviços e produtos.
- O público em geral deve ser conscientizado pelos governos, mídia e ONGs sobre a importância e necessidade de tais políticas e regulamentações.
- A comunidade de C&T deve aumentar seus esforços para pesquisar e desenvolver tecnologias novas e de baixo consumo de energia.
- Governos, unidos em organizações intergovernamentais, devem chegar a um consenso sobre sinalização de preços realistas para emissões de carbono – reconhecendo que os sistemas econômicos energéticos de diferentes países resultarão em diferentes estratégias e trajetórias

individuais – e fazer dessas sinalizações de preços componentes-chave para ações posteriores para redução de emissão de carbono.

- O setor privado e o público em geral devem insistir para que os governos determinem sinalizações de preços claras para o carbono.

**CONCLUSÃO 3. As tecnologias para captura e sequestro de carbono de combustíveis fósseis, particularmente do carvão mineral, podem desempenhar um papel importante no gerenciamento custo-efetivo das emissões globais de dióxido de carbono.**

Como a fonte mais abundante de combustível fóssil do mundo, o carvão continuará a desempenhar um grande papel no *mix* mundial de energia. Também é o combustível convencional mais carbono-intensivo em uso, gerando quase duas vezes mais dióxido de carbono por unidade de energia fornecida do que o gás natural. Atualmente, novas usinas elétricas a carvão – a maioria das quais têm uma vida útil esperada de mais de meio século – estão sendo construídas num índice sem precedentes. Além do mais, a contribuição de carbono do carvão pode aumentar ainda mais se as nações com grandes reservas de carvão mineral, como Estados Unidos, China e Índia, se voltarem para esse insumo para enfrentar problemas de segurança energética e desenvolver alternativas para o petróleo.

## RECOMENDAÇÕES

- Acelerar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias avançadas de carvão. Sem políticas de intervenção, a grande maioria das usinas elétricas a carvão mineral construídas nas próximas duas décadas será de usinas convencionais de carvão pulverizado. As tecnologias atuais para captura das emissões de dióxido de carbono de usinas a carvão pulverizado de base em modernização são caras e energo-intensivas. Onde for necessário construir novas plantas a carvão sem captura devem-se utilizar tecnologias mais eficientes. Além disso, prioridade deve ser dada a minimizar os custos de futuras modernizações nos equipamentos para captura de carbono, desenvolvendo pelo menos alguns elementos de tecnologia de captura de carbono a cada nova planta. Esforços ativos para desenvolver essas tecnologias

para diferentes tipos de plantas base já estão em andamento hoje e devem ser incentivados promovendo-se a construção de plantas completas que utilizem os mais recentes avanços tecnológicos.

- Envidar esforços renhidos para comercializar a captura e armazenagem de carbono. Avançar com projetos de demonstração em escala natural é fundamental, assim como estudos e experimentação continuados para reduzir custos, aumentar a confiabilidade e enfrentar problemas de vazamentos, segurança pública e outras questões. Para que a captura e sequestro sejam amplamente implementados, será necessário desenvolver regulamentações e introduzir sinalizações de preço para as emissões de carbono. Com base nas estimativas de custo atuais, o Painel de Estudos acredita que uma sinalização de preço da ordem de US\$ 100 a US\$ 150 por tonelada métrica de carbono equivalente evitada (US\$ 27 a US\$ 41 por tonelada de dióxido de carbono equivalente) será necessária para induzir a ampla adoção de captura e armazenagem de carbono. Sinalizações de preços nesse nível também impulsionariam a implementação acelerada da biomassa e de outras tecnologias de energia renovável.
- Explorar o potencial de tecnologias de modernização nos equipamentos para a captura de carbono pós-combustão adequada ao crescimento rápido e amplo da população de plantas de carvão pulverizado existentes. No curto prazo, melhorias de eficiência e tecnologias avançadas de controle da poluição devem ser aplicadas às plantas de carvão como forma de mitigar seus impactos imediatos sobre as mudanças climáticas e a saúde pública.
- Buscar a captura e armazenagem de carbono com sistemas que co-utilizem carvão e biomassa. Esta combinação de tecnologia oferece uma oportunidade de atingir emissões líquidas *negativas* de gás de efeito estufa – efetivamente removendo dióxido de carbono da atmosfera.

#### AÇÕES NECESSÁRIAS

- O setor privado e a comunidade de C&T devem unir forças para aprofundar as investigações sobre as possibilidades para captura e

sequestro de carbono e desenvolver tecnologias adequadas para demonstração.

- Os governos devem facilitar o desenvolvimento dessas tecnologias disponibilizando fundos e oportunidades (como locais de ensaios).
- O público em geral deve ser minuciosamente informado sobre as vantagens do sequestro de carbono e sobre o relativo controle dos riscos associados. A mídia pode auxiliar nesta tarefa.

**CONCLUSÃO 4. A competição por suprimentos de petróleo e gás natural pode se tornar uma fonte de crescentes tensões geopolíticas e vulnerabilidade econômica para muitas nações nas próximas décadas.**

Em muitos países em desenvolvimento, os gastos com importações de energia também retiram os poucos recursos de outras necessidades urgentes das áreas de saúde pública, educação e desenvolvimento de infraestrutura. O setor de transporte responde por apenas 25% do consumo de energia primária em todo o mundo, mas a falta de diversidade de combustíveis nesse setor torna os combustíveis de transportes especialmente valiosos.

**RECOMENDAÇÕES**

- Introduzir políticas e regulamentações que promovam consumo reduzido de energia no setor de transporte (a) melhorando a eficiência energética dos automóveis e de outros meios de transporte (b) melhorando a eficiência dos *sistemas* de transporte (exemplo, através de investimentos em transporte de massa, melhor uso do solo e planejamento urbano etc).
- Desenvolver alternativas para o petróleo para atender as necessidades de energia do setor de transporte, incluindo combustíveis de biomassa, híbridos *plug-in* e de gás natural comprimido, bem como – num prazo mais longo – alternativas avançadas tais como células de hidrogênio combustível.
- Implementar políticas para assegurar que o desenvolvimento de alternativas ao petróleo seja buscado de forma compatível com outros objetivos de sustentabilidade. Os métodos atuais para liquefazer

carvão e extrair petróleo de fontes não convencionais como areias betuminosas e óleo de xisto betuminoso geram níveis substancialmente mais altos de dióxido de carbono e outras emissões poluentes se comparados ao consumo de petróleo convencional. Mesmo com a captura e sequestro de carbono, um combustível líquido derivado do carvão no máximo produzirá emissões de dióxido de carbono grosseiramente equivalentes àsquelas do petróleo convencional no ponto de combustão. Se emissões de carbono do processo de conversão *não* forem capturadas e armazenadas, as emissões totais do ciclo de combustível para este caminho de energia podem até dobrar. A conversão do gás natural em líquido é menos carbono-intensiva do que carvão para líquido, mas a biomassa permanece a única matéria-prima de curto prazo que tem o potencial de ser de fato carbono-neutra e sustentável no longo prazo. Em todos os casos, os impactos do ciclo total de combustíveis dependem primordialmente da matéria-prima que é utilizada e dos métodos específicos de extração ou conversão que sejam empregados.

#### AÇÕES NECESSÁRIAS

- Os governos devem introduzir políticas e regulamentações (adicionais) visando à redução do consumo de energia e a desenvolver alternativas para o petróleo a serem usadas no setor de transportes.
- O setor privado e a comunidade de C&T devem continuar a desenvolver tecnologias adequadas para este fim.
- A consciência do público em geral deve ser consideravelmente aumentada em questões relacionadas ao uso de energias de transporte. A mídia pode desempenhar um papel importante nessa tarefa.

**CONCLUSÃO 5. Como um recurso de baixo consumo de carbono, a energia nuclear pode continuar a fazer uma contribuição importante para o portfólio de energia mundial no futuro, mas somente se problemas importantes relacionados a custo de capital, segurança e proliferação de armas forem tratados.**

Usinas de energia nuclear não geram emissões de dióxido de carbono

nem de poluentes convencionais durante a operação, usam matéria-prima combustível relativamente abundante e envolvem fluxos de massa de menores ordens de grandeza relativas a combustíveis fósseis. O potencial nuclear, no entanto, está atualmente limitado por receios relacionados a custo, gestão de resíduos, riscos de proliferação e segurança da usina (o que inclui receios quanto à vulnerabilidade a ataques terroristas e sobre o impacto do dano do nêutron sobre os materiais da usina em caso de extensões de vida útil). Um papel sustentado para a energia nuclear exigirá o tratamento dos seguintes problemas:

### RECOMENDAÇÕES

- Substituir a frota atual de reatores antigos por plantas que incorporem características avançadas de segurança intrínseca (passiva).
- Enfrentar o problema de custos buscando o desenvolvimento de projetos padronizados de reatores.
- Compreender o impacto do envelhecimento de longo prazo dos sistemas de reatores nucleares (exemplo, dano de nêutrons a materiais) e providenciar a desativação das plantas existentes de forma segura e econômica.
- Desenvolver soluções de gerenciamento de resíduos seguras e recuperáveis baseadas em armazenagem barris secos enquanto opções de descarte de mais longo prazo forem exploradas. Enquanto o descarte de longo prazo em repositórios geologicamente estáveis é tecnicamente viável, encontrar caminhos socialmente aceitáveis para implementar esta solução permanece um desafio considerável.
- Tratar do risco que materiais nucleares e conhecimentos civis sejam desviados para aplicações em armas (a) através da pesquisa continuada sobre a capacidade de enriquecimento de urânio e capacidade de reciclagem de combustíveis, além de reatores seguros de nêutrons rápidos que possam queimar os resíduos gerados nos reatores térmicos de nêutrons e (b) através de esforços para remediar problemas nos quadros internacionais existentes, além de mecanismos de governança.
- Conduzir um reexame transparente e objetivo das questões que envolvem a energia nuclear e suas potenciais soluções. Os resultados

desse reexame devem ser usados para educar o público e os elaboradores de políticas.

### AÇÕES NECESSÁRIAS

- Dada a controvérsia sobre o futuro da energia nuclear no mundo, as Nações Unidas devem se encarregar – o quanto antes – de um reexame transparente e objetivo das questões que envolvem energia nuclear e suas soluções potenciais. É essencial que o público em geral seja informado sobre os resultados desse reexame.
- O setor privado e a comunidade de C&T devem continuar os esforços de pesquisa e desenvolvimento que visem melhorar a segurança de reatores e desenvolver soluções de gerenciamento seguro de resíduos.
- Os governos devem facilitar a substituição do conjunto atual de reatores envelhecidos por plantas modernas e mais seguras. Os governos e as organizações intergovernamentais devem aumentar seus esforços para remediar problemas nos quadros internacionais e mecanismos de governança existentes.

### **CONCLUSÃO 6. A energia renovável, em suas muitas formas, oferece imensas oportunidades para progresso tecnológico e inovação.**

Nos próximos 30 a 60 anos, esforços sustentados devem ser dirigidos para realizar essas oportunidades como parte de uma estratégia abrangente para apoiar a diversidade de opções de recursos durante o próximo século. O desafio fundamental para a maioria das opções renováveis envolve selecionar, de forma custo-efetiva, recursos inerentemente difusos e, em alguns casos, intermitentes. É necessário apoio sustentado e de longo prazo – sob várias formas – para superar essas dificuldades. O desenvolvimento de energias renováveis pode fornecer importantes benefícios a países subdesenvolvidos e em desenvolvimento porque petróleo, gás e outros combustíveis são *commodities* em dinheiro vivo.

### RECOMENDAÇÕES

- Implementar políticas – inclusive aquelas que gerem uma sinalização de preço para emissões de carbono evitadas – para assegurar que os

benefícios econômicos dos recursos renováveis relativos a recursos não renováveis sejam sistematicamente reconhecidos no mercado.

- Fornecer subsídios e outras formas de apoio público para a implementação precoce de novas tecnologias renováveis. Subsídios devem ser dirigidos a tecnologias promissoras mas ainda não comerciais e reduzidos gradualmente ao longo do tempo.
- Explorar mecanismos de políticas alternativas para promover tecnologias de energias renováveis, tais como portfólio de padrões de energias renováveis (que estabeleça metas específicas para a implementação de energias renováveis) e “leilões reversos” (nos quais os criadores de energia renovável dão lances por uma parcela limitada de fundos públicos com base no subsídio *mínimo* de que necessitam sobre uma base de quilowatt-hora).
- Investir em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais transformacionais, como novas classes de células solares que possam ser feitas com processos contínuos de fabricação de filmes finos. (Ver também recomendações para biocombustíveis no item 7).
- Conduzir pesquisa sustentada para avaliar e mitigar quaisquer impactos ambientais negativos associados à implementação de larga escala de tecnologias de energias renováveis. Apesar de essas tecnologias oferecerem muitos benefícios ambientais, também podem apresentar novos riscos ambientais como resultado de sua baixa densidade energética e a necessidade de áreas de terra conseqüentemente grandes para sua implementação em grande escala.

### AÇÕES NECESSÁRIAS

- Os governos devem facilitar substancialmente – de forma ambientalmente sustentável – o uso de recursos renováveis de energia através de políticas e subsídios adequados. Um importante passo de política neste sentido incluiria sinalizações claras de preços para as emissões de gás de efeito estufa evitadas.
- Os governos também devem promover pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis fornecendo uma quantidade significativamente maior de recursos públicos.



- O setor privado, com o auxílio dos subsídios do governo, deve buscar oportunidades para empreender no crescente mercado de energias renováveis.
- A comunidade de C&T deve se empenhar mais para superar barreiras tecnológicas e de custo que atualmente limitam a contribuição de fontes de energia renovável.
- As ONGs podem ajudar a promover o uso de fontes de energia renovável em países em desenvolvimento.
- A mídia pode desempenhar um papel essencial aumentando a percepção do público em geral quanto a questões relativas a energias renováveis.

**CONCLUSÃO 7. Os biocombustíveis oferecem uma grande promessa de simultaneamente tratar de problemas de mudança climática e de segurança energética.**

Avanços na agricultura permitirão adequada produção de alimentos para atender um pico previsto da população mundial, da ordem de 9 bilhões de pessoas, com capacidade em excesso para cultivar safras para energia. Maximizar a contribuição potencial dos biocombustíveis exige métodos de comercialização para a produção de combustíveis de matérias-primas lignocelulósicas (incluindo resíduos e efluentes agrícolas), que têm o potencial de gerar de cinco a dez vezes mais combustível do que processos que utilizam amidos de matérias-primas, como a cana-de-açúcar e o milho. Recentes avanços na biologia molecular e de sistemas mostram-se muito promissores no desenvolvimento de matérias-primas avançadas e meios muito menos energo-intensivos para converter material vegetal em combustível líquido. Adicionalmente, a conversão intrinsecamente mais eficiente de luz solar, água e nutrientes em energia química pode ser possível com micróbios.

**RECOMENDAÇÕES**

- Realizar pesquisas intensivas sobre a produção de biocombustíveis com base na conversão de lignocelulósica.
- Investir em pesquisa e desenvolvimento sobre a produção direta de

butanol microbial ou de outras formas de biocombustíveis que possam ser superiores ao etanol.

- Implementar regulamentações rígidas para assegurar que o cultivo de matérias-primas para biocombustíveis esteja de acordo com práticas agrícolas sustentáveis e que promovam a biodiversidade, proteção ao *habitat* e outros objetivos de gerenciamento do solo.
- Desenvolver biorrefinarias avançadas que usem matérias-primas de biomassa para a autogeração de energia e extrair subprodutos de alto valor. Essas refinarias têm o potencial de maximizar ganhos econômicos e ambientais do uso de recursos de biomassa.
- Desenvolver matérias-primas avançadas de biocombustíveis através da seleção genética e/ou de engenharia molecular, incluindo plantas resistentes à seca e autofertilizantes que exijam o mínimo de terra cultivada e fertilizantes ou insumos químicos.
- Envidar esforços conjuntos para coletar e analisar dados sobre os usos atuais de biomassa por tipo e por tecnologia (tanto direto quanto pela conversão para outros combustíveis), incluindo os usos tradicionais da biomassa.
- Realizar pesquisa sustentada para avaliar e mitigar quaisquer impactos ambientais adversos ou ao ecossistema associados ao cultivo em larga escala de matérias-primas para energia de biomassa, incluindo os impactos relativos à competição com outros usos do solo (incluindo usos para preservação do *habitat* e para a produção de alimentos), necessidade de água etc.

### AÇÕES NECESSÁRIAS

- A comunidade de C&T e o setor privado devem aumentar significativamente seus esforços de pesquisa e desenvolvimento (e de implementação) para tecnologias mais eficientes, ambientalmente sustentáveis para a produção de biocombustíveis modernos.
- Os governos podem auxiliar aumentando o financiamento público de pesquisa e desenvolvimento e adaptando os subsídios existentes e políticas fiscais de modo a favorecer o uso de biocombustíveis sobre o de combustíveis fósseis, especialmente no setor de transporte.

- Os governos devem dar a necessária atenção à promoção de meios sustentáveis de produção de biocombustíveis e para evitar conflitos entre a produção de biocombustíveis e a produção de alimentos.

**CONCLUSÃO 8. O desenvolvimento de tecnologias de armazenagem de energia custo-efetivas, novos vetores energéticos e melhor infraestrutura de transmissão podem reduzir custos substancialmente e expandir a contribuição de uma variedade de opções de oferta de energia.**

Tais avanços em tecnologia e investimentos em infraestrutura são particularmente importantes para aproveitar o pleno potencial de recursos renováveis intermitentes, especialmente nos casos em que algumas das oportunidades de recursos mais abundantes e custo-efetivos existam longe dos centros de carga. Tecnologias avançadas de armazenagem, novos vetores energéticos e infraestrutura avançada de transmissão e de distribuição também facilitarão a prestação de modernos serviços de energia aos pobres do mundo – especialmente nas áreas rurais.

## RECOMENDAÇÕES

- Continuar pesquisa e desenvolvimento de longo prazo sobre o potencial de novos vetores energéticos para o futuro, como o hidrogênio. O hidrogênio pode ser queimado diretamente ou usado para energizar células combustíveis e tem uma variedade de aplicações potenciais, inclusive como fonte de energia para gerar eletricidade ou em outras aplicações estacionárias e como alternativa aos combustíveis de petróleo para aviação e transporte rodoviário. Limitações de custo e de infraestrutura, porém, podem atrasar uma ampla viabilidade econômica até meados do século ou mais tarde.
- Desenvolver tecnologias avançadas de armazenagem de energia seja esta física (exemplo, ar comprimido ou armazenagem elevada de água) ou química (exemplo, baterias, hidrogênio ou combustível de hidrocarboneto produzido a partir da redução de dióxido de carbono) que possam melhorar significativamente os prospectos do mercado de recursos de energia renovável intermitente como a eólica e a solar.

- Buscar avanços contínuos e reduções de custo em tecnologias para transmitir eletricidade em longas distâncias. Alta voltagem, linhas de transmissão de corrente direta, em particular, podem ser decisivas em tornar áreas remotas acessíveis para o desenvolvimento de energias renováveis, melhorando a confiabilidade da rede e maximizando a contribuição de uma variedade de fontes de eletricidade de baixo teor de carbono. Adicionalmente, será importante melhorar o gerenciamento geral da rede e seu desempenho através do desenvolvimento e aplicação de tecnologias avançadas ou de redes “inteligentes” que podem aumentar consideravelmente a resposta e a confiabilidade da transmissão de eletricidade e das redes de distribuição.

#### AÇÕES NECESSÁRIAS

- A comunidade de C&T, juntamente com o setor privado, deve concentrar a pesquisa e o desenvolvimento nesta área.
- Os governos podem auxiliar aumentando o financiamento público para pesquisa e desenvolvimento e facilitando investimentos na infraestrutura necessária.

**Conclusão 9. A comunidade de C&T – juntamente com o público em geral – tem um papel fundamental a desempenhar para oferecer soluções de energia e tem de estar efetivamente envolvida.**

Como repetidamente percebido nas recomendações anteriores, os desafios de energia deste século e dos futuros exigem progresso sustentado para o desenvolvimento, demonstração e implementação de tecnologias de energia novas e avançadas. Estes avanços terão de vir da comunidade de C&T, motivada e apoiada por políticas, incentivos adequados e pelas tendências de mercado.

#### RECOMENDAÇÕES

- Fornecer maiores financiamentos para investimentos públicos em pesquisa e desenvolvimento de energias sustentáveis, juntamente com incentivos e sinalizações de mercado para promover maiores investimentos do setor privado.

- Realizar maior coordenação de esforços de tecnologia internacionalmente, aliados a esforços para envolver universidades e instituições de pesquisa no desafio da sustentabilidade.
- Conduzir análise rigorosa e desenvolvimento de cenário para identificar possíveis combinações de recursos energéticos e de uso final e oferecer tecnologias que tenham potencial para simultaneamente enfrentar os múltiplos desafios da sustentabilidade ligados à energia.
- Estimular esforços para identificar e avaliar mudanças específicas em instituições, regulamentações, incentivos de mercado e políticas que mais efetivamente apresentem soluções de energia sustentável.
- Criar e aumentar o foco sobre conscientização, educação e treinamento especificamente relevante para energia, com treinamentos em todos os campos profissionais que tenham um papel a desempenhar na transição para energia sustentável.
- Iniciar esforços conjuntos para informar e educar o público sobre importantes aspectos do desafio das energias sustentáveis, como a conexão entre os padrões atuais de produção e do uso de energia e os riscos ambientais e de segurança fundamentais.
- Iniciar coleta de dados avançados para apoiar uma melhor tomada de decisão em áreas importantes de políticas que atualmente se caracterizam por falta de informação confiável (grandes cidades em muitos países em desenvolvimento, por exemplo, não contam com dados básicos necessários para planejar efetivamente as necessidades de transporte).

#### AÇÕES NECESSÁRIAS

- A comunidade de C&T deve lutar por uma melhor coordenação internacional de esforços de pesquisa e desenvolvimento em energia, parcialmente em colaboração com o setor privado. Deve buscar a articulação de uma agenda centrada e colaborativa visando enfrentar os principais obstáculos para um futuro de energia sustentável.
- Governos (e organizações intergovernamentais) devem disponibilizar mais financiamento público não apenas para reforçar a contribui-

ção existente da comunidade de C&T, mas também para atrair mais cientistas e engenheiros para trabalhar com os problemas de energia sustentável.

- O por quê e o como da pesquisa e desenvolvimento em energia devem se mostrar transparentes para o público em geral para gerar apoio para os investimentos importantes e sustentados que serão necessários para tratar das necessidades de sustentabilidade de longo prazo.
- A própria comunidade de C&T, organizações intergovernamentais, governos, ONGs, a mídia e – em menor grau – o setor privado, devem estar ativamente comprometidos em educar o público sobre a necessidade desses investimentos.

### Iluminando o caminho

Enquanto o cenário atual de energia é bastante sombrio, o Painel de Estudos acredita que há soluções sustentáveis para o problema de energia. Um apoio agressivo à ciência e tecnologia de energia tem de estar combinado a incentivos que acelerem o simultâneo desenvolvimento e a implementação de soluções inovadoras que possam transformar todo o cenário de oferta e demanda de energia. Oportunidades para substituir tecnologias superiores pelo lado da oferta e do uso final existem em todos os sistemas de energia do mundo, mas os fluxos de investimento atuais geralmente não refletem essas oportunidades.

A ciência e a engenharia oferecem princípios para orientar a agenda de sustentabilidade. A ciência fornece a base para um discurso racional sobre compensações e riscos, para selecionar prioridades de pesquisa e desenvolvimento e para identificar novas oportunidades – a abertura é um de seus valores dominantes. A engenharia, através da inexorável otimização das tecnologias mais promissoras, pode apresentar soluções – aprender fazendo está entre seus valores dominantes. Pode-se obter melhores resultados se muitos caminhos forem explorados paralelamente, se os resultados forem avaliados com medidas reais de desempenho, se os resulta-

dos forem ampla e detalhadamente relatados, e se as estratégias estiverem abertas para revisão e adaptação.

Pesquisa e desenvolvimento em energia de longo prazo é, portanto, um componente essencial na busca pela sustentabilidade. Pode-se obter progressos consideráveis com a tecnologia existente, mas a escala do desafio de longo prazo exigirá novas soluções. A comunidade de pesquisa tem de ter meios para buscar caminhos tecnológicos promissores que já estejam à vista e alguns que podem ainda estar além do horizonte.

A transição para sistemas de energia sustentável também exige que incentivos de mercado estejam alinhados aos objetivos de sustentabilidade. Particularmente, sinalizações robustas de preço para emissões de carbono evitadas são essenciais para incentivar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de energia de baixo teor de carbono. Tais sinalizações de preço podem ser introduzidas gradualmente, mas expectativas sobre como podem mudar ao longo do tempo devem ser estabelecidas de antemão e comunicadas de forma clara para que as empresas possam planejar com confiança e otimizar seus investimentos de capital de longo prazo.

Essenciais para todas as tarefas à frente são as habilidades de indivíduos e de instituições para efetuar mudanças nos recursos energéticos e seu uso. A formação de capacidade, tanto em termos de investimento em *expertise* individual quanto em efetividade institucional, tem de se tornar uma prioridade urgente de todos os atores principais: organizações multinacionais, governos, corporações, instituições educacionais, organizações sem fins lucrativos e mídia. Acima de tudo, o público em geral deve receber informações sólidas sobre as escolhas à frente e sobre as ações necessárias para obter um futuro de energia sustentável.

# 1

## O desafio da energia sustentável







**A** humanidade tem enfrentado problemas assustadores em todas as épocas, mas as gerações atuais enfrentam um conjunto de desafios que é único. Os sistemas ambientais dos quais depende a vida estão sendo ameaçados no plano local, regional e planetário pelas ações humanas. E, embora um grande número de pessoas esteja desfrutando de níveis nunca antes vistos de prosperidade material, um número ainda maior permanece atolado na pobreza crônica, sem acesso aos mais básicos serviços e confortos modernos, e com oportunidades mínimas para avanço social (educação, por exemplo) e econômico. Ao mesmo tempo, a instabilidade e conflitos em muitas partes do mundo criaram novos e profundos riscos à segurança.

A energia é fundamental para o desenvolvimento humano e está conectada de muitas formas a todos esses desafios. Em consequência, a transição para recursos e sistemas sustentáveis de energia cria a oportunidade de abordar múltiplas necessidades ambientais, econômicas e de desenvolvimento. Do ponto de vista ambiental, está cada vez mais claro que os atuais hábitos da humanidade em relação à energia devem mudar para reduzir riscos significativos de saúde pública, evitar pressões insuportáveis sobre sistemas naturais fundamentais e, em especial, gerenciar os riscos substanciais causados pelas mudanças climáticas globais. Ao estimular o desenvolvimento de alternativas aos combustíveis convencionais de hoje, uma transição para energia sustentável poderia também ajudar a enfrentar as preocupações com a segurança energética, que estão novamente no topo da agenda de políticas nacionais e internacionais de muitas nações, reduzindo, dessa forma, a probabilidade de que a disputa por reservas de gás e petróleo, finitas e distribuídas de forma desigual, alimente tensões geopolíticas crescentes nas próximas décadas. Por último, o amplo

acesso à eletricidade e a combustíveis limpos, de alta qualidade e preços acessíveis, poderia gerar muitos benefícios para as populações pobres do mundo, amenizando a luta diária para garantir os meios básicos de sobrevivência, aprimorando as oportunidades educacionais, diminuindo riscos substanciais à saúde relacionados com a poluição; liberando escassos recursos humanos e de capital; facilitando a provisão de serviços essenciais, inclusive assistência médica básica; e mitigando a degradação ambiental localizada.

O termo “energia sustentável” é usado ao longo deste relatório para denotar sistemas, tecnologias e recursos energéticos que sejam capazes de não apenas suprir, no longo prazo, as necessidades humanas – econômicas e de desenvolvimento – mas também o façam de forma compatível com (1) a preservação da integridade subjacente dos sistemas naturais essenciais, evitando, inclusive, mudanças climáticas catastróficas; (2) a extensão de serviços básicos de energia a mais de 2 bilhões de pessoas no mundo todo que atualmente não têm acesso a formas modernas de energia; e (3) a redução de riscos para a segurança e do potencial para conflitos geopolíticos que poderiam advir da disputa crescente por reservas de petróleo e gás natural distribuídas desigualmente. Em outras palavras, o termo “sustentável” neste contexto abrange uma gama de objetivos programáticos que vai além da mera adequação de suprimentos.

Em suma, a energia está no centro do desafio da sustentabilidade em todas as suas dimensões: social, econômica e ambiental. Cabe a esta geração a tarefa de mapear um novo caminho. Agora, e nas décadas à frente, nenhum objetivo político é mais urgente do que encontrar meios para produzir e usar energia que limite a degradação ambiental, preserve a integridade dos sistemas naturais subjacentes e apoie, em vez de desestabilizar, o progresso em direção a um mundo mais estável, pacífico, justo e humano. Em grande parte, já existem as ferramentas, as ideias e o conhecimento necessários para completar esta transição, mas muito mais será necessário. A questão decisiva é: *Será que nós, os seres humanos, somos capazes de, coletivamente, perceber a magnitude do problema e conclamar a liderança, a resistência e a vontade para fazer o que deve ser feito?*

## 1.1 O escopo do desafio

Elos entre o uso de energia e a qualidade do meio ambiente sempre foram visíveis, desde a derrubada de florestas para uso como lenha, mesmo nas sociedades mais antigas, até os altos níveis de poluição local da água e do ar que têm comumente acompanhado as primeiras fases da industrialização. Nas últimas décadas, os avanços do conhecimento científico e da capacidade de monitoramento e medição têm resultado em maior conscientização a respeito dos efeitos mais sutis sobre o ambiente e a saúde humana, associados à produção, conversão e uso da energia. Sabe-se, agora, que a queima de combustíveis fósseis é responsável por emissões substanciais de elementos poluidores do ar – inclusive enxofre, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e fuligem – que desempenham um papel fundamental na formação de material particulado fino, do ozônio no nível do solo e da chuva ácida; a utilização da energia também contribui fortemente para a liberação de metais persistentes, tais como chumbo e mercúrio, e outros materiais perigosos no meio ambiente. A poluição do ar relacionada com a energia (incluindo a má qualidade do ar em ambientes fechados, causada pelo uso de combustíveis sólidos para cozinhar e aquecer) não apenas cria riscos substanciais à saúde pública, especialmente onde os controles de emissão são limitados ou inexistentes, mas também danifica ecossistemas, degrada materiais e estruturas e prejudica a produtividade agrícola. Além disso, a extração, transporte e processamento de fontes de energia primária, como o carvão, o petróleo e o urânio, estão associados a uma série de danos ou riscos para o solo, a água e os ecossistemas, ao mesmo tempo que os resíduos gerados por alguns ciclos de combustível – notadamente a produção de eletricidade por energia nuclear – apresentam questões adicionais de descarte.

Embora os impactos ambientais mais óbvios da produção e uso de energia tenham sempre sido impactos locais significativos – incluindo o transporte de longa distância de certos elementos poluidores na atmosfera – sabe-se agora que eles ocorrem em escala regional, continental e mesmo transcontinental. No nível global, a mudança climática está surgindo como o elo mais difícil e de consequências mais sérias entre energia

e meio ambiente. A produção e o uso de energia contribuem, mais do que qualquer outra atividade humana, para a mudança em *força radiativa*<sup>1</sup> que está ocorrendo na atmosfera. Na verdade, a queima de combustíveis fósseis, sozinha, é responsável, atualmente, por mais da metade de todas as emissões de gases de efeito estufa no mundo todo (depois de ser responsável pelo potencial de aquecimento do dióxido de carbono equivalente de vários gases). Desde o início da era industrial, os níveis de dióxido de carbono na atmosfera aumentaram em aproximadamente 40%; persistindo, as tendências na produção, conversão e uso de energia – mais do que qualquer outro fator sob o controle humano – provavelmente determinarão com que rapidez e até que ponto esses níveis continuarão a aumentar. As implicações exatas da trajetória atual ainda são desconhecidas, mas há cada vez menos dúvidas de que os riscos são grandes e há cada vez mais provas de que o aquecimento global induzido pelo homem já está em curso. Em seu recente 4º Relatório de Avaliação, por exemplo, o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) concluiu que as provas do aquecimento do sistema climático global são “inequívocas” e identificou um certo número de potenciais impactos adversos associados com o aquecimento constante, incluindo maiores riscos para litorais, ecossistemas, reservas de água doce e saúde humana (IPCC, 2007a: p.5; e 2007b). Nesse contexto, fazer a transição para opções de energia com baixo teor de carbono é amplamente reconhecido como um imperativo central no esforço para reduzir riscos de mudança climática.

Outra questão que continuará a dominar os debates regionais, nacionais e internacionais sobre políticas de energia pelas próximas décadas é a segurança energética. Definida como acesso a suprimentos adequados de energia, quando necessário, na forma necessária e a preços acessíveis, a segurança energética é uma prioridade central para todas as nações preocupadas em promover um crescimento econômico saudável e em manter tanto a estabilidade interna como externa. A curto e a médio prazo, as preocupações com a segurança energética estarão, certamente, focadas no

---

1. Força radiativa é uma medida do efeito de aquecimento da atmosfera. Geralmente, é expressa em watts por metro quadrado.

petróleo e, em menor grau, no gás natural. À medida que a demanda por esses recursos cresce e as reservas de suprimentos relativamente baratos e facilmente acessíveis diminuem em muitas partes do mundo, o potencial para interrupções no fornecimento, conflitos comerciais e choques de preços provavelmente aumentará. Já há receios de que o ambiente atual de suprimentos escassos e preços altos e voláteis esteja exacerbando desequilíbrios nas negociações comerciais, tornando mais vagaroso o crescimento global, e direta ou indiretamente dificultando os esforços para promover a paz e a segurança internacionais. O problema é particularmente agudo para muitos países em desenvolvimento que dedicam uma grande parte de seus ganhos em moeda estrangeira para a importação de petróleo, reduzindo, dessa forma, os recursos disponíveis para os investimentos necessários para o crescimento econômico e o desenvolvimento social.

Fornecer os serviços de energia necessários para manter o crescimento econômico e, por outro lado, evitar uma situação em que a falta de acesso a esses serviços restrinja o crescimento e o desenvolvimento continua sendo um objetivo programático central para todas as nações, e é um desafio especialmente importante para os países em desenvolvimento, considerando-se os investimentos substanciais de recursos e capital que serão necessários. Dentro de um contexto mais amplo, um terceiro conjunto de questões (juntamente com as questões do meio ambiente e da segurança energética) diz respeito às ligações específicas entre acesso a serviços de energia, alívio da pobreza e desenvolvimento humano. Atualmente, esses elos têm atraído, cada vez mais, a atenção internacional e foram um foco importante da Conferência Mundial de Cúpula para o Desenvolvimento Sustentável em Joanesburgo, que reconheceu a importância do amplo acesso a serviços de energia confiáveis e com preços razoáveis como um pré-requisito para alcançar as Metas de Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas.<sup>2</sup> Es-

---

2. As Metas de Desenvolvimento do Milênio (MDM) pedem que a pobreza seja reduzida à metade nos países mais pobres até 2015. De acordo com um relatório das Nações Unidas (2005: p.8), o elo entre serviços de energia e a redução da pobreza foi explicitamente identificado pela Conferência de Cúpula para o Desenvolvimento Sustentável (CCDS) no Plano de Implementação de Joanesburgo (PIJ), o qual conclamava a comunidade internacional a “agir em conjunto e aumentar os esforços para trabalhar em todos os níveis visando melhorar o acesso a serviços de energia confiáveis e com preços razoáveis para um desenvolvimento sustentável que seja

### Quadro 1.1 Metas do milênio para energia e desenvolvimento

Os serviços de energia podem desempenhar uma gama de papéis diretos e indiretos para auxiliar a atingir as Metas de Desenvolvimento do Milênio:

**Reduzir a pobreza extrema pela metade.** O acesso aos serviços de energia facilita o desenvolvimento econômico – microempresas, atividades de subsistência que se estendem além das horas de luz do dia, negócios de proprietários locais, que criam empregos –, e contribui para diminuir a “desigualdade digital”.

**Reduzir a fome e melhorar o acesso à água potável de qualidade.** Os serviços de energia podem melhorar o acesso à água potável bombeada e fornecer combustível para cozinhar os 95% dos alimentos que são a base da alimentação que precisam ser cozidos antes de serem consumidos.

**Reduzir a mortalidade materna e infantil; e reduzir as doenças.** A energia é um componente-chave de um sistema de saúde funcional, contribuindo, por exemplo, para iluminar centros cirúrgicos, refrigerar vacinas e outros medicamentos, esterilizar equipamentos e fornecer transporte para clínicas de saúde.

**Garantir educação primária universal e promover igualdade de gêneros, com mais poder para as mulheres.** Os serviços de energia reduzem o tempo gasto por mulheres e crianças (especialmente as meninas) em atividades básicas de sobrevivência (juntar madeira para fazer fogo, buscar água, cozinhar etc.); a iluminação permite que se estude em casa, aumenta a segurança e torna possível o uso de recursos educacionais de mídia e de comunicação em escolas, incluindo as tecnologias de informação e de comunicação.

**Assegurar a sustentabilidade ambiental.** Mais eficiência em energia e o uso de alternativas mais limpas podem ajudar a atingir o uso sustentável de recursos naturais, bem como reduzir emissões, o que protege o meio ambiente local e global. O fornecimento dos serviços de energia necessários para sustentar o crescimento econômico e, inversamente, evitar uma situação na qual a falta de acesso a tais serviços restringe o crescimento e o desenvolvimento permanece sendo um objetivo programático central para todas as nações, um desafio particularmente importante para as nações em desenvolvimento, considerando-se os investimentos substanciais de recursos e capital que serão necessários.

tes elos são discutidos detalhadamente em outros relatórios (notadamente nas Avaliações sobre a Energia no Mundo, de 2000 e 2004, realizadas pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, pelo Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas e pelo Conselho Mundial para a Energia) e resumidos no Quadro 1.1 (DFID, 2002).

Resumindo, desigualdades substanciais no acesso a serviços de energia persistem atualmente, não apenas entre países, mas também entre populações de um mesmo país e até entre as casas de uma mesma cidade ou vilarejo. Em muitos países em desenvolvimento, uma pequena elite faz uso da energia praticamente da mesma forma que o mundo industrializado, enquanto a maior parte da população depende das mais tradicionais formas de energia, geralmente de má qualidade e altamente poluidoras. Estima-se que hoje, aproximadamente, 2,4 bilhões de pessoas usem carvão vegetal, lenha, resíduos de agricultura ou esterco como seu principal combustível para cozinhar, enquanto 1,6 bilhão de pessoas no mundo todo vive sem eletricidade.<sup>3</sup> Sem acesso a aparelhos básicos de preços acessíveis que poupem trabalho, ou iluminação adequada, obrigado a passar horas, todos os dias, coletando combustível e água, um grande número de pessoas, especialmente mulheres e crianças, são privadas de oportunidades econômicas e educacionais; além disso, milhões estão expostas a riscos substanciais à saúde, por causa da poluição em ambientes fechados causada pelos combustíveis tradicionais usados para cozinhar. O desafio de ampliar o acesso a serviços de energia está centrado, primeiramente, nas questões de justiça social e distribuição – o problema fundamental não são os recursos mundiais inadequados ou a falta de tecnologias disponíveis. Tratar das necessidades básicas de energia dos pobres do mundo é, claramente, uma questão central dentro das metas mais amplas do desen-

---

suficiente para alcançar as MDM, incluindo de reduzir à metade o número de pessoas que vivem na pobreza até 2015 e, como meio de gerar outros serviços importantes que mitigam a pobreza, tendo em mente que o acesso à energia facilita a erradicação da pobreza”.

3. Dados sobre o número de pessoas sem acesso aos modernos serviços de energia são, na melhor das hipóteses, aproximações e variam conforme a fonte consultada. Assim, provavelmente é mais apropriado salientar o fato de que os dados disponíveis indicam uma fração significativa da população do mundo, em vez de destacar os dados numéricos específicos citados por diferentes fontes.



volvimento sustentável e deve estar no topo das prioridades dos países em desenvolvimento nos próximos anos, para se obter algum progresso na redução das injustiças atuais.

## 1.2 A escala do desafio

A escala do desafio da energia sustentável é ilustrada por uma revisão rápida dos padrões atuais de consumo e dos elos históricos entre uso de energia, população e crescimento econômico. O desenvolvimento humano, até o final do século XVIII, foi marcado por taxas apenas modestas de crescimento populacional, renda *per capita* e uso de energia. Conforme a Revolução Industrial ganhava ritmo, isso começou a mudar. Nos últimos cem anos somente, a população mundial cresceu 3,8 vezes, passando de 1,6 bilhão para 6,1 bilhões; a renda *per capita* mundial aumentou nove vezes (para aproximadamente US\$ 8 000 por pessoa em 2000)<sup>4</sup>; o uso anual de energia primária teve um aumento similar (dez vezes), para 430 exajoules (EJ); e o uso de energia fóssil sozinho aumentou 20 vezes.<sup>5</sup>

Ao longo deste período, o uso de energia em muitos países seguiu um padrão comum. Conforme as sociedades começavam a se modernizar e mudavam das formas tradicionais de energia (tais como madeira, resíduos de colheitas e esterco) para formas comerciais de energia (combustíveis líquidos ou gasosos e eletricidade), seu consumo de energia *per capita* e por unidade de produto econômico (Produto Interno Bruto) geralmente crescia rapidamente. Num estágio mais adiantado de desenvolvimento, no entanto, o crescimento do consumo de energia tipicamente diminuía, à medida que o mercado para dispositivos que usam energia alcançava um ponto de saturação e as economias mais ricas trocavam a indústria

---

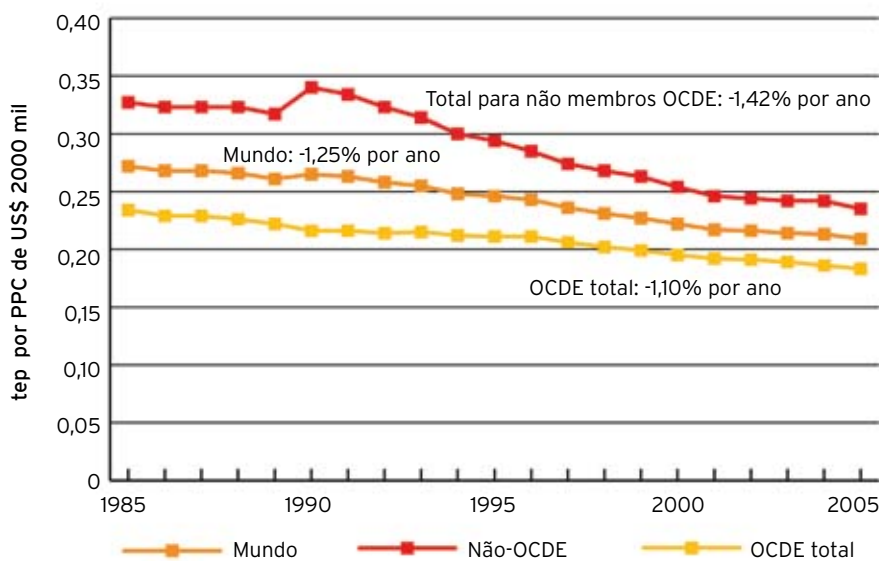
4. Em 2000, o produto mundial bruto com base na paridade de poder de compra era de US\$ 49 trilhões (população de 6,1 bilhões).

5. As estimativas para 1900 variam de 37 a 50 EJ; uma estimativa de 40 EJ é usada aqui; e as estimativas para 2000 variam de 400 a 440 EJ e uma estimativa de 430 é usada aqui [1 EJ equivale a 109 gigajoules (GJ); 1 GJ equivale a 0,17 barris de petróleo, o que equivale a 0,027 milhão de metros cúbicos (mmc) de gás, que equivale a 0,04 tonelada métrica de carvão, que equivale a 0,28 megawatt-hora.]

mais energo-intensiva por um papel maior no setor de serviços, com uso menos intensivo de energia. A taxa de crescimento do consumo de energia também diminuiu em alguns países industrializados, em consequência dos programas combinados de eficiência energética e conservação que foram lançados na esteira dos aumentos significativos dos preços do petróleo no início dos anos 1970. A figura 1.1 mostra as tendências de queda na intensidade de uso de energia para países-membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e não membros da OCDE nos últimos 18 anos.

Nos últimos anos, a intensidade do uso de energia nas economias industrializadas do mundo tem diminuído à razão de 1,1% por ano, enquanto a intensidade do uso de energia das economias de fora do OCDE tem diminuído, em média, muito mais rapidamente (presumivelmente por-

**Figura 1.1** Intensidade do uso de energia *versus* tempo, 1985-2005



Obs.: TPES é a sigla em inglês para Suprimento Total de Energia Primária; PIB é a sigla para Produto Interno Bruto; PPC é a sigla para Paridade de Poder de Compra; tep é a sigla para tonelada equivalente em petróleo.

Fonte: IEA, 2005.

que essas economias partem de uma base de maior intensidade e menor eficiência). A taxa de diminuição de intensidade não tem sido, em geral, suficiente para contrabalançar o crescimento do PIB, e o consumo total de energia tem continuado a aumentar nos países industrializados e tem crescido ainda mais rapidamente em muitos países em desenvolvimento.

Olhando à frente, as projeções atuais sugerem que a população do mundo vai aumentar em 50% ao longo da primeira metade deste século (para atingir aproximadamente 9 bilhões até 2050), a renda mundial vai, *grossa modo*, quadruplicar<sup>6</sup> e o consumo de energia irá dobrar ou triplicar, dependendo do ritmo das futuras reduções na intensidade do uso da energia. Mas, notoriamente, projeções não são muito confiáveis: padrões de desenvolvimento, mudanças econômicas estruturais, crescimento populacional e escolhas de estilo de vida vão ter um profundo impacto nas tendências futuras. Conforme discutido mais adiante neste relatório, mesmo pequenas mudanças no crescimento médio ano a ano ou na taxa de redução da intensidade de uso podem produzir resultados muito diferentes em uso de energia e emissões no decurso de várias décadas. Simplesmente elevar a taxa histórica de diminuição de intensidade de uso de energia de 1% por ano para 2% na média em escala mundial, por exemplo, diminuiria a demanda por energia em 2030 em 26% em relação ao “negócios como de costume” usado como base. Numerosas análises de engenharia sugerem que reduções de intensidade de uso dessa magnitude poderiam ser alcançadas através de investimentos conjuntos em eficiência energética ao longo dos próximos 50 anos, mas até mesmo mudanças aparentemente modestas nas taxas médias anuais de avanço podem ser difíceis de manter na prática, especialmente por períodos mais longos, e podem requerer um comprometimento programático significativo.

Confrontada com a quase certeza do crescimento contínuo da demanda total de energia, mesmo com os esforços conjuntos para aumentar ainda mais a eficiência, reduzir a intensidade do uso de energia e promover uma distribuição mais justa de recursos, a escala do desafio se torna

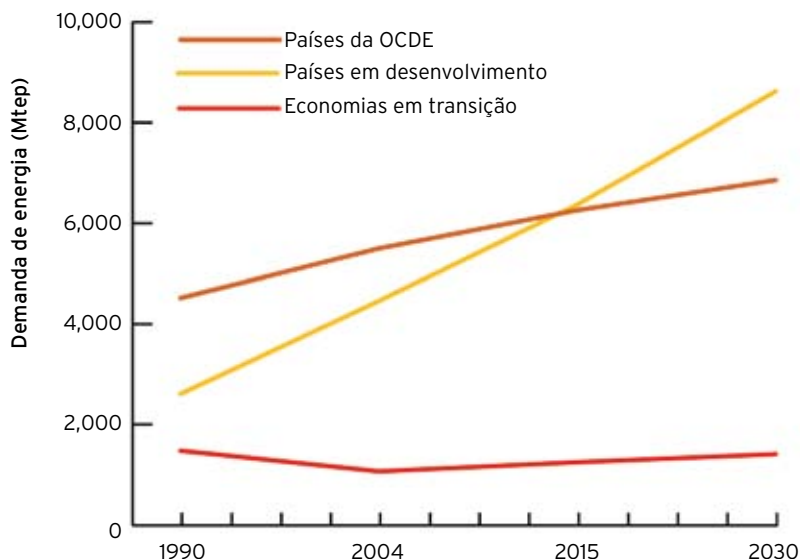
---

6. Até atingir um produto bruto mundial com base em paridade de poder de compra de US\$ 196 trilhões (USDOE, 2006).

mais assustadora ainda quando é levado em conta o *mix* atual de recursos usados para satisfazer as necessidades de energia da humanidade. A Figura 1.2 mostra o consumo total de energia primária para países da OCDE, países em desenvolvimento e economias em transição (a última categoria inclui, principalmente, países do Leste Europeu e a antiga União Soviética), enquanto as Figuras 1.3 e 1.4 mostram o consumo global de energia primária e a produção global de eletricidade, divididas conforme a fonte de combustível.

Combustíveis fósseis não renováveis e emissores de carbono (carvão, petróleo e gás natural) representam, aproximadamente, 80% do consumo de energia primária do mundo (Figura 1.3). A biomassa tradicional representa a segunda maior parcela (10%), enquanto a energia nuclear, hidrelétrica e outros recursos renováveis (incluindo a biomassa moderna,

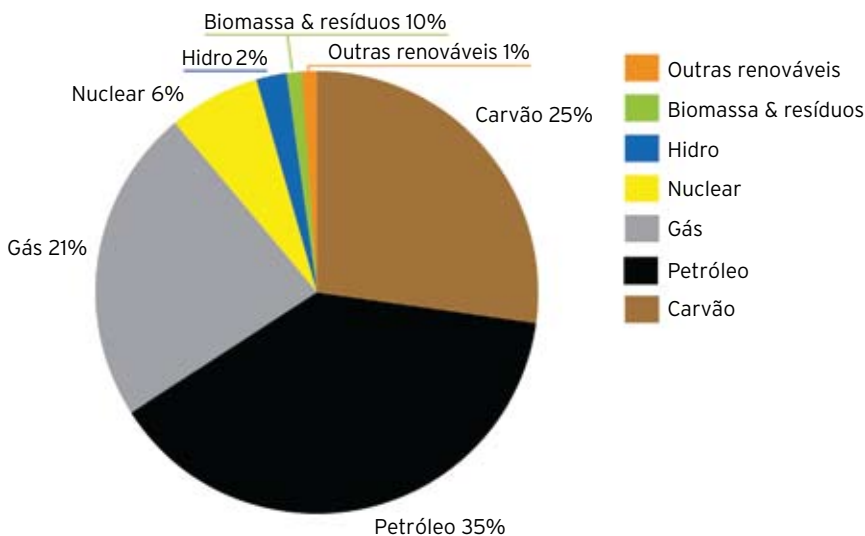
**Figura 1.2** Participações regionais na demanda por energia primária, incluindo as projeções de “negócios como de costume”



Obs.: um megaton de petróleo equivalente (Mtep) é igual a 41,9 petajoules.

Fonte: IEA, 2006.

**Figura 1.3 Consumo de energia primária por combustível, 2004**



Obs.: O consumo total de energia primária no mundo em 2004 foi de 11.204 megatons de petróleo equivalente (ou 448 exajoules).

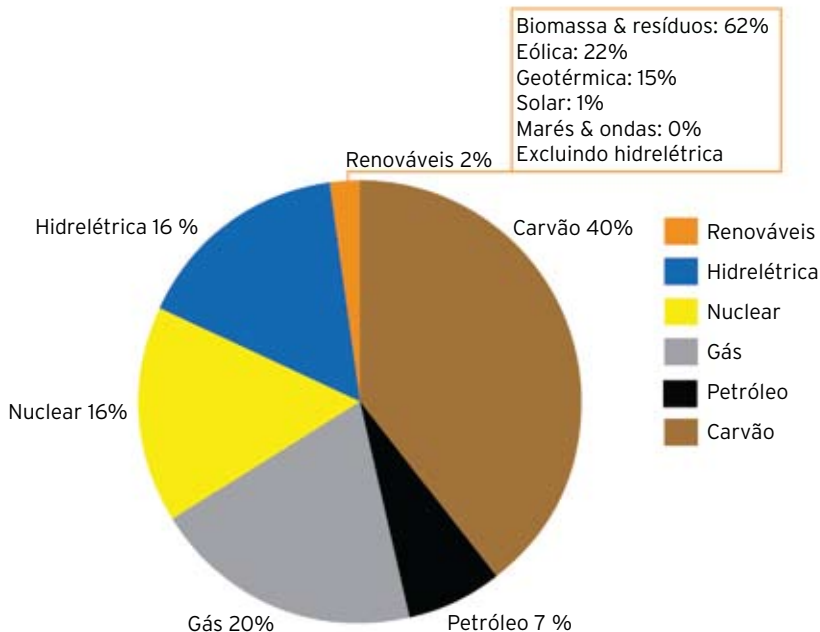
Fonte: IEA, 2006.

a energia eólica e a solar), respectivamente, respondem por 6%, 2% e 1% do total. A Figura 1.4 mostra o *mix* de combustíveis usados para gerar energia no mundo todo. Mais uma vez, os combustíveis fósseis – principalmente carvão e gás natural – dominam o *mix* de recursos, respondendo por 2/3 da produção global de eletricidade. As contribuições da energia nuclear e hidrelétrica correspondem, aproximadamente, a 16% do total,<sup>7</sup> enquanto os renováveis não hidro representam aproximadamente 2% da produção global.

Muitas projeções indicam que os combustíveis fósseis continuarão a

7. Note-se que a Figura 1.3 mostra a contribuição da energia nuclear para o fornecimento de energia primária como sendo aproximadamente três vezes maior que a contribuição da energia hidrelétrica, embora, como observado no texto e na Figura 1.4, a produção de eletricidade dessas duas fontes ao redor do mundo seja praticamente igual. Isso se dá porque a energia térmica gerada numa usina nuclear está incluída como energia primária na Figura 1.3 (uma convenção de cálculo, que pode ser justificada porque essa energia térmica poderia, em princípio, ser usada).

Figura 1.4 Produção mundial de eletricidade por fonte de energia, 2004



Obs.: A produção total de energia em 2004 foi de 17.408 terawatts-hora (ou 63 exajoules)

Fonte: IEA, 2006.

dominar o *mix* energético por muitas décadas, com a demanda total por esses combustíveis e as emissões de carbono correspondentes aumentando na mesma proporção.<sup>8</sup> A Tabela 1.1 mostra uma projeção de caso de referência para a demanda futura de energia, desenvolvida pela Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês) baseada, amplamente, na premissa de “negócios como de costume”. Deve-se enfatizar que essas projeções não incorporam restrições visando à sustentabilidade (tais como medidas de mitigação que podem ser necessárias para gerenciar riscos climáticos) – como estão, não se pretende que elas retratem um futuro

8. Normalmente, o suprimento de combustível fóssil dobraria até 2050, respondendo por mais de 60% do fornecimento de energia primária [as estimativas da IEA para 2030 são de 82%].

**Tabela 1.1 Demanda global de energia primária por combustível**

Milhões de toneladas de petróleo equivalente (Mtep)	Taxa de crescimento médio anual					
	1980	2004	2010	2015	2030	2004-2030
Carvão	1785	2 773	3 354	3 666	4 441	1,8%
Petróleo	3 107	3 940	4 366	4 750	5 575	1,3%
Gás	1 237	2 302	2 686	3 107	3 869	2,0%
Nuclear	186	714	775	810	861	0,7%
Hidrelétrica	148	242	280	317	408	2,0%
Biomassa e resíduos	765	1 176	1 283	1 375	1 645	1,3%
Outros renováveis	33	57	99	136	296	1,6%
Total	7 261	11 204	12 842	14 071	17 095	1,6%

Obs.: Um milhão de toneladas de petróleo equivalente é igual a 41,9 petajoules.

Fonte: IEA 2006.

inevitável, muito menos um futuro *desejável*. Pelo contrário, a utilidade dessas projeções reside em sua capacidade de lançar luz sobre as consequências de se permitir que as tendências atuais persistam. Por exemplo, as projeções da IEA para casos de referência presumem que haverá um crescimento modesto no uso de tecnologias de energia renovável. Mas já que as renováveis não hidro representavam apenas 2% da produção mundial de energia em 2004, o consumo de combustíveis fósseis e as emissões globais de carbono continuarão a crescer consideravelmente até 2030. Na verdade, as previsões atuais sugerem que a manutenção das tendências de “negócios como de costume” produzirá um aumento aproximado de 55% nas emissões de dióxido de carbono ao longo das próximas duas décadas.

As implicações dessas projeções, do ponto de vista do clima somente,

são graves. Se as tendências projetadas pela IEA para o próximo quarto de século continuarem além de 2030, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera poderia atingir 540-970 partes por milhão até 2100 – algo entre duas a três vezes a concentração pré-industrial de 280 partes por milhão. Em contraste, é cada vez mais evidente que a mitigação consciente dos riscos de mudança climática vai exigir reduções significativas nas emissões globais dos gases de efeito estufa até a metade do século. Como parte de seu 4º Relatório de Avaliação, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) identificou numerosos impactos adversos nos suprimentos de água, ecossistemas, agricultura, litorais e saúde pública que estariam previstos (com um grau de confiabilidade alto ou muito alto) e acompanhariam o aquecimento contínuo. Além disso, a avaliação atual do IPCC situa o início de vários desses “impactos-chave” numa mudança de temperatura média de 2 a 3 graus Celsius (IPCC, 2007a: p. 13). O IPCC calcula, ainda, que limitar o aquecimento global a um aumento de 2 a 3 graus Celsius vai exigir a estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa em algum ponto na faixa de 450 a 550 partes por milhão, em termos de dióxido de carbono equivalente. Com base nos numerosos cenários desenvolvidos pelo IPCC, atingir a estabilidade dentro dessa faixa exigiria reduções absolutas de emissões globais de 30% a 85%, em comparação com os níveis de 2000, até a metade do século (IPCC 2007b: p. 23-5). Portanto, uma grande meta deste relatório é fazer recomendações para mudar a trajetória atual de energia no mundo através da utilização acelerada de tecnologias mais eficientes e de fontes sustentáveis de energia com baixo teor de carbono.

Contudo, as consequências das tendências atuais também são perturbadoras do ponto de vista da segurança energética, considerando-se as perspectivas a longo prazo para os suprimentos de petróleo convencionais e o gasto de energia e os impactos ambientais envolvidos, para países que estão lutando para suprir as necessidades básicas de desenvolvimento social e econômico. Previsões recentes sugerem que uma continuação das tendências de “negócios como de costume” produzirão um aumento de quase 40% no consumo mundial de petróleo até 2030, numa época em que muitos especialistas preveem que a produção de petróleo conven-



cional facilmente acessível e relativamente barato estará, rapidamente, se aproximando (ou talvez já tenha atingido) seu ponto máximo. Além disso, os casos de referência das projeções da IEA, embora prevejam um aumento substancial no consumo de energia dos países em desenvolvimento, presumem apenas um progresso modesto nas próximas décadas, no sentido de reduzir as grandes injustiças energéticas que são características em diferentes partes do mundo. Isso não surpreende, já que as projeções da IEA se baseiam em extrapolações das tendências passadas para o futuro; como tais, elas não levam em conta a possibilidade de que países em desenvolvimento possam seguir uma trajetória diferente dos países industrializados.

### 1.3 A necessidade de abordagens holísticas

Além do escopo e da escala das questões envolvidas, o desafio de mudar para sistemas sustentáveis de energia se torna mais complicado por causa de vários fatores adicionais. Em primeiro lugar está o fato de que diferentes objetivos programáticos podem causar tensão (ou até mesmo estar em oposição), especialmente se abordados isoladamente. Por exemplo, esforços para melhorar a segurança energética – se levarem a uma expansão maciça do uso do carvão sem a contrapartida do sequestro de carbono – poderiam exacerbar significativamente os riscos climáticos. De forma similar, imitar os padrões históricos de industrialização nos países em desenvolvimento poderia, num contexto do século XXI, criar riscos ambientais e de segurança energética consideráveis. Alcançar a sustentabilidade certamente exige uma abordagem holística, na qual as necessidades de desenvolvimento, injustiças sociais, limites ambientais e segurança energética sejam levados em conta – mesmo que as questões não possam sempre ser resolvidas ao mesmo tempo. As prioridades devem ser determinadas por região e por país.

A extensão dos serviços básicos de energia para bilhões de pessoas que, por enquanto, não têm acesso a eletricidade e combustíveis limpos para cozinhar, por exemplo, poderia ser efetivada de tal forma que teria

um impacto mínimo nos níveis atuais de consumo de petróleo e emissões de dióxido de carbono (Quadro 1.2). Na verdade, um exame mais cuidadoso da relação entre consumo de energia e bem-estar humano sugere que uma distribuição mais justa do acesso aos serviços de energia é inteiramente compatível com um progresso acelerado no atendimento das questões de segurança energética e riscos de mudanças climáticas. A figura 1.6 compara o consumo *per capita* de eletricidade nos diferentes países em termos de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) – uma medida composta de bem-estar que leva em conta a expectativa de vida, escolaridade e PIB.<sup>9</sup> A figura mostra que, enquanto um certo nível mínimo de serviços de eletricidade é exigido para apoiar o desenvolvimento humano, um consumo mais alto acima desses limites não está necessariamente ligado a um IDH mais alto. Posto de outra forma, a figura indica que um IDH relativamente alto (0,8 ou mais) tem sido alcançado em países em que os níveis do consumo *per capita* de eletricidade mostram uma variação de até seis vezes.

Na realidade, os cidadãos dos Estados Unidos consomem energia atualmente à razão de aproximadamente 14 000 quilowatts-hora por pessoa por ano, enquanto europeus usufruem de um padrão de vida similar usando, em média, apenas 7 000 quilowatts-hora por pessoa por ano.<sup>10</sup> Melhorias na eficiência energética representam uma oportunidade óbvia para alavancar metas programáticas múltiplas, mas há outras – mais notadamente, claro, a mudança no *mix* do fornecimento de energia. Tomando um exemplo extremo: se os recursos usados para suprir as necessidades de energia fossem caracterizados por emissões nulas ou quase nulas de gases do efeito estufa, seria possível enfrentar os riscos de mudança climática sem nenhuma redução de consumo em si. Na realidade, alguma combinação de redução de demanda e mudanças no *mix* de fornecimento será,

---

9. O IDH é calculado atribuindo-se o peso de um terço para a expectativa de vida no nascimento, um terço para escolaridade, (adultos alfabetizados e número de matrículas em escolas) e um terço para a renda *per capita* no PIB (ajustada conforme a paridade de poder de compra). É importante observar que um gráfico que simplesmente compare o PIB *per capita* com o consumo de energia (ou de eletricidade) mostraria uma relação muito mais linear (UNDP, 2006).

10. O consumo *per capita* de eletricidade em alguns países europeus, como a Suécia e a Noruega, é mais alto do que nos Estados Unidos.

com certeza, necessária para enfrentar os desafios de energia do próximo século. Enquanto isso, implementar as tecnologias de energia renováveis e outras formas avançadas e descentralizadas pode melhorar a qualidade do meio ambiente, reduzir emissões de gases de efeito estufa, estimular o desenvolvimento econômico local, diminuir desembolsos para a importação de combustíveis e tornar mais viável levar os serviços de energia para domicílios mais pobres, especialmente em áreas rurais remotas.

#### **Quadro 1.2 Focalizando o ato de cozinhar no mundo em desenvolvimento**

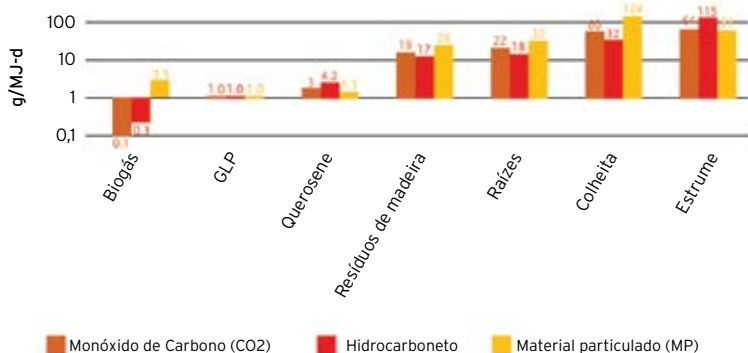
Fogões eficientes e limpos representam uma grande oportunidade para levar energia e benefícios de saúde pública a bilhões de pessoas que dependem dos combustíveis tradicionais para cozinhar em seus domicílios.

**A escada de energia em domicílios.** Mais de 2,4 bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento ainda dependem de combustíveis sólidos de biomassa para cozinhar. Esse número sobe para 3 bilhões quando o uso de vários tipos de carvão para cozinhar é incluído. Na verdade, o uso de combustíveis sólidos de biomassa para cozinhar é responsável por 30% a 90% do consumo primário de energia em alguns países em desenvolvimento. À medida que a renda sobe, as pessoas geralmente progredem dos combustíveis mais sujos (esterco, resíduos de colheitas, madeira, carvão vegetal e carvão) para combustíveis líquidos (querosene), gasosos (gás liquefeito de petróleo, gás natural e biogás), até finalmente, às vezes, a eletricidade. Inversamente, quando os preços dos combustíveis líquidos ou gasosos à base de petróleo aumentam, as pessoas tendem a retroceder outra vez para combustíveis sólidos - pelo menos para certas tarefas. Conforme os domicílios sobem a escada da energia, os combustíveis e os fogões que são usados tendem a se tornar mais limpos, mais eficientes e mais fáceis de controlar - mas também mais caros. Como a queima de um combustível sólido é, muitas vezes, ineficiente e pouco controlável, o custo de cada refeição preparada não é, geralmente, uma função simples do custo da tecnologia do combustível ou do fogão.

**Impactos na saúde e no meio ambiente.** O uso de combustíveis tradicionais para cozinhar, frequentemente em condições de má ventilação, é uma questão significativa de saúde pública em muitos países em desenvolvimento (Figura 1.5). Globalmente, calcula-se que exposição à fumaça proveniente da queima de combustíveis nos domicílios seja responsável por 1,6 milhão de mortes por ano, um número quase tão alto quanto da malária. Crianças pequenas são afetadas de forma desproporcional:

aproximadamente 1 milhão dessas mortes, geralmente por infecções respiratórias agudas. As mulheres são o segundo grupo mais afetado: quase a totalidade das demais mortes, principalmente por doenças obstrutivas pulmonares crônicas (WHO, 2002). Além de gerar altos níveis de poluição do ar, a extensa dependência dos combustíveis sólidos tradicionais - especialmente a lenha - pode levar a práticas de colheita insustentáveis, que, por sua vez, contribuem para o desmatamento e geram outros impactos adversos nos ecossistemas locais. Além disso, pesquisas mais recentes indicam que os combustíveis de biomassa usados para cozinhar, mesmo quando são colhidos de forma sustentável (como os resíduos de colheita e esterco animal), podem produzir mais emissões de gases do efeito estufa do que alternativas à base de petróleo, quando são levadas em conta as emissões de poluentes da queima incompleta que não o dióxido de carbono (Smith e outros, 2005).

**Figura 1.5 A escada da energia: emissão relativa de poluentes por refeição**



Obs.: Poluentes danosos para a saúde por unidade de energia produzida: proporção de emissões para gás liquefeito de petróleo (GLP). No gráfico da figura 1.5, os valores são mostrados em gramas por megajoule (g/MJ-d) levados até a panela.

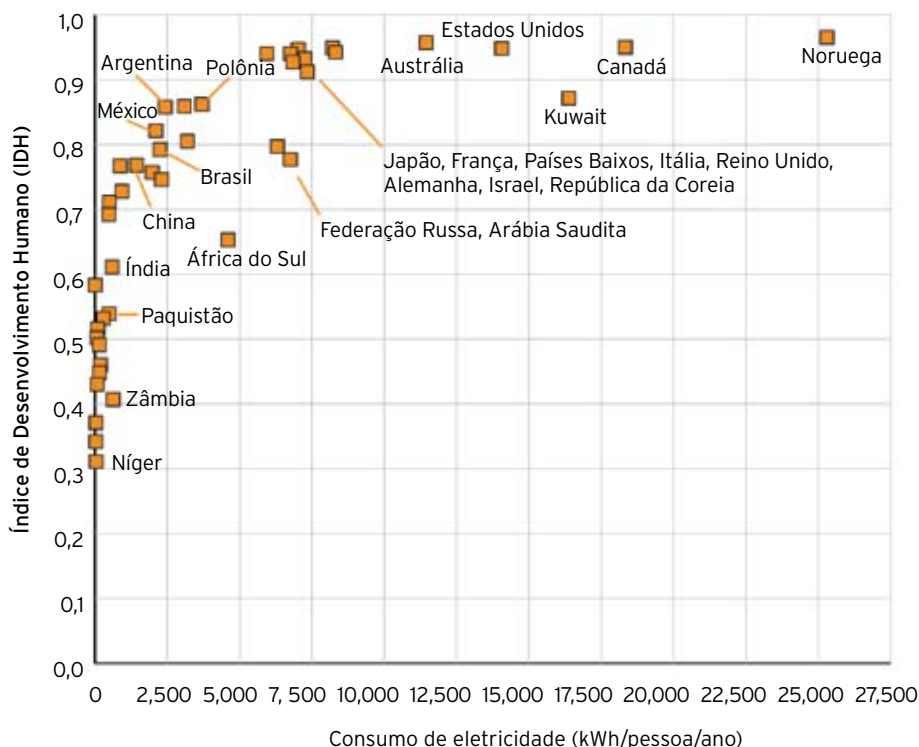
Fonte: Smith e outros, 2005.

**Preservando energia e preservando vidas.** Várias estratégias têm sido experimentadas ao redor do mundo para reduzir os impactos adversos do uso de combustíveis sólidos para cozinhar. Tipicamente, elas combinam esforços simultâneos para atender a três áreas de oportunidade: redução da exposição, redução de emissões e o uso de combustíveis mais limpos. As opções para reduzir a exposição incluem melhorar a ventilação, fogões com coifa ou chaminés, mudanças de comportamento. As opções para reduzir as emissões incluem a melhora da eficiência da queima, da transferência de calor, ou, preferivelmente, ambas. Uma melhora nos padrões

de combustível pode incluir a mudança para briquetes ou carvão vegetal (que cria seus próprios problemas) e biogás. Muitos países têm subsidiado mudanças para querosene e gás liquefeito de petróleo, no esforço de ajudar os domicílios mais pobres a darem um salto na escada de energia. Smith (2002) mostrou que mesmo que 1 bilhão de pessoas mudassem de combustíveis sólidos de biomassa para cozinhar para o gás liquefeito de petróleo, isso aumentaria as emissões globais de dióxido de carbono de combustíveis fósseis em menos de 1%. As emissões de gases de efeito estufa numa base equivalente poderiam até diminuir. Subsidiar combustíveis mais limpos, porém, tem várias desvantagens importantes: é caro (os gastos com subsídios para gás liquefeito de petróleo na Índia excedem todos os gastos com educação); é ineficiente (subsídios governamentais frequentemente acabam beneficiando domicílios que não precisam deles); e podem, na verdade, aumentar os gastos das famílias com energia, já que combustíveis subsidiados acabam sendo desviados para outros usos (por exemplo, querosene e gás liquefeito de petróleo são muitas vezes desviados para uso em meios de transporte). Alguns países, especialmente a China, implementaram programas bem-sucedidos para substituir fogões tradicionais por modelos mais limpos. Em outros lugares, como a Índia, tais programas tiveram resultados mistos.

Outros fatores tornam mais complicado o desafio da energia sustentável e enfatizam a necessidade de abordagens programáticas holísticas. Um alto grau de inércia caracteriza não apenas o sistema climático da atmosfera terrestre mas também grande parte da infraestrutura de energia que comanda os padrões de uso de energia, bem como as instituições sociais e políticas que moldam as condições regulatórias e de mercado. Como o tempo de permanência do dióxido de carbono e de outros gases do efeito estufa na atmosfera é de décadas a séculos, as concentrações atmosféricas de gases do efeito estufa não podem ser reduzidas rapidamente, mesmo com cortes drásticos das emissões. Da mesma forma, o movimento por trás das tendências atuais de consumo de energia e de emissões é tremendo: o automóvel médio dura mais de dez anos; usinas de energia e edifícios podem durar 50 anos ou mais; e as estradas e ferrovias mais importantes podem durar séculos. O crescimento que ocorreu recentemente na capacidade mundial de energia eólica e solar é animador, mas há muito poucos exemplos de novas formas de energia penetrando no mercado a taxas de

**Figura 1.6** Relação entre índice de desenvolvimento humano (IDH) e consumo de eletricidade *per capita*, 2003-2004



Obs.: O IDH médio mundial é 0,741. O consumo médio anual de eletricidade *per capita* no mundo, de 2 490 kWh por pessoa por ano, pode ser traduzido como aproximadamente 9 gigajoules (GJ)/pessoa/ano [10 000 quilowatts(kWh)= 36GJ]

Fonte: UNDP, 2006.

crescimento indefinidamente sustentadas de mais de 20% ao ano. Mudanças fundamentais nos sistemas mundiais de energia vão levar tempo, especialmente quando se leva em conta que novos riscos e obstáculos quase sempre surgem com o crescimento da distribuição de novas tecnologias, mesmo que esses riscos e obstáculos estejam pouco presentes quando as tecnologias acabam de ser introduzidas. Em consequência, o processo de transição tende a ser iterativo e moldado pelos desdobramentos futuros e avanços científicos que não podem ser previstos, ainda.

Exatamente porque é improvável que haja soluções “milagrosas” para os problemas de energia do mundo, será necessário enxergar além dos recursos primários de energia e processos de produção, visando aos sistemas mais amplos em que estão inseridos. Melhorar a sustentabilidade total desses sistemas requer não apenas sinais adequados por parte do mercado – incluindo preços que reflitam os impactos das mudanças climáticas e outras externalidades associadas ao uso de energia –, mas pode também exigir níveis mais altos de investimentos relacionados à energia assim como novas instituições. Muitas das estimativas atuais do setor de investimentos em energia só englobam a energia fornecida, mas investimentos em equipamentos e sistemas que usam energia – incluindo investimentos em edifícios, carros ou aviões, caldeiras ou aparelhos de ar-condicionado – poderão ser tanto ou mais importantes.<sup>11</sup> Muito provavelmente, a maior parte dos investimentos necessários pode ser captada em processos normais de realocação de capital. Com uma renda anual calculada para 2005 de US\$ 60 trilhões (com base na paridade de poder de compra) e uma taxa média de investimento de capital próxima a US\$ 1 trilhão por mês, deve haver escopo substancial para acelerar a implementação de tecnologias avançadas.

#### 1.4 Pontos principais

Os múltiplos elos entre energia, meio ambiente, desenvolvimento social e econômico e segurança nacional tornam mais complexa a tarefa de alcançar resultados sustentáveis, por um lado, e criar sinergias potencialmente promissoras, por outro.

- **A abrangência e a escala do desafio da energia sustentável exigem soluções sistêmicas inovadoras, bem como novos investimentos em infraestrutura e tecnologia.** Grande parte do investimento em infraestrutura terá de ser feito, de qualquer forma, mas na maioria

---

11. Por exemplo, as estimativas da IEA para os investimentos acumulados da indústria de energia para 2004 a 2030 chegam a US\$ 17 trilhões.

dos lugares o mercado e o ambiente regulatório não estão, atualmente, fornecendo a retroalimentação necessária para se obter uma mudança substancial nos padrões de “negócios como de costume”. E, por várias medidas, o investimento mundial atual em pesquisa básica de energia e desenvolvimento não é adequado à tarefa em questão.<sup>12</sup>

- **A mudança não acontecerá da noite para o dia.** Os elementos essenciais da infraestrutura de energia têm uma expectativa de vida da ordem de uma a várias décadas. Isso significa que o cenário da energia em 2025 talvez não seja muito diferente do cenário atual da energia. Entretanto, será necessário, na próxima década, iniciar uma transição tal que até 2020 novas políticas estejam operando, hábitos de consumo estejam mudando e novas tecnologias conquistem uma parcela substancial do mercado.
- **O problema do acesso desigual a serviços modernos de energia é, fundamentalmente, um problema de distribuição, não de recursos inadequados ou de limites ambientais.** É possível satisfazer as necessidades de 2 bilhões de pessoas ou mais que atualmente não têm acesso a formas modernas de energia (isto é, eletricidade ou combustíveis limpos para cozinhar), enquanto os parâmetros da tarefa para o restante das pessoas são minimamente alterados. Por exemplo, calcula-se que garantir que todos os domicílios tivessem acesso a gás liquefeito de petróleo para cozinhar custaria apenas US\$ 50 bilhões. Além disso, o impacto nas emissões globais de dióxido de carbono resultantes do uso de combustíveis fósseis seria da ordem de 1% ou 2% (IEA, 2004:2006). Reduzir as injustiças atuais é um imperativo moral e social e pode ser atingido de forma a permitir que outros objetivos também possam avançar.

---

12. O investimento público em pesquisa e desenvolvimento (P&D) de energia em 2005 em países OCDE e em países não OCDE foi calculado em US\$ 9 bilhões, ou apenas 3,2% do total de gastos com P&D. Historicamente, os investimentos privados em P&D, como porcentagem de gastos com energia, também têm sido baixos em comparação a outros setores da tecnologia.



- **Uma correção significativa de rumo não será consumada no tempo necessário para evitar riscos consideráveis para a segurança energética e para o meio ambiente se os países em desenvolvimento seguirem a trajetória energética dos países industrializados.** Os países ricos, que já consumiram mais do que sua cota dos recursos mundiais e da capacidade de absorção dos sistemas naturais do planeta, têm capacidade e obrigação de auxiliar os países em desenvolvimento no salto para tecnologias mais limpas e mais eficientes.
- **Para ser bem-sucedida, a busca por sistemas sustentáveis de energia não pode se limitar a encontrar alternativas ao petróleo para o setor de transportes e meios de gerar energia com baixas emissões de carbono – deve também incluir um conjunto de medidas responsáveis e soluções correspondentes pelo lado da demanda.** Essas soluções devem abordar oportunidades em nível municipal (com foco especial para o uso de água e energia), novos modelos de energia industrial (incorporando a moderna compreensão da ecologia industrial) e sistemas avançados de mobilidade. Além disso, será necessário focar oportunidades no ponto de uso final (carros, aparelhos, edifícios etc.) para implementar a maior variedade possível de opções disponíveis para economizar energia. A maioria das instituições que delineiam a política de energia atualmente privilegia o lado do fornecimento. As necessidades do século XXI exigem instituições mais fortes pelo lado da demanda, com uma cobertura mais ampla do país, do que, por exemplo, aquela que é oferecida pela IEA, com seus membros altamente industrializados.
- **Dada a complexidade da tarefa em questão e a existência de inúmeros fatores desconhecidos, são valorizadas as abordagens iterativas que permitam experimentação, testando novas tecnologias em pequena escala e desenvolvendo novas opções.** A ciência e a engenharia têm um papel vital a desempenhar nesse processo e são ferramentas indispensáveis para achar soluções humanas, seguras, economicamente viáveis e responsáveis em relação ao meio ambien-

te. Ao mesmo tempo, os desafios energéticos atuais proporcionam uma oportunidade única para motivar e treinar uma nova geração de cientistas e engenheiros.

- **A experiência do século XX demonstrou a força dos mercados para criar economias prósperas.** As forças de mercado sozinhas, no entanto, não criarão soluções para os problemas de recursos compartilhados que se encaixam no paradigma da “tragédia do bem comum” (os exemplos atuais incluem a pesca internacional, poluição da água e do ar e as emissões que provocam o aquecimento global).<sup>13</sup> Os governos têm um papel vital a desempenhar na definição de incentivos, sinalização de preços, regulamentação e outras condições que permitirão ao mercado proporcionar bons resultados. O apoio do governo é essencial onde o mercado, de outra forma, não faria investimentos que atendessem aos interesses de longo prazo da sociedade; os exemplos incluem certos tipos de infraestrutura, pesquisa básica e desenvolvimento e tecnologias de alta compensação.

### Referências bibliográficas\*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: mitigation.** Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Four-

---

13. A “tragédia do bem comum” diz respeito a uma situação em que o acesso livre a recursos finitos inevitavelmente leva à super exploração do recurso, porque os indivíduos se beneficiam da exploração, enquanto os custos da exploração excessiva são difusos e suportados por um grupo muito maior. Quando aplicado ao problema da mudança climática, o recurso finito é a capacidade da atmosfera terrestre. Enquanto não houver restrições à emissão de gases do efeito estufa e enquanto os custos individuais para os emissores individuais não refletirem o dano público causado por suas ações, as emissões totais vão ser superiores ao que seria desejável, na perspectiva do bem comum.

th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: R. K. Pachauri; A. Reisinger (eds.)]. Geneva: IPCC, 2007a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy balances of non-OECD countries 2002-2003**. Paris: OECD, 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2006**. Paris: OECD, 2006. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/2006.asp>>.

SMITH, K.R. In praise of petroleum. **Science** v.19, n.5, p. 589-600, 2002.

SMITH, K.R.; ROGERS, J.; COWLIN, S.C. **Household fuels and ill health in developing countries: what improvements can be brought by LP Gas?** Paris: World LP Gas Association and Intermediate Technology Development Group, 2005.

UNITED KINGDOM. Department for International Development. **Energy for the poor: underpinning the Millennium Development Goals**. London, 2002.

UNITED NATIONS. **Energy services for the Millennium Development Goals**. New York: United Nations, 2005. Disponível em: <[http://www.unmillennium-project.org/documents/MP\\_Energy\\_Low\\_Res.pdf](http://www.unmillennium-project.org/documents/MP_Energy_Low_Res.pdf)>.

UNITED NATIONS. **Human development report 2006: beyond scarcity: power, poverty, and the global water crisis**. New York: United Nations Development Program, 2006. Disponível em: <<http://hdr.undp.org/hdr2006/>>.

UNITED NATIONS. **World energy assessment: energy and the challenge of sustainability**. [J. Goldemberg, (ed.)]. New York: United Nations Development Program, 2000. Disponível em: <<http://www.energyandenvironment.undp.org/undp/index.cfm?module=Library&page=Document&DocumentID=5037>>.

UNITED NATIONS. **World energy assessment: overview, 2004 update**. [J. Goldemberg; T.B. Johansson (eds.)]. New York: United Nations Development Program, 2004. Disponível em: <<http://www.energyandenvironment.undp.org/undp/index.cfm?module=Library&page=Document&DocumentID=5027>>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **International energy outlook 2006**. Washington, D.C., 2006. [DOE/EIA-0484(2007)]. Disponível em: <[http://www.fypower.org/pdf/EIA\\_IntlEnergyOutlook\(2006\).pdf](http://www.fypower.org/pdf/EIA_IntlEnergyOutlook(2006).pdf)>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The world health report: reducing risks, promoting healthy life**. Geneva: World Health Organization, 2002. Disponível em: <[http://www.who.int/whr/2002/en/whr02\\_en.pdf](http://www.who.int/whr/2002/en/whr02_en.pdf)>.

\* As Referências bibliográficas nesta edição foram adequadas às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

# 2

## Demanda energética e eficiência





Os desafios da sustentabilidade apresentados no Capítulo 1 são enormes e exigirão grandes mudanças, não apenas no modo como a energia é fornecida, mas também como é utilizada. Avanços em eficiência que reduzem a quantidade de energia necessária para fornecer um dado produto ou um dado serviço podem desempenhar um papel fundamental na redução das externalidades negativas associadas aos modos atuais de produção de energia. Ao moderar o crescimento futuro de demanda, avanços em eficiência também podem “comprar tempo” para desenvolver e comercializar novas soluções de fornecimento de energia; na verdade, o aumento de eficiência pode ser essencial para tornar viáveis essas soluções. Os problemas de infraestrutura e limitação de recursos que inevitavelmente surgem quando se dimensionam novos sistemas energéticos tornam-se muito mais fáceis de gerenciar se forem minimizadas as perdas de energia em toda a cadeia de fornecimento, desde a produção até o ponto de uso final.

O argumento para avanços em eficiência de uso final torna-se especialmente atraente quando tais avanços podem (a) ser implementados de forma custo-efetiva, uma vez que o investimento em melhoria de eficiência gera retornos (em economias futuras no custo da energia) semelhantes ou melhores do que investimentos conflitantes e (b) resultar no mesmo nível e qualidade de qualquer serviço que esteja sendo prestado, seja este de mobilidade, iluminação, ou um ambiente interno confortável. Nesses casos, fomentar a eficiência energética é (por definição) menos caro do que buscar suprimentos adicionais de energia; além disso, pode ser ainda mais vantajoso do ponto de vista social, ao se levarem em conta impactos ambientais e de recursos não internalizados associados à maioria das alternativas de fornecimento. Estudos mais antigos, muitos deles com base

em análises de engenharia do potencial tecnológico “de baixo para cima”, concluíram que oportunidades custo-efetivas para melhorar a eficiência de uso final são substanciais e permeiam um grande número de itens que utilizam energia – de edifícios a veículos e aparelhos – que já são muito utilizados em economias industrializadas e que estão sendo rapidamente adquiridos em muitos países em desenvolvimento. Os céticos advertem, no entanto, que tais estudos deixam de responder, ou respondem de forma inadequada, ao poder das preferências e apetites humanos, bem como às complicadas compensações e ligações que existem entre a implementação de tecnologias para economia de energia e padrões de consumo e demanda de energia de longo prazo.

Um tratamento abrangente dessas compensações e ligações, juntamente com uma análise criteriosa de quanto avanço em eficiência de uso final poderia ser atingida em diferentes partes do mundo dentro de um custo especificado e parâmetros de tempo, estão além do escopo deste estudo. Essas avaliações devem ser tratadas com humildade sob quaisquer circunstâncias, dada a dificuldade de antecipar os futuros avanços tecnológicos e seu impacto sobre o comportamento, gostos e preferências humanas. A vida moderna está repleta de exemplos de tecnologias que melhoraram a qualidade de vida e aumentaram a produtividade para milhões de pessoas, ao mesmo tempo que direta ou indiretamente criaram demanda para produtos e serviços inteiramente novos. As fronteiras da eletrônica, telecomunicação e tecnologia da informação, que avançam rapidamente, exerceram uma influência particularmente profunda nas últimas décadas e pode-se esperar que continuem a gerar novas oportunidades para ganhos em eficiência, juntamente com novas formas de atividade econômica e de consumo. Conforme observado no Capítulo 1, nas duas últimas décadas, avanços tecnológicos produziram uma redução modesta (algo mais do que 1% ao ano em média), mas estável na intensidade energética da economia mundial – onde a intensidade é medida pela razão da produção econômica (produto mundial bruto) pelo consumo de energia primária. Essa redução, no entanto, não tem sido suficiente para compensar o crescimento de produção econômica e o consumo mundial de energia em termos absolutos continua a crescer.

O Capítulo 2 examina, em termos gerais, algumas das oportunidades tecnológicas que existem para melhorar os setores específicos de uso final de eficiência energética, bem como alguns dos principais mecanismos de políticas utilizados em diferentes épocas e em diferentes contextos para promover tais avanços<sup>14</sup>. Deve-se estar ciente, desde o início, de que, uma vez que os melhores dados disponíveis sobre esses tópicos são da Europa, Japão e Estados Unidos, boa parte da discussão deste capítulo reflete o viés de um país industrializado. No entanto, os resultados apresentados aqui podem ser muito relevantes dadas as similaridades na conversão de energia e tecnologias de uso final que tendem a ser amplamente adotadas em todo o mundo à medida que as economias se industrializam e que a renda pessoal, ao menos para as elites ricas, aumenta. Em todo o mundo, as pessoas desejam quase as mesmas coisas – de refrigeradores e condicionadores de ar a televisores e veículos. O desejo quase universal de bens e amenidades parecidos cria um desafio e uma oportunidade para se transferir avanços tecnológicos e lições aprendidas. Economias de desenvolvimento rápido, particularmente, têm a oportunidade de “saltar” para tecnologias mais eficientes, que tendem a produzir maiores benefícios e a ser mais custo-efetivas quando são incorporadas de baixo para cima em vez de serem adaptadas posteriormente em edifícios, infraestrutura, equipamentos ou processos já existentes. Ademais, a justificativa econômica para se incorporar avanços em eficiência pode ser especialmente atraente – apesar de esse fato ser desconsiderado com frequência – nas fases iniciais da industrialização, quando materiais básicos e energia-intensivos tendem a consumir uma fatia maior de recursos econômicos.

Tanto em contextos de países industrializados quanto em desenvolvimento, no entanto, não é provável que os impulsionadores de mercado, sozinhos, forneçam o potencial pleno de avanços de eficiência custo-efetivos, em parte por causa da existência bem documentada de generalizadas barreiras informacionais, organizacionais, comportamentais e outras. A experiência do mundo real sugere que essas barreiras podem ser substan-

---

14. A menos que de outra forma especificados, os dados usados neste capítulo provêm dos relatórios *World Energy Outlook* da IEA (2004a e 2006a).



cialmente reduzidas caso haja vontade política para alterar o balanço de informações e incentivos. Tem-se debatido extensivamente sobre quanto da diferença entre ganhos realizados em eficiência e estimativas de engenharia de potencial custo-efetivo pode ser explicada pelas verdadeiras falhas do mercado, mas fica claro que as oportunidades para economia de energia quase sempre permanecem inexploradas, mesmo em casos em que avanços em eficiência são custo-efetivos e oferecem períodos favoráveis de recuperação de investimento ou altas taxas de retorno. Já é tecnicamente possível e custo-efetivo, por exemplo, construir prédios que atendam ou excedam aos padrões modernos de iluminação, controle de temperatura, e qualidade do ar utilizando metade da energia de edificações convencionais. Com pesquisa e desenvolvimento adicionais para reduzir custos e melhorar a integração dos sistemas, os quase 90% de economia em energia que foram alcançados em edificações individuais para demonstração podem ser atingidos em muitas estruturas comerciais novas. Porém não se acredita que ocorram mudanças por atacado nas práticas construtivas (ou talvez ocorram apenas gradualmente) sem intervenções de políticas combinadas.

Em suma, esforços para melhorar a eficiência no uso de energia à jusante devem ser vistos como um complemento essencial à transformação da produção de energia e sistemas de conversão à montante. Ambos serão necessários para atingir metas de sustentabilidade e ambos necessitam ação governamental para melhor alinhar os incentivos privados aos objetivos públicos.<sup>15</sup> Como primeiro passo, é importante reconhecer que oportunidades de mudanças pelo lado da demanda são tão ricas quanto pelo lado do fornecimento e podem produzir benefícios iguais ou ainda

---

15. Pode-se esperar que um recente aumento nos preços de energia, especialmente para o petróleo e o gás natural, estimulem investimentos adicionais em eficiência energética em toda a economia global, especialmente se os preços mais altos se mantiverem. Assim, no setor construtivo, e mesmo em outros setores que são mais diretamente afetados pelos preços do petróleo e do gás natural (por exemplo: transportes e indústria), não é provável que o efeito geral das recentes altas de preço seja suficiente para superar plenamente as barreiras de mercado à eficiência. Uma outra consideração que pode afetar o argumento a favor de uma política de intervenção é que se pode esperar que os altos preços induzam à substituição de combustíveis, juntamente à redução de consumo. Na medida em que a substituição de combustíveis altere o consumo para combustíveis mais carbono-intensivos como o carvão, o efeito de preços mais altos não será automaticamente congruente com objetivos de sustentabilidade.

maiores em muitos casos. Métodos para comparar as opções pelo lado do fornecimento e pelo da demanda foram desenvolvidos para o setor de concessionárias de energia sob a rubrica de planejamento integrado de recursos; em princípio, tais métodos podem ser aplicados em outros contextos de planejamento e em tomada de decisão corporativa. (Um importante desenvolvimento de apoio no setor de concessionárias é o esforço, em algumas jurisdições, para dissociar lucros de venda de energia para melhor alinhar os incentivos dos fornecedores de serviços de energia com os objetivos sociais.) Atualmente, no entanto, nenhuma indústria está preparada para entregar avanços em eficiência energética na escala que existe para entregar fontes de energia (como petróleo, gás ou eletricidade). Encontrar modelos de negócio nos quais investir e aproveitar dos avanços em eficiência, portanto, permanece um desafio fundamental. As empresas de serviço de energia podem atender parte dessa necessidade.<sup>16</sup> Somando-se a isso, várias grandes corporações recentemente iniciaram esforços internos substanciais para melhorar a eficiência e reduzir seus custos de energia.

## 2.1 Avaliando o potencial para avanços em eficiência energética

Avanços na eficiência de transformação e uso de energia há muito estão intimamente ligados ao desenvolvimento das sociedades industriais modernas. Há quase dois séculos e meio, o motor a vapor de Watt aprimorou a eficiência de modelos anteriores por um fator de três ou mais, causando uma revolução na aplicação prática do motor a vapor. Esse desenvolvimento levou a um grande número de avanços sociais e tecnológicos avassaladores, mas também teve o efeito de aumentar a demanda por carvão. Na verdade, mudanças na eficiência e na precisão com que a energia pode ser utilizada desempenharam um papel tão grande na promoção

---

16. As empresas de serviços de energia normalmente são companhias pequenas que identificam economias de energia em empresas através de auditorias e depois aplicam as medidas de adaptação necessárias, ou com capital próprio ou com capital disponibilizado por uma instituição financeira. O investimento é recuperado através de economias na conta de energia da empresa.

de transformações sociais associadas à industrialização quanto a simples expansão dos suprimentos disponíveis de energia.

As dinâmicas tecnológicas e sociais que determinam a demanda por energia são de fundamental importância para gerenciar os sistemas de energia. A demanda total por recursos de energia primária depende da eficiência dos processos utilizados para converter energia primária em energia útil, bem como da intensidade com a qual a energia útil é utilizada para prestar os serviços. Por exemplo, se a demanda total for um recurso primário como o carvão, depende não só da eficiência com a qual o carvão é convertido em eletricidade (onde eficiência é uma quantidade adimensional que se reflete na proporção de saída de energia para a entrada de energia no processo de conversão),<sup>17</sup> mas também na intensidade com a qual a eletricidade é usada para fornecer serviços como iluminação ou refrigeração.

Economias máximas de energia podem ser atingidas ao se explorar, de forma abrangente, as oportunidades para melhorar as eficiências de conversão e reduzir a intensidade de uso final em toda a cadeia de fornecimento de energia, idealmente também levando em consideração as propriedades de ciclo de vida e conteúdo de diferentes produtos, bem como o potencial para substituir produtos ou serviços alternativos (Figura 2.1). Até que ponto ganhos em eficiência teoricamente disponíveis serão capturados, no en-

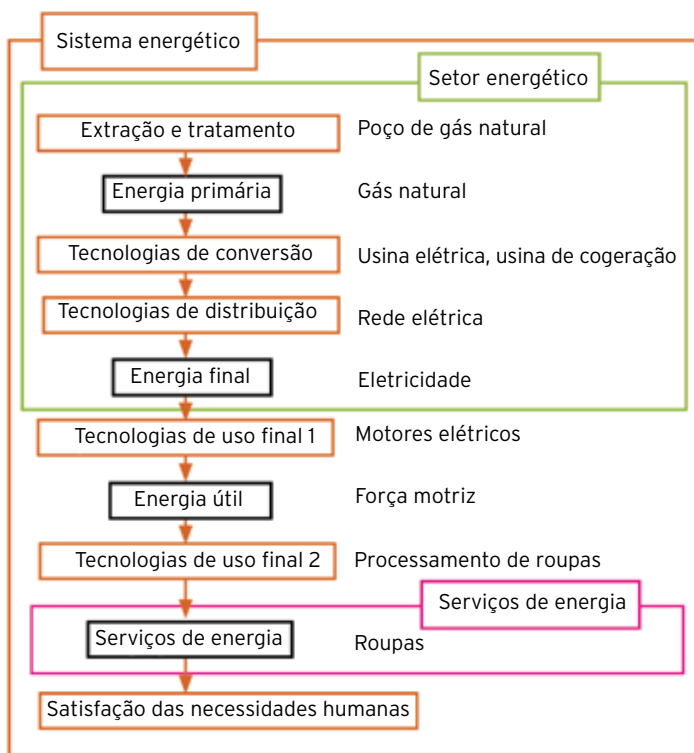
---

17. A eficiência potencial máxima nesse sentido é governada pela primeira lei da termodinâmica que diz essencialmente que a energia é conservada (isto é, não pode ser criada ou destruída) e, portanto, a quantidade de energia perdida em um sistema fechado não pode ser maior do que a energia ganha nesse sistema. A eficiência máxima dos motores térmicos é governada pela segunda lei da termodinâmica, que afirma que os sistemas de energia tendem a um aumento de entropia. Essas leis físicas são úteis para determinar os limites do que é possível em termos de energia necessária para mover um certo processo. Por exemplo, capturar o dióxido de carbono da atmosfera e concentrá-lo em um fluxo de gás que pode ser bombeado para o solo para sequestro envolve uma redução de entropia. Dessa forma, as leis da termodinâmica permitem que se calcule a mínima entrada de energia necessária para implementar esse processo. No entanto, a qualidade e o valor monetário de diferentes formas de energia também são importantes. Por exemplo, quando a energia química contida nas ligações de moléculas de gás natural é convertida em energia (térmica) de qualidade inferior em água aquecida, alguma capacidade de produzir trabalho (energia de qualidade superior) é perdida. Assim, os cálculos de potencial de eficiência energética só capturam parcialmente a economia do uso de energia, uma vez que nem todas as formas de energia têm valor monetário igual. O calor desperdiçado de uma usina de energia obviamente não tem tanto valor quanto o calor de alta temperatura utilizado para ativar uma turbina a vapor, enquanto os combustíveis líquidos usados para transporte, devido ao valor extremamente alto que têm nessas aplicações, raramente são utilizados para aquecimento do ambiente ou geração de eletricidade.

tanto, depende de uma série de fatores. Uma primeira questão, obviamente, é o custo: muitas das decisões, se não a maioria, de consumidores e de empresas são guiadas, acima de tudo, por considerações de linha de base. Mesmo quando avanços em eficiência são altamente custo-efetivos (no sentido de que quanto mais alto o custo inicial da tecnologia mais eficiente, mais rapidamente é recuperado através de economias de custo de energia), podem ser adotados lentamente, apenas; alguns dos motivos para isso são analisados na discussão sobre barreiras de mercado na próxima sessão.

Outros fatores que afetam o entendimento de uma nova tecnologia

Figura 2.1 A cadeia energética



Obs.: O fluxo de energia é apresentado desde a extração de energia primária até o fornecimento de serviços necessários.

Fontes: UNDP, Undesa e WEC, 2004.

estão ligados aos sistemas sociais e econômicos nos quais o uso de energia esteja inserido. A simples substituição de uma lâmpada incandescente, que normalmente produz 10-15 lumens por watt, por uma lâmpada fluorescente compacta que fornece 50 lumens por watt gera economias de energia significativas e prontamente quantificáveis. Mas reduções muito maiores de intensidade (bem como energia auxiliar e economias de custo de energia, por exemplo, redução de equipamento de refrigeração de ambiente) podem ser obtidas com a implementação de estratégias abrangentes que também utilizem projeto avançado de iluminação, melhores sensores e controles e luz natural. Que tecnologias e sistemas de iluminação são adotados – e quanto desse potencial técnico é realizado, afinal – naturalmente dependem de uma série de outros fatores, entre os quais preferências humanas por um espectro de cor específico, distribuições espaciais e a relação de iluminação direta para a indireta. Tais preferências frequentemente são determinadas culturalmente, pelo menos em parte, e podem mudar com o tempo. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento tecnológico continuado pode superar os conflitos iniciais entre aumento de eficiência e outros atributos de produto.

Outras complexidades surgem quando se avalia o potencial para reduções de intensidade energética no setor de transporte. Como no caso da iluminação (e deixando de lado, por um momento, as maiores reduções de intensidade que poderiam, sem dúvida, ser atingidas através de melhor planejamento urbano e sistemas de transporte público), é tecnicamente possível promover a mobilidade pessoal por apenas um décimo do consumo de energia primária atualmente associado a cada passageiro por quilômetro de viagem.<sup>18</sup> Apesar de avanços tecnológicos significativos, no entanto, a média economia de combustível por passageiro-veículo não mudou muito, pelo menos em parte, porque o avanço em eficiência foi trocado por outros atributos de veículo como volume interior, segurança ou desempenho (exemplo, aceleração). A situação fica ainda mais

---

18. Obviamente, outras limitações, como a velocidade desejada, conforto de viagem e condições mundiais para dirigir em diferentes ambientes, também teoricamente afetam o desempenho da economia de combustível a ser atingido.

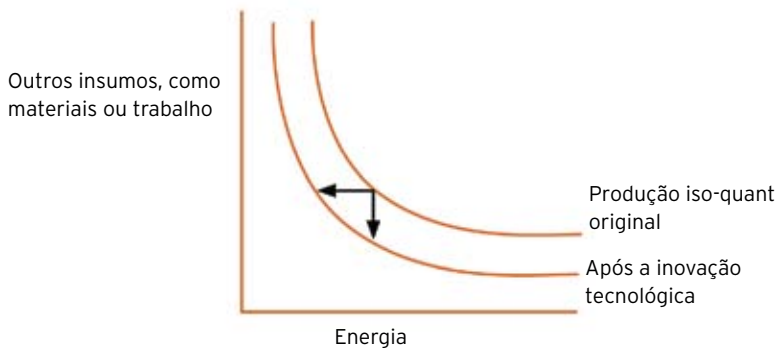
complicada pelo fato de a energia – enquanto obviamente fundamental para o fornecimento de mobilidade e outros serviços – ser apenas um dos muitos fatores que determinam como esses serviços são fornecidos: custos de combustível, por exemplo, podem abranger uma porcentagem relativamente pequena dos gastos totais com transporte.

Argumentos semelhantes podem ser generalizados em muitos tipos de sistemas energéticos. As inovações tecnológicas desempenham um papel central ao permitir reduções no uso de energia, mas seu efeito no consumo total de energia normalmente é difícil de prever. Em termos microeconômicos, tais inovações alteram a função de produção para vários serviços (como mobilidade ou iluminação) e mudam a quantidade de vários produtos (energia, material, trabalho) necessários para produzir um dado nível de satisfação (utilidade). Tipicamente, as inovações tecnológicas criam oportunidades para economizar energia e outros produtos, ou aumentar a utilidade (Figura 2.2).

Os resultados reais dependem de como os usuários aproveitam essas oportunidades. Em alguns casos, inovações tecnológicas que poderiam ser usadas para reduzir o consumo de energia são dirigidas para outros objeti-

---

**Figura 2.2** Inovação tecnológica e função de produção



Obs.: A inovação tecnológica permite que o mesmo serviço seja fornecido com menos energia e outros insumos. A curva no ponto mais afastado ilustra a produção iso-quant que descreve a compensação entre necessidades de energia e de outros insumos para o fornecimento de um dado nível de serviço de energia (como iluminação). A inovação tecnológica leva a curva em direção à origem, permitindo que o mesmo produto seja produzido com redução do uso de energia e/ou de outros insumos.

---

vos: a tecnologia automotiva, por exemplo, aumentou consideravelmente em décadas recentes, mas muito desse avanço foi usado para aumentar o tamanho do veículo e sua potência. Em nível macroeconômico também se pode esperar que avanços tecnológicos que aumentam eficiência e produtividade estimulem o crescimento econômico, assim contribuindo para níveis potencialmente mais altos de consumo geral no longo prazo, mesmo que em um nível mais baixo de intensidade energética. A teoria econômica simples sugere que se avanços em eficiência reduzem custos relacionados à energia de certas atividades, bens ou serviços, espera-se que o consumo dos mesmos cresça.

Uma questão ainda mais complicada é a tendência de economias modernizadoras cada vez mais converter formas primárias de energia (como biomassa, carvão ou petróleo cru) em formas mais úteis ou refinadas de energia (como eletricidade e combustível veicular). Por um lado, esses processos de conversão geralmente já causam perdas inevitáveis de eficiência; por outro lado, essas perdas podem ser compensadas por usos finais mais eficientes. Historicamente, o movimento em direção à eletricidade certamente teve um enorme impacto nas eficiências de uso final e sobre a gama de amenidades e atividades disponíveis.

O quanto esses efeitos “rebote” são significativos na realidade e até que ponto compensam as economias de energia que resultam em avanços de eficiência têm sido extensivamente debatidos na literatura relevante. Em países industrializados, observações e teoria sugerem que (a) avanços em eficiência energética realmente reduziram o crescimento da demanda de energia nas últimas décadas e (b) o estímulo econômico dos avanços em eficiência não teve um papel significativo para estimular o consumo de energia. Esse resultado não é inesperado, uma vez que os custos de energia são relativamente pequenos quando comparados à atividade econômica total da maioria dos países industrializados.<sup>19</sup> A situação pode ser

---

19. Tanto a teoria quanto estudos empíricos mostram que, em geral, apenas uma pequena parcela das economias de energia é perdida para o aumento de consumo. Isso pode ser compreendido pelo exemplo a seguir. Suponha-se que os hábitos de consumo de uma pessoa sejam tais que ela normalmente gaste 10% de sua renda com energia. Assuma-se que um grande investimento em isolamento, caldeira e aparelhos eficientes reduzam o uso total de energia da pessoa em 25%.

menos clara em longas escalas de tempo e em contextos de países em desenvolvimento, onde pode haver muita demanda não atendida de serviços de energia e onde os custos da energia representam uma fração maior dos custos econômicos dos serviços. Nesses casos, economias de custo de energia podem ser investidas para expandir o fornecimento de energia ou outros serviços essenciais e é mais plausível que a retroalimentação macroeconômica compense parte das reduções de demanda que se poderia esperar, de outra forma, dos avanços em eficiência.

Esse debate deixa de lado um ponto importante: avanços em eficiência energética levarão a uma combinação complexa de uso reduzido de energia e a um melhor padrão de vida.<sup>20</sup> Dado que o crescimento econômico que suporte um melhor padrão de vida é visto universalmente como desejável e necessário, especialmente para os pobres do mundo, o progresso concomitante para maior eficiência e menor intensidade de carbono claramente é preferível à falta de progresso em termos de promover objetivos mais amplos de sustentabilidade. Visto de outra forma, se crescimento e desenvolvimento são necessários para melhorar a vida das pessoas, seria melhor – por uma série de motivos – que o crescimento e o desenvolvimento ocorressem de forma eficiente em vez de ineficientemente e com menores, em vez de maiores, emissões de dióxido de carbono.

Atualmente, mesmo países com níveis semelhantes de desenvolvimento apresentam uma ampla gama de energia total e intensidades de carbono (isto é, energia consumida ou carbono emitido por unidade de produção econômica). Essa variação é uma função não apenas de escolhas tecnológicas, mas também de diferentes estruturas econômicas, dotação de recursos, circunstâncias climáticas e geográficas e outros fatores. Em geral, a experiência passada sugere que avanços em eficiência energética realmente tendem

---

Isso se traduz em 2,5% de renda, dos quais, se os padrões de consumo passado se mantiverem, somente 10% ou 2,5% podem ser gastos com uso adicional de energia. Ver também Schipper and Grubb (2000), p. 367-88.

20. O que importa, de uma perspectiva ambiental ou de segurança de energia, é o consumo de combustível ou as emissões finais. Porque a relação entre avanços em eficiência e redução de emissões ou de consumo de combustível não é clara, medidas de políticas adicionais podem ser necessárias para assegurar que os objetivos desejados em termos de energia absoluta economizada ou toneladas de carbono evitadas estão sendo atingidos.



a acompanhar o progresso tecnológico, mas não em ritmo suficiente para compensar o aumento geral de demanda. Ademais, os ganhos em eficiência obtidos pelo mercado, na ausência de políticas públicas, normalmente são muito menores do que as estimativas de engenharia de potencial custo-efetivo. Antes de explorar prospectos específicos para maiores reduções de intensidade de energia em diferentes setores de uso final, vale analisar, em termos gerais, algumas das possíveis razões para essa disparidade.

## 2.2 Barreiras para a obtenção de economias custo-efetivas de energia

Novas tecnologias ou métodos para aumentar a eficiência no uso de energia nem sempre são adotados com a rapidez ou a extensão que se possa esperar apenas com base em considerações de custo-efetividade. Em alguns casos, modelos mais eficientes podem não estar disponíveis de forma combinada com outras características que os consumidores valorizam mais; em outros casos, a empresa pode deixar de adotar avanços em eficiência que obteriam rápidas compensações econômicas por causa do risco de interferir em processos complexos de fabricação. Hábitos arraigados e inércia cultural e institucional também podem representar enormes barreiras para a mudança, mesmo em empresas relativamente sofisticadas com gastos substanciais com energia. Condições regulatórias ou de mercado às vezes criam impedimentos adicionais: por exemplo, regras que proíbem que usuários finais de pequena escala vendam a energia que produzem de volta à rede podem inibir a implementação de tecnologias eficientes para cogeração local de calor e eletricidade. Em suma, barreiras institucionais, comportamentais ou outras à adoção de tecnologias energéticas eficientes e custo-efetivas estão bastante difundidas e têm sido documentadas extensivamente na literatura sobre políticas de energia. Porque a maioria das opções de políticas para a promoção de eficiência energética visa à abordagem de uma ou mais dessas barreiras, é importante compreender onde e por que surgem e onde se podem encontrar os pontos de apoio mais efetivos para superá-las.

O papel das barreiras institucionais ou outras não econômicas à eficiência energética varia consideravelmente entre setores. Grandes indústrias diretamente envolvidas na produção de energia ou conversão (como as concessionárias de energia) e outras indústrias energointensivas (como as indústrias de alumínio, aço e cimento) tipicamente possuem capacidade institucional de analisar seu uso de energia, avaliar o impacto potencial de novas tecnologias e implementar avanços custo-efetivos. Além disso, sua motivação para compreender e gerenciar suas necessidades energéticas normalmente é mais forte porque a energia responde por uma parcela maior de seus custos totais de produção. Nessas indústrias, a adoção de novas tecnologias de energia inclui barreiras consideráveis como:

- A complexidade da integração de processos somada ao alto custo das interrupções do sistema. Os gerenciadores de grandes instalações complexas, como as fábricas de aço, dão grande valor à confiabilidade e podem relutar em assumir os riscos operacionais associados à adoção de novas tecnologias.
- Problemas regulatórios, como a necessidade de atender a novos licenciamentos ambientais e de segurança, que podem limitar a adoção de novas tecnologias. Nos Estados Unidos, algumas concessionárias de energia afirmaram que as exigências dos licenciamentos atrasavam a introdução de novas tecnologias para usinas elétricas a carvão.
- A existência de desincentivos aos investimentos de capital em adaptações para melhoria energética se comparam aos investimentos em nova capacidade de produção.
- O ritmo lento da circulação de capital para alguns tipos de capital social, que surgem em parte devido aos dois fatores listados acima, influencia a limitação à adoção de novas tecnologias.

Em contraste às indústrias energo-intensivas, consumidores individuais, pequenos negócios e outros usuários finais (incluindo indústrias com baixa intensidade energética) normalmente não têm informação e capacitação institucional para analisar e administrar seu uso de energia. Também é baixa a probabilidade de buscarem essa informação e capaci-

tação uma vez que a energia – em termos de custo e importância – normalmente tem um peso baixo em relação a outras considerações. Para consumidores individuais e pequenos negócios, em particular, as barreiras importantes à adoção de novas tecnologias energéticas incluem:

- *Incentivos dispersos e falta de sinais claros do mercado.* Construtoras e incorporadoras geralmente não incluem tecnologias energéticas custo-efetivas porque falta aos mercados imobiliários meios efetivos para quantificar as economias de energia resultantes e eficientemente recuperar o custo de capital adicional dos compradores. Da mesma forma, falta incentivo aos senhorios para investir em equipamentos mais eficientes, uma vez que os inquilinos é que arcarão com as despesas de energia. O mesmo problema responde pelo fato de muitos aparelhos eletrônicos consumirem, desnecessariamente, grandes quantidades de energia mesmo quando desligados ou em modo de espera. Os fabricantes não têm incentivos para reduzir essas perdas quando o impacto resultante sobre o uso da energia e custos operacionais é invisível para o consumidor no momento da compra.
- *Falta de informação e de capacidade analítica.* Essa falta pode impedir os usuários finais de efetivamente administrarem seu consumo de energia mesmo quando existem mercados para tecnologias energéticas aplicáveis. Por exemplo, se mais usuários finais de eletricidade tivessem acesso à aferição em tempo real e se deparassem com o preço em tempo real, mudariam seu consumo para horários fora do pico. Isso permitiria uma utilização mais eficiente de recursos de geração e melhoraria a confiabilidade na rede; também poderia facilitar potencialmente uma maior confiança em certas fontes de energia de baixa emissão de carbono, como energia eólica e nuclear, que de outra forma seriam subutilizadas à noite.<sup>21</sup>
- *Falta de acesso a capital.* A adoção de tecnologias de alto custo de ca-

---

21. Em situações em que a capacidade de carga de base é dominada por usinas movidas a carvão mineral, por outro lado, a mudança do horário de pico pode não ser algo benéfico do ponto de vista de emissões (especialmente se a fonte de energia marginal durante o horário de pico for menos carbono-intensiva do que a fonte de energia marginal fora do horário de pico).

pital poderia diminuir sem acesso a capital. Muitas famílias de baixa renda na América do Norte continuam a utilizar sistemas elétricos relativamente custosos e ineficientes de aquecimento e de água quente, mesmo que a troca para o gás natural se pague em alguns anos. Em muitos casos, falta a essas famílias ter em mãos o capital para adquirir novos aparelhos a gás. Restrições de capital, com certeza, também podem ser um problema em muitos contextos de países em desenvolvimento onde habitações pobres podem ter taxas de desconto de 60% ou mais.

- *Dificuldade de integrar sistemas complexos.* A dificuldade de integrar sistemas complexos pode criar impedimentos para pequenos usuários. Projetar e operar edifícios de alta eficiência exige profunda integração entre os vários subsistemas do edifício, tanto durante a fase de projeto quanto na operação posterior.

Uma série de políticas tem sido desenvolvida e implementada para lidar com essas barreiras, inclusive com padrões de edificação e aparelhagem, incentivos dirigidos à tecnologia, iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, programas de informação ao consumidor e programas de gerenciamento de demanda patrocinado pelas concessionárias de energia. Essas opções são analisadas nas discussões específicas por setor a seguir.

### 2.3 O setor predial

O consumo global de energia primária para fornecer aquecimento, refrigeração, iluminação e outros serviços de energia relacionados à construção cresceu de 86 exajoules em 1971 para 165 exajoules em 2002 – uma taxa de crescimento médio de 2,2% ao ano (Price et al., 2006). A demanda de energia para prédios comerciais cresceu 50% mais rapidamente do que para prédios residenciais no período. O uso de energia em edifícios também aumentou consideravelmente mais rápido em países em desenvolvimento do que em países industrializados nas três últimas décadas: a taxa de crescimento anual médio para países em desenvolvimento foi de

2,9 % de 1971 a 2002, comparada a 1,4% para países industrializados. No total, 38% de todo o consumo primário de energia (sem contar a biomassa tradicional) é utilizado globalmente para fornecer serviços de energia em edifícios.

A demanda de energia em edifícios é guiada pelo crescimento populacional, adição de equipamentos que utilizam novas energias, características construtivas e de aparelhos, condições climáticas e fatores comportamentais. A rápida urbanização que vem ocorrendo em muitos países em desenvolvimento tem importantes implicações no consumo de energia no setor predial. Espera-se que grande parte do crescimento populacional projetado para ocorrer em todo o mundo nos próximos 25 anos ocorra em áreas urbanas. Como milhões de apartamentos e casas surgem para acomodar a população crescente, por sua vez criam nova demanda de energia para iluminação, equipamentos e sistemas de aquecimento e refrigeração. Mudanças estruturais na economia, como a expansão do setor de serviços, podem produzir um crescimento mais rápido de demanda no setor de edifícios comerciais.

É importante fazer uma distinção entre o que pode ser obtido em edifícios individuais e o que pode ser obtido no setor predial como um todo em um dado país. No caso de edifícios individuais, grandes economias de energia são possíveis e têm sido demonstradas. Há vários exemplos em que o uso de energia para aquecimento foi reduzido a menos de 10% da média para os edifícios existentes através de medidas como forte isolamento, projeto solar passivo, baixa infiltração, medidas para reduzir cargas de aquecimento e refrigeração, bem como sistemas de aquecimento e refrigeração (Havey, 2006). Projetos construtivos que resultam em consumo de energia muito baixo estão se tornando norma para novas construções, como na Alemanha e Áustria, com “casas passivas” que contam com fontes de energia renováveis e consomem pouca ou nenhuma energia externa. Tem-se discutido atualmente sobre as chamadas “casas de mais energia” que podem fornecer energia à rede. Se esses avanços provarem ser amplamente transferíveis, podem criar oportunidades substanciais para promover objetivos de sustentabilidade, especialmente em locais onde o número de edifícios vem se expandindo rapidamente. Da

mesma forma, existem aparelhos que usam 50% menos energia do que aparelhos comuns. Obter grandes reduções de energia em edifícios residenciais geralmente não exige conhecimento especial; sistemas mais complexos em grandes edifícios comerciais, em contraste, apresentam maiores demandas para arquitetos, engenheiros e operadores de edifícios.

Em todo caso, maximizar a eficiência energética de edifícios é uma tarefa complexa que exige um alto grau de integração de arquitetura, projeto, construção, sistemas construtivos e materiais. Por isso, os melhores resultados geralmente podem ser alcançados em novas edificações em que considerações sobre energia e ecologia podem ser incorporadas desde a fundação. Em países com um número rapidamente crescente de edifícios, pode fazer sentido, portanto, introduzir políticas diferenciadas visando a novas construções. Em muitos países industrializados, por outro lado, o número de edifícios existentes é muito maior do que o número de novos edifícios acrescentados a cada ano. Políticas criativas podem ser necessárias para capturar oportunidades de adaptação custo-efetivas nesses edifícios dados os diferentes problemas de implementação e custos tipicamente mais altos que se aplicam. Para se atingir uma ampla transformação dos edifícios em diferentes contextos é necessário que tecnologias, habilidades humanas, incentivos financeiros e exigências regulatórias para capturar oportunidades de eficiência em estruturas novas e já existentes sejam amplamente disseminados.

### *Edifícios residenciais*

É difícil comparar o desempenho energético de edifícios em diferentes países por causa das limitações de dados (relativos a uso de energia em termos de uso final), variações climáticas e diferentes práticas construtivas que não estão quantificadas. A melhor fonte de dados para uma comparação entre países europeus é a IEA que cobre 11 de seus membros que usam mais energia. Os dados da IEA indicam que eletrodomésticos e iluminação respondem por 22% do total de consumo de energia de uma residência com base em uso final e aproximadamente 32% do consumo

de energia primária (isto é, levando-se em conta o consumo de energia primária para gerar eletricidade). O aquecimento de interiores responde pela maior parcela do consumo de energia em edifícios residenciais: cerca de 40% da demanda total de energia primária (IEA, 2004b).

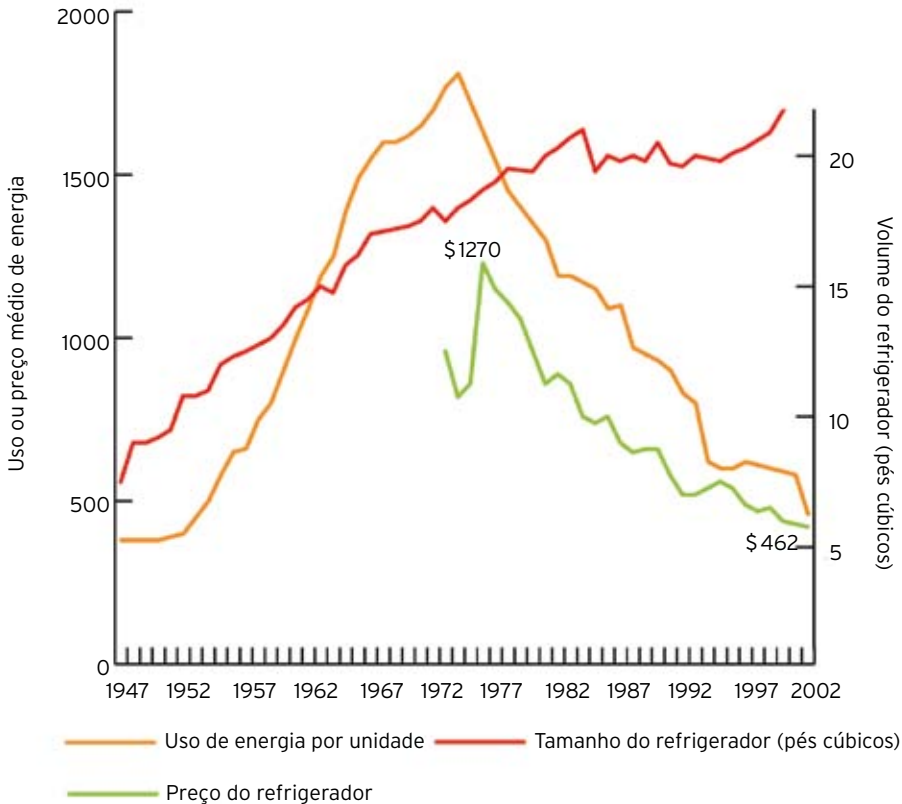
O potencial para avanços em eficiência de aquecimento de interiores e ar condicionado para edifícios residenciais tem muitas opções, inclusive as seguintes:

- uso de equipamentos mais eficientes de aquecimento e de ar-condicionado;
- aumento de isolamento térmico;
- uso de tecnologia solar passiva para coletar calor;
- redução de infiltração do ar externo ou perdas do ar condicionado para o espaço não condicionado;
- uso de sistemas de distribuição térmica mais eficientes;
- uso de coletores solares ativos e
- mudança de comportamento (exemplo, ajustes de temperatura).

Em alguns países, sistemas mais eficientes de aquecimento e de ar condicionado tornaram-se obrigatórios através de códigos de obras ou padrões para equipamentos. Ao mesmo tempo, melhores práticas construtivas e padrões de energia para edifícios – que levaram a múltiplos enviaçamentos, maiores níveis de isolamento e infiltração reduzida de ar – reduziram cargas de aquecimento, ventilação e ar condicionado por metro quadrado em novos edifícios em muitos países do mundo. Em alguns casos, a adição de opções de baixa tecnologia, como ventiladores de teto, pode ser utilizada para reduzir as necessidades de ar condicionado. Em alguns poucos casos, introduziram-se políticas para reduzir o consumo de energia predial através de mudança de comportamento. Para reduzir as cargas de ar condicionado, por exemplo, algumas cidades chinesas adotaram regulamentações que proíbem as pessoas de ajustarem seus termostatos abaixo de 26°C durante o verão.

Eletrodomésticos estão em segundo lugar na demanda de energia em edifícios residenciais. A evolução da tecnologia de refrigeradores nos Estados Unidos representa uma importante história de sucesso de eficiência

**Figura 2.3** Uso de energia por refrigeradores nos Estados Unidos ao longo do tempo



Fontes: David Goldstein, Natural Resources Defense Council.

energética. A Figura 2.3 apresenta as tendências de uso, preço e volume de energia da média de refrigeradores nos Estados Unidos nos últimos 50 anos. O pico de uso de eletricidade ocorreu em meados da década de 1970. A partir de então, como o estado da Califórnia estabeleceu padrões de eficiência e como o Congresso dos EUA debateu o estabelecimento de um padrão federal, o uso de energia em refrigeradores começou a cair significativamente. Realizaram-se avanços em eficiência com o uso de tecnologias disponíveis: melhor isolamento (uso de agentes de expansão), melhores compressores, além de melhor vedação e calafetagem. A indústria



não precisou desenvolver novos refrigeradores para atingir esses ganhos. O consumo médio de energia de refrigeradores caiu dramaticamente no final da década de 1970, antecipando-se aos padrões da Califórnia; os padrões federais, quando introduzidos vários anos mais tarde, eram mais rígidos do que os padrões da Califórnia. Durante esse período, o tamanho dos novos refrigeradores aumentou, mas seu preço caiu.

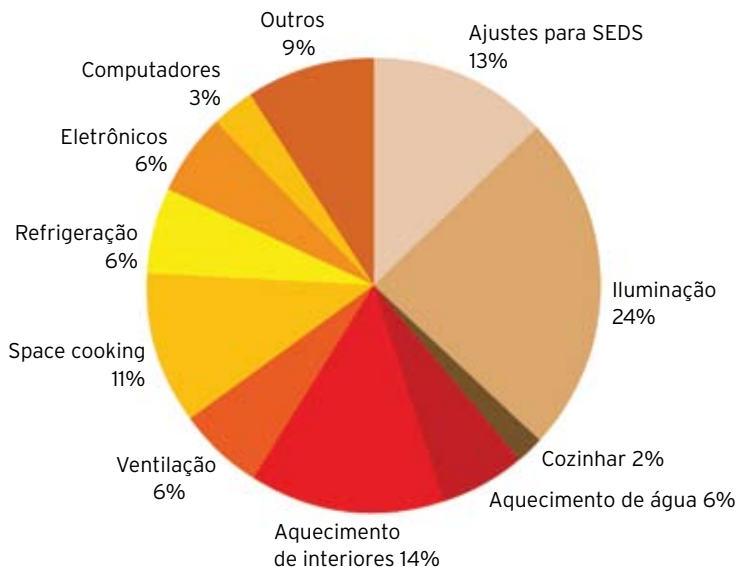
As mudanças do consumo de energia apresentadas na Figura 2.3 são significativas. O consumo anual de eletricidade do refrigerador médio caiu de 1800 quilowatt-horas ao ano para 450 quilowatt-horas ao ano entre 1977 e 2002, mesmo com o volume aumentando mais de 20% e os preços caindo mais de 60%. Estima-se que o valor das economias de energia dos Estados Unidos de 150 milhões de refrigeradores e *freezers* chegou a cerca de US\$ 17 bilhões ao ano.

O potencial de redução do consumo de energia de outros eletrodomésticos, apesar de não tão significativo quanto o caso dos refrigeradores, é substancial, entretanto. Máquinas de lavar roupa com eixo horizontal, por exemplo, exigem bem menos água e energia do que máquinas de eixo vertical. Edifícios residenciais e comerciais agora dispõem de um grande e crescente número de aparatos variados que utilizam energia, como televisores, outros equipamentos audiovisuais, computadores, impressoras e carregadores de bateria. Muitos desses aparatos usam – e desperdiçam – quantidades significativas de energia quando em modo de espera; na verdade, estima-se que as perdas de espera de vários equipamentos eletrônicos sejam responsáveis por 3% a 13% do uso residencial de eletricidade em países OCDE. Em muitos casos, economias significativas de energia poderiam ser obtidas com novos projetos para esse tipo de aparelhos de forma a minimizar as perdas de espera.<sup>22</sup>

---

22. É possível reduzir a maior parte das perdas de espera de 5 a 25 watts para 1 a 2 watts. No entanto, documentar a dimensão das economias possíveis é difícil, por causa da grande variedade de perdas de espera (Lebot et al., 2000). O relatório da IEA (2006b), *Raising the Profile of Energy Efficiency in China* (Elevando o Perfil de Eficiência Energética na China), fornece um interessante estudo de caso sobre a eficiência de potência de espera.

**Figura 2.4** Parcelas de uso de energia primária em edifícios comerciais nos Estados Unidos



Obs.: Consumo total de energia: 17,49 quatrilhões de BTUs (iguais a 18,45 EJ). Consumo de energia predial no setor industrial foi excluído. A parte da Figura 2.4 chamada de Ajustes para Seds (Sistemas de Dados de Energia do Estado) representa incerteza nos números apresentados. Dados de 2003.

Fonte: USDOE, 2005.

### *Edifícios comerciais*

As duas fontes mais importantes de demanda de energia nos edifícios comerciais dos Estados Unidos, conforme ilustra a Figura 2.4, são sistemas de aquecimento de interiores, ventilação e ar condicionado (Avac), que respondem por 31% do uso total de energia primária em prédios; e iluminação, que responde por 24% do uso total de energia primária em prédios. Estima-se que os resultados para grandes edifícios comerciais em muitos outros países sejam semelhantes aos dos Estados Unidos, apesar de não haver uma análise estatística detalhada para outras nações-membros da IEA ou para o mundo em desenvolvimento. O termo “edifícios comerciais” cobre uma ampla gama de estruturas, incluindo edifícios governa-

mentais, de escritórios comerciais, escolas, hospitais, templos religiosos, lojas, armazéns, restaurantes, e locais de entretenimento.

Existem grandes oportunidades para economia de energia no setor de edifícios comerciais. Em climas quentes e úmidos, cargas de refrigeração podem ser reduzidas tratando-se do envoltório do edifício – incluindo revestimento de janelas e toldos, cortinas ou venezianas – e pelo emprego de iluminação energo-eficiente (que produz menos desperdício de calor). Em muitos casos, opções de baixa tecnologia, como incorporar características tradicionais de projeto ou pintar de branco a cobertura de prédios para aumentar sua refletividade, pode produzir reduções substanciais nas cargas de condicionamento de ar. Um dos pontos discutidos no Capítulo 3 é o de equipamento solar fotovoltaico integrado ao edifício, que representa outra opção para reduzir o consumo de eletricidade da rede em edifícios comerciais. Independentemente do clima, equipamentos mais eficientes são encontrados para os principais usos finais de edifícios comerciais conforme mostra a Figura 2.4.

As mais significativas oportunidades de eficiência para edifícios comerciais no futuro envolvem a integração de sistemas. Um exemplo é a luz do dia, em que sensores medem a luz que entra pelas áreas perimetrais de um edifício e acionadores controlam o nível de iluminação artificial. Isto pode reduzir o consumo de energia com iluminação em áreas perimetrais em 75% e produzir economias adicionais reduzindo as cargas de condicionamento de ar. Vários estudos e aplicações reais mostraram que tais sistemas de iluminação diurna podem ser altamente custo-efetivos quando avaliados com base nos custos de ciclo de vida (isto é, levando em conta as economias operacionais de custo sobre a vida útil do edifício, bem como custo de capital adiantado). Devido à sua complexidade, no entanto, têm tido penetração apenas limitada no mercado.

Inspecionar todos os elementos de um edifício para assegurar que estejam funcionando adequadamente – um processo conhecido como comissionamento de edifício – normalmente produz grandes economias. Com frequência, os edifícios não são construídos da forma como são projetados e o comissionamento pode identificar e retificar esses problemas, reduzindo o consumo de energia de 10% a 30% ou mais. Mesmo quan-

do edifícios são construídos conforme o especificado, o comissionamento pode “afinar” os sistemas Avac. Economias ainda maiores de energia podem ser obtidas em edifícios comerciais através do “comissionamento contínuo” que envolve monitoramento em tempo real do desempenho geral do Avac e de todos os outros sistemas do edifício, além do ajuste dos controles dos sistemas com base nos resultados do monitoramento. Assim como a iluminação diurna tem demorado a ganhar aceitação comercial, as complexidades do comissionamento contínuo terão de ser superadas antes de este ser amplamente adotado.

### *Políticas para promover eficiência energética em edifícios*

Muitos países têm adotado políticas para promover eficiência energética em edifícios; dois dos mais comuns são padrões de eficiência de equipamentos e código de energia para obras. Em alguns países, as concessionárias também têm desempenhado um papel importante ao fornecer incentivos, informação ou assistência técnica para promover melhorias de eficiência de uso final. Por fim, governos ou instituições financeiras podem fornecer incentivos financeiros, inclusive empréstimos de baixo ou médio custo, para investimentos de eficiência em energia tanto para projetos de adaptação quanto para projetos originais de construção. Empréstimos um pouco abaixo do valor de mercado podem estimular maior uso de fornecedores de serviços energo-eficientes, como empresas de serviços de energia (Esco), e ser especialmente atraentes quando o construtor/adaptador também for o proprietário e operador do edifício podendo, assim, se beneficiar dos custos reduzidos de energia ao longo do tempo. Este normalmente é o caso de edifícios pertencentes ao governo, grandes corporações, universidades e outras instituições do mesmo porte.

Padrões de equipamentos têm sido especialmente eficientes: são relativamente fáceis de impor, em geral envolvem apenas um número pequeno de fabricantes e produzem economias de energia sem exigir que os consumidores percam tempo e energia comprando um modelo ineficiente. Para produzir avanços tecnológicos contínuos e ganhos em

eficiência, no entanto, os padrões de eletrodomésticos devem ser rigorosos e atualizados periodicamente. Códigos de obras são importantes, uma vez que influenciam o consumo de energia total durante a vida útil de estruturas que durarão muitas décadas. Para que os códigos de obras sejam bem-sucedidos, no entanto, arquitetos e construtores devem ser preparados e as exigências impostas. Outros tipos de programas, como o gerenciamento pelo lado da demanda da concessionária ou *Top Runner* do Japão, podem servir como um complemento importante aos códigos de obras e padrões para eletrodomésticos, fornecendo incentivos para maiores ganhos em eficiência além dos mínimos estabelecidos pelos padrões obrigatórios.

#### Quadro 2.1 Programa *Top Runner* do Japão

Em 1999, o Japão introduziu uma inovação à Lei de Conservação de Energia existente. O Programa *Top Runner* visa promover avanços em curso em eficiência em eletrodomésticos, maquinário e equipamentos utilizados nos setores residencial, comercial e de transporte.

O programa funciona do seguinte modo: comitês compostos de representantes da indústria, academia, sindicatos e grupos de consumidores identificam os modelos mais eficientes atualmente no mercado em uma categoria particular de produto. O desempenho energético desse modelo "campeão" é usado para estabelecer uma meta a ser atingida por todos os fabricantes nos próximos quatro a oito anos. Para atingir a meta, os fabricantes devem garantir que a eficiência média medida em todos os modelos que oferecem na mesma categoria de produto atinja o melhor padrão. Dessa forma, o programa oferece mais flexibilidade do que os padrões mínimos de eficiência para todos os produtos: os fabricantes podem continuar a vender modelos menos eficientes, desde que compensem com muito maior eficiência em outros modelos. Ao reestabelecer metas continuamente com base no melhor desempenho da classe, esta abordagem da busca por melhores práticas progressivamente eleva o nível de desempenho médio de eficiência. Apesar de os fabricantes só serem obrigados a "fazer esforços" para atingir a meta, o Programa Campeão atingiu bons resultados no Japão. A principal vantagem do governo reside em sua habilidade de publicar quando uma empresa deixa de atingir as metas ou quando se esforça para atingir as metas, o que, por sua vez, poderia colocar a imagem da empresa em risco. Normalmente, as metas estabelecidas em diferentes

categorias de produto estão indexadas a outros atributos de produto (tais como peso do veículo, tamanho da tela, em caso de televisão, ou potência, no caso de ar condicionado). Em alguns casos, categorias adicionais foram criadas para acomodar certas funções de produto que podem não ser custo-efetivas se combinadas às características mais avançadas de eficiência ou se refletem diferenças de preço (exemplo, uma meta para modelos de baixo custo e alta eficiência e outra meta para modelos de alto custo e alta eficiência). Essa flexibilidade adicional visa assegurar que os consumidores tenham uma ampla gama de escolha.

O Programa Campeão do Japão inclui um componente de informação ao consumidor, na forma de um sistema de selos. Modelos individuais de produto que não atinjam a meta podem permanecer no mercado, mas recebem um selo laranja. Modelos que atingem a meta recebem um selo verde. Para maiores informações, consulte o Centro de Conservação de Energia do Japão no website: <[www.eccj.or.jp](http://www.eccj.or.jp)>.

## 2.4 Eficiência energética industrial

O setor industrial responde por 37% do consumo global de energia primária; dessa forma, representa uma importante área de oportunidade para avanços em eficiência. Este setor é extremamente diverso e inclui uma ampla gama de atividades, desde a extração de recursos naturais e sua conversão em matérias-primas à fabricação de produtos acabados. O setor industrial pode ser amplamente definido como um setor formado por indústrias energo-intensivas (exemplo, ferro e aço, químicos, refino de petróleo, cimento, alumínio, celulose e papel) e indústrias leves (exemplo, processamento de alimentos, têxteis, produtos de madeira, impressão e publicação, processamento de metais). Indústrias energo-intensivas respondem por mais da metade do consumo de energia do setor na maioria dos países.

### *Tendências de consumo de energia no setor industrial*

O consumo de energia primária no setor industrial cresceu de 89 exajoules em 1971 para 142 exajoules em 2002, em uma taxa de crescimento

médio anual de 1,5% (Price et al., 2006). O consumo de energia primária em países em desenvolvimento, que respondeu por 43% do uso de energia primária no setor industrial em todo o mundo em 2002, cresceu a uma taxa média de 4,5% ao ano nesse período. Os países industrializados tiveram um crescimento médio bem mais lento (0,6% ao ano), enquanto o consumo de energia primária pelo setor industrial nos países que formam a antiga União Soviética, a Europa Oriental e Central na verdade diminuiu a uma taxa média de 0,4% ao ano.

O consumo industrial de energia em um país ou região específica é ditado pelo nível de produção de *commodities*, pelo tipo de *commodities* produzido e pela eficiência energética das instalações de produção de cada uma. Historicamente, a eficiência energética deste setor está intimamente ligada à eficiência industrial geral (o Japão talvez seja um notável exemplo de país que atingiu altos níveis de eficiência industrial em parte por utilizar a energia de forma muito eficiente). Em geral, a produção de *commodities* energo-intensivas como ferro, aço e cimento vem diminuindo ou está estável na maioria dos países industrializados e está aumentando na maioria dos países em desenvolvimento, onde infraestrutura e habitação estão sendo implementados rapidamente. Por exemplo, entre 1995 e 2005, a produção de aço diminuiu a uma taxa média anual de 0,3% nos Estados Unidos, ao passo que cresceu a uma taxa anual de 1,0% no Japão e 14% na China (USGS, 2006).

A quantidade de energia consumida para produzir uma unidade de *commodity* é determinada pelos tipos de processo de produção utilizados, pela qualidade do equipamento e pela eficiência dos vários processos de conversão dentro da cadeia produtiva, que por sua vez depende de uma série de fatores, inclusive condições de operação. A intensidade energética industrial varia entre diferentes tipos de *commodities*, instalações individuais e entre diferentes países que dependem desses fatores.

O aço, por exemplo, pode ser produzido utilizando-se minério de ferro ou fragmentos de aço. A melhor prática de intensidade energética para produzir bobina de aço laminada a quente a partir de minério de ferro é de 19,5 gigajoules por tonelada, enquanto a produção do mesmo produto a partir de fragmentos de aço só necessita de 4,3 gigajoules por tonelada

(Worrell et al., 2007). A intensidade energética da indústria de aço chinesa diminuiu entre os anos de 1990 e 2000, apesar de um aumento na parcela de produção de aço primário, indicando que as eficiências de produção aumentaram à medida que instalações pequenas, antigas e ineficientes foram fechadas ou modernizadas e novas instalações foram construídas. No futuro, a produção chinesa de aço pode continuar a se tornar mais eficiente desde que os produtores chineses adotem tecnologias avançadas de fundição, altos-fornos modernos, injeção de carvão pulverizado e melhor recuperação de calor perdido.

Na indústria de cimento indiana, a substituição de fornos de via úmida ineficientes por fornos de via semisseca e seca mais eficientes, juntamente com a adoção de equipamentos e práticas menos energo-intensivos, produziu ganhos significativos em eficiência (Sathaye et al., 2005). Da mesma forma, a intensidade energética da produção de amônia em plantas atuais avançadas diminuiu mais de 50%. Os países em desenvolvimento agora produzem quase 60% do fertilizante de nitrogênio mundial; muitas das plantas de fertilizantes mais recentes construídas nesses países são altamente energo-eficientes.

### *Eficiência energética potencial no setor industrial*

Produtores industriais, especialmente os envolvidos em atividades energo-intensivas, encontram maiores incentivos para melhorar a eficiência e reduzir o consumo de energia do que usuários finais nos setores prediais ou de transporte. Agentes importantes incluem a pressão competitiva para minimizar custos totais de produção, o desejo de ficar menos vulneráveis aos preços altos e voláteis da energia, a necessidade de atender a exigências de regulamentação ambiental e a crescente demanda de consumidores por produtos mais ambientalmente corretos.

Oportunidades de melhoria de eficiência energética industrial são encontrados por todo este diversificado setor (deBeer et al., 2001). No nível de instalações, motores e sistemas de bombeamento mais eficientes normalmente reduzem o consumo de energia de 15% a 20%, frequen-



temente com períodos simples de amortização de cerca de dois anos e taxas internas de retorno de aproximadamente 45%. Estima-se que o uso de sistemas movidos a motor de alta eficiência, combinados a avanços nos sistemas existentes, poderia reduzir o uso de eletricidade em sistemas movidos a motor na União Europeia em 30% (De Keulenaer, 2004), enquanto a otimização de sistemas de ar comprimido pode resultar em melhorias de 20% a 50% (McKane e Medaris, 2003). Avaliações da fabricação de aço, cimento e papel nos Estados Unidos depararam-se com economias custo-efetivas de 16% a 18% (Worrell et al., 2001); economias ainda maiores podem ser alcançadas em países em desenvolvimento, onde tecnologias antigas e ineficientes são mais prevalentes (WEC, 2004). Uma avaliação separada do potencial tecnológico para avanços em eficiência energética na indústria siderúrgica descobriu que economias de energia de 24% pode ser alcançadas até 2010 com o uso de tecnologias avançadas, mas já disponíveis como *smelt reduction* e *near net shape casting* (de Beer et al., 2000).

Além do potencial existente, com base nos avanços atualmente disponíveis, tecnologias novas e emergentes para o setor industrial são constantemente desenvolvidas, demonstradas e adotadas. Exemplos de tecnologias emergentes que podem produzir mais avanços em eficiência incluem ferro esponja e *near net shape casting* do aço, membranas de separação, gaseificação de licor negro e cogeração avançada. Uma recente avaliação de 50 tecnologias emergentes como essas – aplicáveis a indústrias tão diversas quanto refinamento de petróleo, processamento de alimentos, mineração, fabricação de vidro e produção de produtos químicos, alumínio, cerâmica, aço e papel – revelou que mais da metade das tecnologias prometiam altas economias de energia, muitas com períodos de amortização simples de três anos ou menos (Martin et al., 2000). Uma outra análise de eficiência potencial de longo prazo de tecnologias emergentes encontrou economias potenciais de até 35% na siderurgia e de 75% a 90% na fabricação de papel em um horizonte de tempo mais longo (de Beer, 1998; e de Beer et al., 1998).

Num sinal animador do potencial para maiores ganhos em eficiência no setor industrial, algumas empresas que efetivamente implementaram

avanços tecnológicos e reduziram seus custos de energia estão criando novas linhas de negócio em que se associam a outras empresas energo-intensivas para disseminar essa habilidade.

### *Políticas para promover eficiência energética no setor industrial*

Entre as barreiras para uma maior eficiência, algumas de particular importância no setor industrial são as barreiras de investimento e rentabilidade, informação e custos de transação, falta de pessoal especializado e lenta circulação de capital. A tendência de muitas empresas a acreditarem que já estão operando com a máxima eficiência possível pode se constituir em outra barreira: uma pesquisa com 300 firmas dos Países Baixos, por exemplo, revelou que a maioria se via como energo-eficiente, mesmo quando havia avanços rentáveis disponíveis (Velthuisen, 1995). Incertezas relacionadas aos preços da energia ou disponibilidade de capital são outro impedimento comum – normalmente resultam da aplicação de critérios rigorosos e altas taxas de mínimo retorno para investimentos em eficiência energética. O racionamento de capital frequentemente é utilizado em empresas como meio de alocação para investimentos, especialmente para pequenos investimentos como muitos aperfeiçoamentos de eficiência energética. Essas dificuldades se combinam à taxa de circulação relativamente lenta de capital no setor industrial e a uma forte aversão aos riscos percebidos associados a novas tecnologias, especialmente quando esses riscos podem afetar a confiabilidade e a qualidade do produto.

Muitas políticas e programas foram desenvolvidos e implementados visando à melhoria da eficiência energética industrial (Galitsky et al., 2004). Quase todos os países industrializados buscam tratar das barreiras informacionais através de uma combinação de auditoria de plantas específicas ou de relatórios de avaliação, busca de melhores práticas, estudos de caso, relatórios de atividades e manuais, além de ferramentas e *softwares* relativos à energia. O Departamento de Energia dos Estados Unidos fornece relatórios de avaliação confidenciais através de seus Centros de Avaliação Industrial para pequenas instalações industriais e introduziu um Programa

de Avaliação de Economias de Energia que fornece avaliações grátis para 200 das instalações fabris mais energo-intensivas do país (Usdoe, 2006).

A busca de melhores práticas fornece um meio de comparar o uso de energia de uma empresa ou planta ao de outras instalações semelhantes, que produzam produtos semelhantes. Essa abordagem pode ser utilizada para comparar plantas, processos ou sistemas; também pode ser aplicada a uma classe de equipamentos ou eletrodomésticos, como acontece com o Programa Campeão no Japão (Quadro 2.1). Os Países Baixos estabeleceram “convênios de *benchmarking* (*busca de melhores práticas*)” negociados, sob os quais as empresas participantes concordam em atingir as metas de desempenho que as situariam entre as 10% das plantas mais eficientes do mundo ou torná-las comparáveis a uma das três regiões produtoras mais eficientes do mundo (onde regiões são definidas como áreas geográficas com uma capacidade de produção semelhante à dos Países Baixos). Em troca, as empresas participantes ficam isentas de outras regulamentações governamentais relativas a consumo de energia ou emissões de dióxido de carbono. Adicionalmente, o governo holandês exige que as empresas que ainda não atingiram o nível dos 10% mais eficientes (ou das três empresas mais eficientes regionalmente) até 2006 implementem todas as medidas de conservação de energia economicamente viáveis até 2012, definidas como medidas que gerem economias suficientes para cobrir os custos do capital tomados em empréstimo (Ministério de Assuntos Econômicos, 1999).

O *estabelecimento de metas*, onde governos, setores industriais ou empresas individuais estabeleçam metas abrangentes de eficiência energética ou de redução de emissões, pode fornecer uma valiosa estrutura para relatar o consumo de energia e empreender avanços em eficiência. O governo chinês, por exemplo, recentemente editou uma política que visa reduzir a intensidade energética daquele país (consumo de energia de toda a economia por unidade de GDP) em 20% nos próximos cinco anos. A política inclui quotas de economia de energia para governos locais. Para as empresas, os governos podem oferecer incentivos financeiros, informação de apoio, recompensas, publicidade e dispensa de outros impostos ou obrigações ambientais em troca do atingimento de certas metas. Onde essa

abordagem foi utilizada, o progresso em direção às metas negociadas é monitorado com rigor e relatado publicamente, normalmente com base anual. No Reino Unido, por exemplo, indústrias energo-intensivas negociaram Acordos de Mudança Climática com o governo. A recompensa por atingir as metas acordadas é um desconto de 80% em impostos sobre energia. Durante o primeiro período de metas para este programa (2001–2002), as reduções totais realizadas foram três vezes mais altas do que a meta (Pender, 2004); durante o segundo período de metas, as reduções médias ultrapassaram o dobro das metas (Defra, 2005). Com frequência, as empresas se saíram melhor do que o esperado, em parte porque as metas negociadas normalmente refletiam a crença de que já eram energo-eficientes (Defra, 2004). Por fim, uma série de grandes corporações multinacionais recentemente empreendeu iniciativas voluntárias ambiciosas para melhorar a eficiência energética e reduzir emissões de gases de efeito estufa.

Muitos países fornecem *assistência para gerenciamento de energia* apoiando sistemas padronizados de gerenciamento de energia, materiais promocionais, especialistas da indústria, programas de treinamento e algum tipo de assistência para verificação e validação para empresas interessadas em rastrear e relatar uso de energia e/ou emissões de gases de efeito estufa. Incentivos também podem ser dados em forma de programas de recompensa e de reconhecimento. Padrões de eficiência podem ser efetivamente aplicados a certos tipos de equipamentos padronizados amplamente utilizados em todo o setor industrial.

Políticas fiscais – como auxílios ou subsídios para investimentos em eficiência, auditorias subsidiadas, empréstimos e desconto de impostos – são usados em muitos países para promover investimentos em eficiência energética no setor industrial. Em todo o mundo, a abordagem mais popular envolve programas de auditoria subsidiados. Apesar de os empréstimos públicos serem menos populares do que subsídios diretos para eficiência energética, mecanismos inovadores de financiamento como os que podem ser fornecidos através de empresa de serviços de energia, fundos de fiança, fundos rotativos e fundos de capital de risco têm popularidade crescente. Da mesma forma, muitos países oferecem descontos de impos-

tos na forma de depreciação acelerada, reduções e isenção de impostos para promover avanços em eficiência. Em geral, mecanismos de incentivo financeiro devem evitar o subsídio a tecnologias que já são rentáveis. Subsídios contínuos podem se justificar em alguns casos, no entanto, para se atingir as economias de escala necessárias para tornar as tecnologias sustentáveis financeiramente viáveis num contexto de país em desenvolvimento.

## 2.5 Transporte e eficiência energética

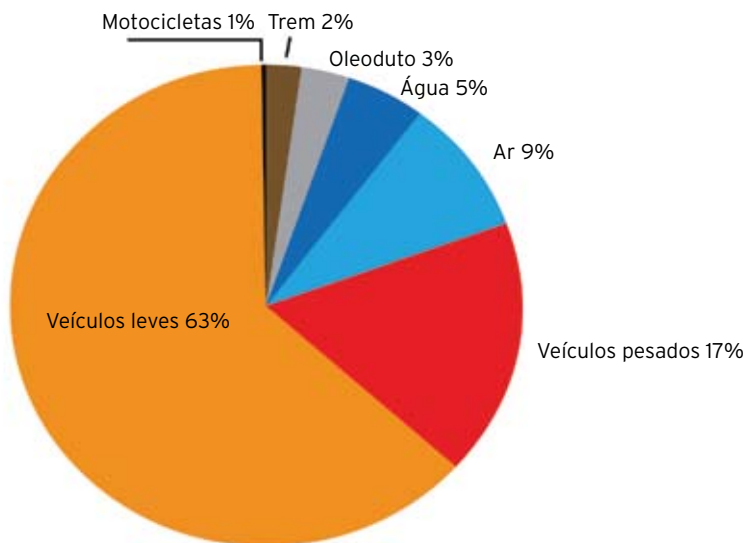
O setor de transporte responde por 22% do uso global de energia e 27% das emissões globais de carbono. Nos países industrializados que mais consomem energia (especificamente os 11 países da IEA com mais alto consumo de energia), quase toda (96%) a energia de transporte provém de combustíveis de petróleo, como gasolina (47%) e diesel (31%). Veículos de rodagem respondem por cerca de três quartos de todo o uso de energia em transporte; aproximadamente dois terços da energia de transporte é utilizada para a mobilidade de passageiros, enquanto um terço é utilizada para deslocamento de mercadorias (Price et al., 2006).

### *Tendências de consumo de energia no setor de transportes*

O uso de energia em transportes cresceu consideravelmente mais rapidamente em países em desenvolvimento do que em países industrializados nas últimas três décadas – a taxa média anual de crescimento no período de 1971 a 2002 foi de 4,8% para países em desenvolvimento e 2% para países industrializados. Em termos absolutos, no entanto, países industrializados ainda consomem cerca de duas vezes mais energia (56 exajoules) em transporte do que países em desenvolvimento (26 exajoules).

O consumo de energia em transportes em um país ou região específicos é guiado pela quantidade de viagens de passageiros e de merca-

**Figura 2.5** Consumo de energia por transportes nos Estados Unidos, por meio, 2005



Obs.: O consumo total de energia com transportes nos Estados Unidos em 2005 foi de 27.385 trilhões de BTUs

Fonte: Davis e Diegel, 2006.

dorias, pela distribuição de viagens entre os vários meios de transporte e pela eficiência energética de veículos individuais ou meios de transporte. A Figura 2.5 mostra a distribuição do uso de energia por meio de transporte nos Estados Unidos e ilustra a predominância de veículos leves (incluindo automóveis, utilitários esportivos, caminhonetes, minivans, e peruas) em termos de consumo geral de energia. Padrões semelhantes são obtidos em outros países, apesar de um número maior de veículos leves da Europa rodarem a diesel<sup>23</sup>.

23. Isso acontece, em parte, porque as regulamentações ambientais da UE permitem maiores emissões de escape de óxidos de nitrogênio; motores a diesel são mais eficientes do que motores de combustão interna a gasolina, mas geralmente produzem maiores emissões de óxido de nitrogênio.

## *Potencial de eficiência energética no setor de transportes*

A demanda global por serviços de transporte em geral e viagens com veículo particular especificamente pode ser influenciada por padrões de desenvolvimento e planejamento do uso do solo, bem como pela disponibilidade de transporte público, custos de combustível, políticas governamentais (inclusive taxas de pedágio urbano, estacionamento e pedágio de estradas) e outros fatores. Diferentes meios de transporte também apresentam diferentes características energéticas e de emissões – como um meio de transportar mercadoria, por exemplo, o transporte ferroviário é dez vezes mais energo-eficiente por quilômetro do que o transporte rodoviário. Algumas das opções de políticas disponíveis para avançar nos objetivos de sustentabilidade no setor de transporte são politicamente difíceis de aprovar, enquanto outros (especialmente o planejamento de uso do solo) são difíceis de apresentar resultados, exceto no decorrer de longos períodos de tempo – apesar de oportunidades substanciais poderem existir em países em desenvolvimento em que um novo desenvolvimento está ocorrendo em ritmo acelerado e os padrões de uso do solo ainda não são severamente determinados pela infraestrutura existente. Várias estratégias para reduzir a demanda de viagens serão discutidas em termos gerais na próxima seção.

Para os veículos individuais, três tipos de abordagem podem ser usados para reduzir o consumo de energia.<sup>24</sup> O primeiro é reduzir a carga sobre o motor, assim reduzindo a quantidade de energia necessária para mover o veículo. O segundo é aumentar a eficiência do sistema de direção e capturar perdas de energia (especialmente na frenagem). O terceiro é aumentar o fator de carga do motor – isto é, a quantidade de tempo em que o motor opera próximo de sua produção de potência nominal ou máxima para uma determinada velocidade. Se o objetivo primário é reduzir

---

24. Note-se que mudanças na operação ou manutenção de veículos, como dirigir em baixa velocidade ou manter os pneus adequadamente calibrados, também podem ajudar a reduzir o consumo de energia. Essas abordagens, uma vez que não podem ser embutidas no projeto do veículo e ficam sob a responsabilidade do operador, não são discutidas nesse relatório. No entanto, existem oportunidades para os governos influenciarem certas normas de operação através de políticas (exemplo, limites menores de velocidade).

emissões de gases de efeito estufa, então uma quarta abordagem (além do aumento de eficiência) é mudar para um combustível menos carbono-intensivo. (As opções de combustíveis alternativos podem incluir eletricidade ou biocombustíveis; esta última é discutida em uma seção posterior deste relatório.)

Para veículos de rodagem, a carga sobre o motor pode ser minimizada reduzindo-se a massa do veículo, resistência aerodinâmica e resistência do pneu ao rolamento. Reduções de massa podem ser atingidas substituindo-se o aço convencional das carrocerias e dos motores dos veículos por materiais igualmente resistentes, mas significativamente mais leves. Uma redução de 10% no peso do veículo pode melhorar a economia de combustível em 4% a 8%. O uso crescente de materiais leves, porém resistentes, como aço de alta resistência, alumínio, magnésio, e plásticos reforçados com fibras, pode produzir reduções substanciais de peso sem comprometer a segurança do veículo. Esses materiais avançados já estão sendo utilizados em veículos de rodagem; seu uso é crescente, mas geralmente custam mais do que os materiais convencionais. Motores menores, capazes de operar com altas rotações por minuto ou com turbocompressor para potência adicional, também podem ser utilizados, bem como transmissões menores e mais leves. A resistência aerodinâmica pode ser reduzida através de projeto de carroceria mais aerodinamicamente eficiente, mas também pode introduzir compensações em termos de estabilidade em ventos cruzados. Tecnologias que desligam o motor quando inativo também podem produzir economia de energia.

Algumas tecnologias, tanto comercialmente disponíveis quanto em desenvolvimento, podem ser utilizadas para aumentar a eficiência do sistema de direção de veículos de rodagem. Alguns exemplos são o comando de múltiplas válvulas no cabeçote, elevação e distribuição de tempos de válvula variáveis, válvula borboleta eletromecânica, acionamento de válvula sem came, desativação de cilindros, motores com taxa de compressão variável, transmissões continuamente variáveis e lubrificantes de baixa fricção. Adicionalmente, novos tipos de sistemas de direção altamente eficientes – tais como motores com injeção direta de gasolina e diesel e veículos híbridos elétricos – estão sendo produzidos.



Vários estudos estimaram o aumento potencial geral de economia de combustível que pode ser atingido com o uso de múltiplas tecnologias em veículos leves. Essas estimativas vão de 25% a 33% de aumento em economia de combustível sem custo adicional (NRC, 2002) até 61% de aumento em economia de combustível utilizando tecnologia híbrida paralela a um custo adicional do veículo de 20% (Owen e Gordon, 2003).

Veículos híbridos elétricos que utilizem tanto um motor de combustão interna convencional quanto um motor elétrico no sistema de direção têm um potencial imediato de reduzir o uso de energia de transporte, principalmente por desligar o motor quando estiver inativo, recuperando as perdas de frenagem para recarregar a bateria, e permitindo que o motor seja menor pela suplementação de potência elétrica durante a aceleração. Nos Estados Unidos, o mercado de veículos híbridos cresceu rapidamente nos últimos anos: o número de veículos híbridos vendidos mais do que dobrou entre 2004 e 2005 e cresceu mais 28% entre 2005 e 2006.<sup>25</sup>

Na produção atual de híbridos, as baterias são carregadas diretamente a partir do motor do veículo e da frenagem regenerativa. Os híbridos “*plug-in*” também podem ser carregados na rede elétrica, reduzindo ainda mais o uso de petróleo (especialmente se os veículos forem utilizados para pequenas distâncias). Esses veículos exigiriam uma bateria maior e tempos mais longos de recarga. Combinar essa tecnologia com meios limpos de produção de eletricidade com baixa emissão de carbono também pode produzir benefícios ambientais substanciais. A ampla comercialização de híbridos “*plug-in*” dependeria do desenvolvimento de baterias econômicas que pudessem suportar milhares de descargas profundas sem considerável perda de capacidade de armazenagem de energia. Também pode depender do fato de os padrões de recarga de bateria na rede elétrica exi-

---

25. Em 2000, pouco menos de 7 800 veículos híbridos foram vendidos nos Estados Unidos; até 2006, as vendas atingiram mais de 254 500. No entanto, 1,5% de venda de veículos híbridos em 2006 ainda constitui uma parcela mínima do mercado de veículos dos EUA. A Toyota Motor Company é responsável pela maioria dos veículos híbridos vendidos nesse país (R. L. Polk & Co., 2007).

girem uma expansão substancial da capacidade de geração de eletricidade disponível.

Dentro de um período mais longo, reduções substanciais no consumo de petróleo e nas emissões convencionais de poluentes, juntamente com emissões de carbono próximas de zero, podem potencialmente ser atingidas com veículos de células combustíveis de hidrogênio. Em geral, os benefícios ambientais específicos dessa tecnologia dependerão de como o hidrogênio é produzido: se grande parte do objetivo é ajudar a enfrentar os riscos de mudanças climáticas, o hidrogênio terá de ser produzido com recursos de baixa emissão de carbono, ou – caso sejam usadas fontes fósseis – em combinação com a captura e sequestro de carbono. Enquanto isso, estudos recentes concluem que várias barreiras tecnológicas significativas terão de ser transpostas antes que veículos a célula combustível de hidrogênio sejam viáveis em grandes quantidades. As principais entre essas barreiras são a durabilidade e o custo da célula combustível, o custo para a produção de hidrogênio, o custo e a dificuldade de desenvolver uma nova infraestrutura de distribuição para lidar com um combustível gasoso para transporte e o desafio de desenvolver sistemas de armazenagem de hidrogênio no veículo (NRC/NAE, 2004; TMC/MIRI, 2004). Em um esforço para começar a demonstrar a tecnologia do hidrogênio, a Daimler Chrysler desenvolveu uma frota de ônibus a célula combustível de hidrogênio atualmente em uso em várias cidades do mundo.

Motocicletas e lambretas de duas e três rodas já são relativamente eficientes se comparadas aos carros, mas em áreas urbanas, onde motores de dois tempos são intensamente utilizados, contribuem significativamente para a poluição do ar. Emissões de poluentes convencionais dessa categoria de veículos de transporte podem ser reduzidas substancialmente e pode-se conseguir maior eficiência com algum tipo de tecnologia de motores desenvolvidos para veículos leves. A Honda estima que um protótipo de lambreta híbrido-elétrico pode reduzir o uso de energia em cerca de 30% no para e anda do trânsito, ao mesmo tempo em que produz reduções ainda maiores nas emissões de poluentes convencionais (Honda, 2004).

A principal oportunidade para reduzir o consumo de energia-cami-

nhões a diesel é através de avanços na carroceria para reduzir a resistência aerodinâmica. As tecnologias de sistema de direção elétrico ou híbrido elétrico não são consideradas práticas para aplicações em veículos pesados, mas as células combustíveis podem bem ser. No entanto, sistemas híbridos-elétricos são bastante adequados para o trânsito para e anda de ônibus e veículos de entrega em áreas urbanas; estudos revelam que avanços em economia de combustível entre 10% (Foyt, 2005) e 57% (Chandler et al., 2006) poderiam ser atingidos com o uso da tecnologia híbrida para essas aplicações.

Para motores ferroviários, foram feitos avanços na redução da resistência aerodinâmica e do peso e no desenvolvimento de freios regenerativos (nas laterais dos trilhos ou a bordo) e motores de eficiência mais alta. Um relatório japonês de 1993 ilustra como um trem com uma carroceria de aço inoxidável, controle de inversor, e sistema de frenagem regenerativa pode cortar o uso de eletricidade pela metade em comparação com um trem convencional (JREast Group, 2003). Energias alternativas também são uma possibilidade para viagens de trem.

As aeronaves atuais apresentam 70% mais de eficiência de uso de combustível por passageiro-quilômetro do que as aeronaves de 40 anos atrás; a maior parte deste avanço veio com o aumento da capacidade de passageiros, mas ganhos também foram obtidos com redução de peso e tecnologia avançada de motor. Opções para reduzir ainda mais o uso de energia na aviação inclui tecnologia de fluxo laminar e configuração BWB,<sup>26</sup> que diminuem a resistência do ar, permitem maiores avanços no motor e reduções de peso. A fabricante de aviões Boeing afirma que a nova família de aeronaves 787 atingirá um avanço de 20% em economia de combustível, em parte através do uso extensivo de materiais compostos (Boeing, 2007). Outras opções de prazo mais longo incluem aeronaves maiores, uso de combustíveis não convencionais ou combinações e novos motores a combustível de hidrogênio líquido.

---

26. *Blended wing body* (asa unida ao corpo do avião) é um desenho avançado de corpo de avião que combina asas com elevado índice de sustentação aerodinâmica com corpo em forma de aerofólio. Esse desenho permite que o corpo do avião contribua com a ascensão, melhorando, dessa forma, a economia de combustível.

Obviamente, a eficiência geral do transporte rodoviário, aéreo e ferroviário também depende, em grande parte, da utilização de maior proporção de ocupação em ônibus, trens e aviões, resultando em menor consumo de energia ou menores emissões por passageiro-quilômetro.

Opções de tecnologia para reduzir o uso de energia na indústria de navegação inclui avanços hidrodinâmicos e de maquinário; essas tecnologias poderiam reduzir de 5% a 30% o uso de energia em novos navios e de 4% a 20% com a modernização de antigos navios. Uma vez que os motores navais têm uma vida média de 30 anos ou mais, a introdução de novas tecnologias de motor ocorrerão gradualmente. Uma combinação de otimização de frota e de mudanças de rotas pode produzir economias de energia no curto prazo; a redução da velocidade do navio também produziria esse efeito, mas pode não ser uma opção realista, dadas outras considerações. Estima-se que a intensidade energética naval média poderia ser reduzida em 18% em 2010 e em 28% em 2020 primariamente através de velocidade reduzida e depois com novas tecnologias. Esse avanço não seria suficiente, no entanto, para superar o uso adicional de energia do crescimento projetado da demanda (estima-se que o frete marítimo aumente 72% até 2020). Balsas no interior e navios de suprimento em alto mar na Noruega estão utilizando gás natural em motores navais a diesel e obtendo uma redução de 20% no uso de energia, mas esta opção é limitada pelo acesso ao gás natural liquefeito e seu custo. Onde há disponibilidade de gás natural e especialmente onde o gás seria incinerado de outra forma, o uso de gás natural liquefeito como combustível naval pode resultar em reduções significativas de emissões. Velas grandes, painéis solares e células combustíveis de hidrogênio são opções de potencial de longo prazo (2050) para reduzir uso de energia e emissões de carbono relativas a navios.

### *Políticas para promover eficiência energética no setor de transportes*

Os mecanismos de políticas primárias disponíveis para promover eficiência energética em transportes inclui novos padrões veiculares, impos-

tos sobre combustível e incentivos econômicos, restrições operacionais e planejamento do uso do solo.

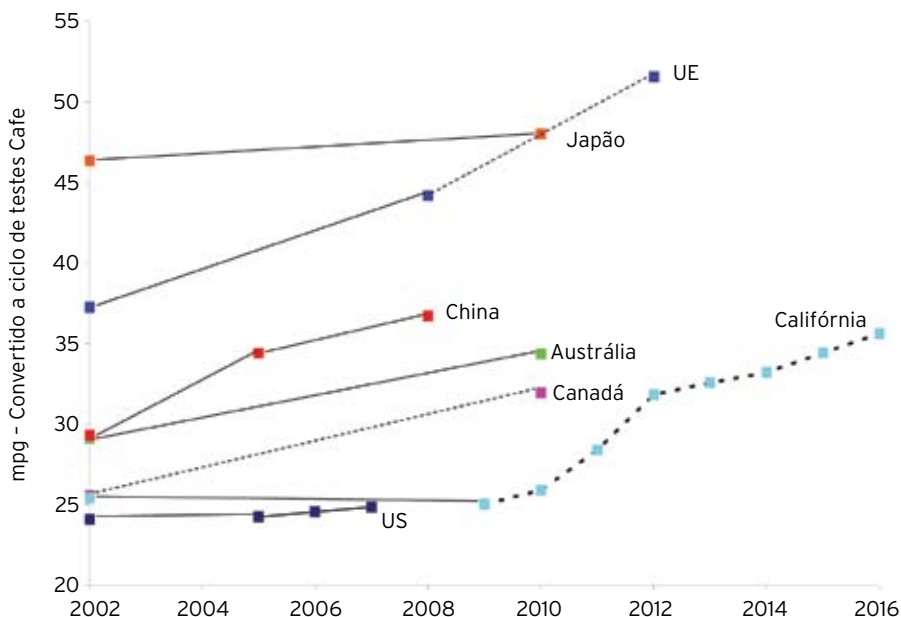
Muitos países atualmente têm padrões de eficiência para novos veículos leves, normalmente em forma de padrões de desempenho que são aplicados à eficiência média (ou economia de combustível) da frota de um fabricante (Figura 2.6). Essa flexibilidade permite aos fabricantes oferecer modelos com uma série de características de economia de combustível. A introdução de padrões de economia de combustível no final da década de 1970 levou a ganhos substanciais em eficiência na frota de automóveis dos EUA durante a década de 1980, mas provou-se ser politicamente difícil aumentar os padrões ao longo do tempo para refletir os avanços em tecnologia veicular. Na verdade, os padrões de economia de combustível nos Estados Unidos permanecem praticamente inalterados há duas décadas. Enquanto isso, a crescente parcela de mercado de minivans, utilitários esportivos e caminhonetes – que lá são designados como caminhões leves e, portanto, estão sujeitos a um padrão consideravelmente mais baixo de média de frota – de fato já produziu uma queda no padrão efetivo de economia de combustível para automóveis nos Estados Unidos desde os anos 1980.<sup>27</sup> Por fim, uma vez que tais padrões geralmente se aplicam somente a veículos novos e a vida média de um automóvel é de 13 anos (a vida média de grandes motores diesel é ainda maior), há uma defasagem de tempo substancial entre a adoção de padrões e avanços mensuráveis de eficiência da frota em geral.

Algumas jurisdições regulam as emissões de caminhões pesados e outras possuem padrões prescriptivos que exigem motores de quatro tempos em motocicletas, veículos para locomoção na neve ou veículo aquático de recreio. No entanto, esses padrões visam emissões de poluentes convencionais em vez de reduzir o uso de combustíveis ou emissões de carbono. Nenhum país possui padrões para economia de combustíveis em aeronaves, embarcações ou locomotivas, apesar de alguns desenvolverem pa-

---

27. O padrão médio de economia de combustível para caminhonetes nos EUA permaneceu abaixo de 21 milhas por galão durante os anos 1990; recentemente foi elevado e assim um padrão de 22,2 milhas por galão passa a vigorar em 2007.

**Figura 2.6** Comparação entre padrões de eficiência de combustível automotor por economia de combustível automotor entre países, normalizados a procedimento de teste dos Estados Unidos



Obs.: o eixo Y mostra a milhagem por galão (mpg) de acordo com os padrões de Corporate Average Fuel Economy (Cafe) [1 mpg equivale a 0,425 quilômetro por litro]. As linhas pontilhadas denotam os padrões propostos. O Japão recentemente anunciou que deseja implementar padrões ainda mais rígidos, que o colocariam em igualdade com a UE a partir de 2014 (An et al., 2007).

Fonte: An e Sauer, 2004.

drões que limitam as emissões de poluentes de outros que não o carbono. Em alguns casos, reduções significativas de emissões e consumo de energia podem ser atingidos simplesmente através da troca de meio (exemplo, transporte de mercadorias por trem em vez de por caminhões).

Os impostos sobre combustíveis dão aos operadores um incentivo econômico adicional para reduzir o uso de energia. Em muitos aspectos, preferem-se os impostos sobre combustíveis a padrões de eficiência. Os impostos se aplicam imediatamente a veículos novos e antigos, abrangendo todos os meios de transporte. Também proporcionam aos consumi-

dores grande flexibilidade de ação, pois podem optar por veículos mais eficientes ou modificar seus padrões de viagens, ou ambos. Vários estados membros da UE impuseram pesados impostos sobre a gasolina durante décadas, enquanto nos Estados Unidos tem sido muito difícil implementar esses impostos. Apesar de os impostos sobre combustíveis possuírem muitas vantagens teóricas de ponto de vista de eficiência econômica, a experiência até agora sugere que eles têm de ser bastante altos (dada a inelasticidade relativa de preço de demanda de viagem e o fato de que os custos dos combustíveis normalmente representam uma pequena fração das despesas relacionadas a transporte) para produzir mudanças significativas sobre as escolhas de transporte pelos consumidores ou padrões de consumo de combustível.

*Feebates* (programas visando modificar os hábitos de compra nos setores de transporte e energia) foram propostos nos Estados Unidos (e para atingir outras metas ambientais em outros países) como uma alternativa política para superar os obstáculos políticos associados a padrões de economia de combustível e impostos sobre combustíveis. Impostos seriam cobrados nas vendas de veículos com pouca economia de combustível, ao passo que descontos seriam dados na venda de veículos com alta economia de combustível. A maioria das propostas é neutra em receitas (isto é, o desembolso total com descontos cobriria as receitas totais com os impostos). Apesar de *feebates* haverem sido propostos em várias jurisdições dos Estados Unidos, nunca entraram em vigor.

Uma outra proposta para promover a eficiência de veículos leves é transferir os custos fixos do veículo – tais como seguro contra terceiros, taxas de registro, e taxas de controle de emissões veiculares – para custos variáveis com base no número de quilômetros rodados ao ano. Uma política assim proporcionaria incentivos diretos para que motoristas reduzissem a quilometragem rodada e poderia resultar em reduções de congestionamentos urbanos e poluição do ar, bem como do uso de energia. Até agora, no entanto, nenhuma jurisdição adotou essa estratégia, apesar de os Países Baixos pretenderem introduzir um sistema como esse em 2007/2008.

Uma abordagem mais rígida para gerenciar a demanda de transporte é impor restrições sobre onde e quando os veículos podem cir-

cular. Uma forma mais branda dessa abordagem envolve a restrição do uso de certas faixas de rodagem para veículos com pelo menos dois ou três ocupantes durante os horários de pico. Uma outra opção que pode ser viável em alguns contextos é o “pedágio urbano”, onde tarifas diferentes são cobradas pelo uso da rua em diferentes horários do dia. A renda do pedágio urbano, por sua vez, pode ser utilizada para subsidiar o transporte de massa. Várias cidades já impuseram restrições mais rígidas para o centro das cidades, principalmente como meio de reduzir o congestionamento e emissões de poluentes que causam neblina concentrada. Cingapura foi a primeira grande cidade a impor limites a automóveis em seu bairro central de negócios, exigindo que os automóveis adquiram e exibam permissão especial para entrar na área durante o horário comercial. Este programa, combinado a um excelente sistema de metrô, tem sido bem-sucedido na redução de congestionamentos. Um programa mais recente foi implementado na cidade de Londres. É semelhante à abordagem pilotada em Cingapura e tem tido bons resultados: estima-se que 18% de redução de tráfego na região resultaram em uma redução de 30% no congestionamento, uma redução de 20% em emissões de dióxido de carbono, e reduções de 16% em emissões de óxido de nitrogênio e de material particulado (Transport for London, 2005).

Mudanças no planejamento do uso do solo representam uma opção de política de longo prazo que, no entanto, pode ter um impacto significativo sobre o consumo de energia. Políticas de zoneamento e desenvolvimento que estimulem áreas de alta densidade habitacional e áreas residenciais, de comércio varejista e de negócios bem mescladas podem reduzir consideravelmente o número e as distâncias das viagens feitas em veículos particulares. Tais políticas também ajudam a garantir que o desenvolvimento futuro seja mais receptivo para meios de transporte mais eficientes ou ambientalmente corretos, como transporte público, uso de bicicletas, ou mesmo caminhar. O transporte público pode contribuir significativamente para atingir objetivos energéticos e ambientais (ao mesmo tempo que reduz congestionamentos, poluição do ar urbana e aumenta a mobilidade de cidadãos de baixa renda e de idosos) desde que a frequência



em ônibus e trens seja consistentemente alta. Mais uma vez, o desenvolvimento denso e bem diversificado é fundamental.

## 2.6 Pontos principais

A intensidade energética das economias industrializadas e em desenvolvimento no mundo – em termos de energia total consumida por unidade de produto econômico – vem diminuindo gradualmente nas últimas décadas, uma vez que a tecnologia evoluiu e que uma parcela maior da riqueza provém de atividades menos energo-intensivas. Consideradas em conjunto, no entanto, essas quedas de intensidade não têm sido suficientes para compensar aumentos populacionais nem o crescimento econômico; o consumo total de energia vem crescendo paulatinamente – em quase todas as nações e no mundo como um todo. Além disso, apesar da evidência de o potencial tecnológico para maiores reduções de intensidade energética ser imenso, há evidências de que as intensidades individuais dos países estão convergindo ao longo do tempo e podem, na ausência de outras políticas públicas, interromper o declínio do ritmo das últimas décadas. Alguns especialistas alertam que os crescentes padrões materiais de vida, em algum ponto e em alguns casos, podem começar a reverter diminuições ocorridas com implicações potencialmente sérias para o prospecto de se atingir metas globais de sustentabilidade no longo prazo.

Dado o potencial tecnológico significativo que existe para atingir reduções de intensidade maiores e mais custo-efetivas e dada a importância crucial de aliviar as tensões existentes e projetadas sobre os sistemas energéticos de todo o mundo, justifica-se uma ação de política conjunta para maximizar a contribuição de opções pelo lado da demanda juntamente com soluções pelo lado do fornecimento.

- **Os governos devem buscar, agressivamente, oportunidades custo-efetivas para melhorar a eficiência energética e reduzir a intensidade energética em todas as suas economias.** Políticas que provaram ser altamente efetivas em diferentes contextos e que devem

ser consideradas incluem padrões de eficiência de eletrodomésticos e equipamentos, inclusive padrões de economia de combustível veicular; códigos construtivos; mecanismos financeiros (por exemplo, impostos sobre combustíveis, incentivos fiscais por investimentos em eficiência e *feebates*); programas de informação e assistência técnica, incluindo selos para produtos de consumo e programas de auditoria de energia; políticas de aquisição; apoio para programas de concessionárias, incluindo reformas regulatórias de habilitação, quando aplicáveis; e apoio para pesquisa e desenvolvimento relativos à eficiência. É essencial que haja capital de baixo custo e outros incentivos financeiros para promover a inovação e a implementação de avanços de eficiência energética.

- **Facilitar a transferência de tecnologia de países industrializados para países em desenvolvimento é particularmente importante.** A importância da transferência de tecnologia é tamanha que países com infraestrutura em rápida expansão, parque imobiliário, capacidade de fabricação e penetração de aparelhos que utilizem energia podem “saltar” para tecnologias mais eficientes. Oportunidades para aumento de eficiência tendem a ser maiores e mais custo-efetivos quando são incorporados de baixo para cima em vez de em aplicações posteriores de aperfeiçoamento. Garantir que países em desenvolvimento modernizem suas economias da forma mais eficiente possível é crucial para enfrentar os enormes desafios de sustentabilidade que, de outra forma, acompanharão o contínuo crescimento econômico global.
- **A ciência social aplicada, combinada a uma política explícita de experimentação, tem a possibilidade de promover um avanço considerável em nossa compreensão sobre (a) os determinantes da demanda energética, (b) a efetividade de políticas voltadas a facilitar a adoção de tecnologias energéticas eficientes e (c) o papel de avanços em eficiência sobre a moderação de demanda.** Os governos devem apoiar ativamente esse tipo de pesquisa através de

financiamento e, talvez de forma mais importante, possibilitando experimentos com políticas para avaliar a efetividade de programas de eficiência energética.

- **As barreiras para adoção de tecnologias energéticas potencialmente custo-efetivas normalmente surgem da dificuldade de se quantificar efetivamente e de agregar várias pequenas oportunidades de melhoria e, particularmente em edifícios, da necessidade de monitoramento de desempenho, gerenciamento inteligente e integração de diferentes sistemas.** Tecnologias de informação combinadas a sistemas de monitoramento de baixo custo podem superar algumas dessas barreiras, proporcionando economias consistentes de energia para usuários que, de outra forma, seriam inatingíveis sem intervenção especializada. Tais opções devem ser buscadas agressivamente. Além disso, será importante desenvolver modelos de negócios para identificar e implementar avanços de eficiência energética custo-efetivos, talvez partindo da experiência adquirida até agora com empresas de serviços de energia.
  
- **Mesmo que um esforço de P&D deva ser compensado por um esforço de mercado, deve haver uma concentração acelerada sobre o desenvolvimento de tecnologias energo-eficientes nas seguintes áreas:**
  - a) baterias que possam tornar híbridos *plug-in* (recarregáveis em tomada comum) amplamente comerciais (mais resistente a uso intenso) e possam suportar muitos milhares de descargas profundas sem perda de capacidade de armazenagem;
  - b) iluminação por diodo (LED) de baixo custo com um indicador de cores que seja atraente para os consumidores;
  - c) ferramentas para projetar edifícios residenciais e comerciais energo-eficientes; e
  - d) células combustíveis eficientes de baixo custo que possam operar com gás natural para aplicações distintas (residenciais, industriais e comerciais).

## Referências bibliográficas\*

AN, F. et al. **Passenger vehicle greenhouse gas and fuel economy standards: a global update**. Washington, D.C.: International Council on Clean Technology. 2007. Disponível em: <[http://pre2010.theicct.org/documents/ICCT\\_GlobalStandards\\_2007\\_revised.pdf](http://pre2010.theicct.org/documents/ICCT_GlobalStandards_2007_revised.pdf)>.

AN, F.; SAUER, A. **Comparison of passenger vehicle fuel economy and greenhouse gas emission standards around the world**. Arlington, VA: Pew Center on Global Climate Change, 2004. Disponível em: <[http://www.pewclimate.org/docUploads/Fuel%20Economy%20and%20GHG%20Standards\\_010605\\_110719.pdf](http://www.pewclimate.org/docUploads/Fuel%20Economy%20and%20GHG%20Standards_010605_110719.pdf)>.

BEER, J. **Potential for industrial energy-efficiency improvement in the long term**. [S.l.]: Utrecht University, 1998.

BEER, J.; HARNISCH, J.; KERSEMEECKERS, M. **Greenhouse gas emissions from iron and steel production**. Cheltenham, UK: IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2000.

BEER, J.; PHYLIPSEN, D.; BATES, J. **Economic evaluation of carbon dioxide and nitrous oxide emission reductions in industry in the EU**. Brussels: DG Environment; European Commission, 2001.

BEER, J.; WORRELL, BLOK, K. Future technologies for energy efficient iron and steel making. **Annual Review of Energy and Environment**, v. 23, p. 123-205, 1998. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/42774.pdf>>

BOEING. **Boeing 787 Dreamliner will provide new solutions for airlines, passengers**. 2007. Disponível em: <<http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html>>

BRADLEY, R.; YANG, M. **Raising the profile of energy efficiency in China: case study of standby power efficiency**. Paris: International Energy Agency, 2006b. [LTO]/2006/1. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/papers/2006/StandbyPowerChina19Sep06.pdf>>.

CHANDLER, K.; EBERTS, E.; EUDY, L. **New York City transit hybrid and CNG transit buses: interim evaluation results**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, Jan. 2006. [Technical Report NREL/TP-540-38843]. DAVIS, S. C.; DIEGEL, S. W. **Transportation energy data book: edition 25**. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2006. Disponível em: <[http://www.nowandfutures.com/download/transportation\\_energy\\_book\\_TEDB\\_Edition25\\_ORNL\\_6974.pdf](http://www.nowandfutures.com/download/transportation_energy_book_TEDB_Edition25_ORNL_6974.pdf)>. ORNL-6974.

D&R INTERNATIONAL, LTD. **2005 buildings energy data book**. Silver Spring, 2005. Disponível em: <[http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/docs/DataBooks/2005\\_BEDB.pdf](http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/docs/DataBooks/2005_BEDB.pdf)>.

EAST JAPAN RAILWAY COMPANY. **Sustainability report 1993**. Tokyo, 2003. Disponível em: <<http://www.jreast.co.jp/e/environment/2003.html>>.

FOYT, G. **Demonstration and evaluation of hybrid diesel-electric transit buses**. Hartford, CT: Connecticut Academy of Science and Engineering, 2005. [Report CT-170-1884-F-05-10].

FUTURE ENERGY SOLUTIONS. AEA Technology. **Climate change agreements: results of the first target period assessment**. Oxfordshire, 2004. Version 1.2. Disponível em: <[http://fieldplace.com/UK-ETS/cca\\_aug04.pdf](http://fieldplace.com/UK-ETS/cca_aug04.pdf)>.

GALITSKY, C.; PRICE, L.; WORRELL, E. **Energy efficiency programs and policies in the industrial sector in industrialized countries**. Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, June 2004. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/54068.pdf>>. LBNL-54068.

HARVEY, L. D. D. **A handbook on low-energy buildings and district energy systems: fundamentals, techniques, and examples**. London: James and James, 2006.

HONDA. **Honda develops hybrid scooter prototype**. News release, 24 Aug. 2004. Disponível em: <[http://world.honda.com/news/2004/2040824\\_02.html](http://world.honda.com/news/2004/2040824_02.html)>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2006**. Paris, 2006a. Disponível em : <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf>>.

\_\_\_\_\_. **World energy outlook 2004**. Paris, 2004a. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf>>.

KEULENAER, H. Energy efficient motor driven systems. **Energy & Environment**, v. 15, n. 5, p. 873-905, 2004.

LEBOT, B.; MEIER, A.; ANGLADE, A. Global implications of standby power use. In: 2000 ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 2000, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC, 2000.

McKANE, A.; MEDARIS, B. **The compressed air challenge: making a difference for U.S. industry**. Berkeley, CA: Industrial Energy Analysis, 2003. Disponível em: <<http://industrial-energy.lbl.gov/files/industrial-energy/active/0/LBNL-52771.pdf>>

MARTIN, N. et al. **Emerging energy-efficient industrial technologies**. American Council for an Energy-Efficient Economy. Berkeley, CA, 2000. Disponível em: <<http://www.aceee.org/pubs/ie003.htm>>. [LBNL-46990].

THE NATIONAL ACADEMIES; National Academy of Engineering; National Research Council. **The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs**. Washington, D.C: The National Academies Press, 2004.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Effectiveness and impact of corporate average fuel economy (CAFE) standards**. Washington, D.C.: National Academy Press, 2002. Disponível em: <[http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=10172&page=R2](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10172&page=R2)>.

THE NETHERLANDS. Ministry of Economic Affairs. **Energy efficiency benchmarking covenant**. 1999. Disponível em: <[http://www.benchmarking-energie.nl/pdf\\_files/covteng.pdf](http://www.benchmarking-energie.nl/pdf_files/covteng.pdf)>

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Oil crises and climate challenges: 30 years of energy use in IEA countries**. Paris, 2004b. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/30years.pdf>>.

PENDER, M. UK climate change agreements. Presentation to China Iron and Steel Association Delegation. 2004.

PRICE, L. et al. **Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory. 2006. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/56144.pdf>>. [LBNL-56144].

RICARDO CONSULTING ENGINEERS. **Carbon to hydrogen roadmaps for passenger cars: update of the study for the department for transport and the department for trade and industry**. [S.l.: s.n]. 2003. Disponível em: <<http://www.dft.gov.uk/pgr/roads/environment/research/cqvcf/carbontohydrogenroadmapsforp3822>>. [RD 03/209501.6]. No prelo.

R. L. POLK & CO. **Hybrid vehicle registration growth-rate slows in 2006**. 26 Feb. 2007. Disponível em: <[http://usa.polk.com/News/NewsArchive/2007/2007\\_0226\\_hybrid\\_growth\\_rate.htm](http://usa.polk.com/News/NewsArchive/2007/2007_0226_hybrid_growth_rate.htm)>.

SATHAYE, J. et al. **Assessment of energy use and energy savings potential in selected industrial sectors in India**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory. 2005. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/57293.pdf>>. [LBNL-57293].

SCHIPPER, L.; GRUBB, M. On the rebound? Feedback between energy intensi-

ties and energy uses in IEA countries. **Energy Policy**, v. 28, n. 6-7, p. 367-388, 2000.

TOYOTA MOTOR CORPORATION; Mizhuo Information & Research Institute, Inc. **Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions of automotive fuels in the Japanese context**: well-to-tank report. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.mizuho-ir.co.jp/english/knowledge/report/pdf/wtwghg041130.pdf>>.

TRANSPORT FOR LONDON. **Transport for London annual report 2005**. London, 2005. Disponível em: <<http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/annrep-04-05.pdf>>.

UNITED KINGDOM. Department of Environment, Food, and Rural Affairs. **Industry beats CO2 reduction targets**. London, 21 July 2005.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME; United Nations Department of Economic and Social Affairs; World Energy Council. **World energy assessment overview**: 2004 update. New York, 2004. Disponível em: <<http://www.energyandenvironment.undp.org/undp/indexAction.cfm?module=Library&action=GetFile&DocumentAttachmentID=1010>>.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Industrial technologies program**. Save Energy Now. Efficiency & Renewable Energy. 2006. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov/industry/saveenergynow/>>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Iron and steel**. Mineral commodity summary: Washington, D.C., 2006. Disponível em: <[http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel/festemcs06.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/festemcs06.pdf)>.

VELTHUIJSEN, J. W. **Determinants of investment in energy conservation**. Foundation for Economic Research; University of Amsterdam, The Netherlands, 1995.

WORLD ENERGY COUNCIL. **Energy efficiency**: a worldwide review: indicators, policies, evaluation. London, 2004.

WORRELL, E. et al. **World best practice energy intensity values for selected industrial sectors**. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/LBNL-62806.Rev.2.pdf>>. [LBNL-62806].

WORRELL, E.; MARTAN, N.; PRICE, L. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. iron and steel sector. **Energy**: the International Journal, v. 26, n. 5, p. 513-536, 2001.

\* As Referências bibliográficas nesta edição foram adequadas às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

# 3

## Fornecimento de energia







**M**esmo com um esforço combinado para aproveitar as oportunidades de eficiência energética e outras soluções pelo lado da demanda, as necessidades de energia do mundo são enormes e é quase certo que continuarão a crescer à medida que os países em desenvolvimento se industrializarem e conforme os padrões de vida subirem em muitas sociedades, levando a um aumento de procura por bens de consumo, serviços e amenidades.

Na maior parte da história humana, os animais e a biomassa supriram muitas das necessidades de energia. Com o advento da Revolução Industrial, cerca de dois séculos atrás, o homem começou a utilizar cada vez mais os hidrocarbonetos como sua fonte de energia primária, assinalando uma mudança profunda que trouxe consigo uma era sem precedentes de mudanças tecnológicas, socioeconômicas e culturais. Atualmente, à medida que as preocupações com a sustentabilidade ambiental e a segurança energética crescem, a necessidade de uma terceira transição – para uma nova geração de recursos e tecnologias de fornecimento de energia – parece cada vez mais inevitável, se não iminente. Mesmo que o mundo continue, em larga medida, dependente do carvão, do petróleo e do gás natural, os primeiros elementos dessa transição começam a despontar.

Este capítulo analisa, pelo lado do fornecimento, os recursos e tecnologias de energia que provavelmente serão importantes na transição para um futuro energético sustentável. As várias seções cobrem o tema dos combustíveis fósseis, da energia nuclear, dos recursos renováveis que não sejam a biomassa e da energia da biomassa. Em geral, o foco está em soluções pelo lado do fornecimento que possam dar uma contribuição significativa para satisfazer as necessidades energéticas do mundo nos próximos 20 a 40 anos. Opções de mais longo prazo, tais como a fusão nuclear,

hidratos de metano e hidrogênio (como vetor de energia) são discutidas brevemente, mas não recebem tratamento extensivo.

### 3.1 Os combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis – carvão, petróleo, gás natural e seus derivados – suprem, hoje, aproximadamente 80% das necessidades mundiais de energia primária. O uso desses combustíveis impulsiona economias industrializadas e tornou-se fundamental em praticamente todos os aspectos da atividade produtiva e da vida quotidiana no mundo moderno. Ainda assim, quase desde seu início, a crescente dependência dos combustíveis fósseis tem sido uma fonte tanto de preocupação como de prosperidade. Já em 1866, quando a Era Industrial iniciava seu percurso, o autor britânico Stanley Jevons indagava quanto tempo as reservas de carvão do seu país iriam durar. O carvão acabou se revelando um recurso mais abundante do que Jevons poderia ter imaginado, mas perguntas semelhantes têm sido feitas há muito tempo sobre as reservas mundiais de petróleo e gás natural. Mais recentemente, as preocupações a respeito das mudanças climáticas globais têm surgido como uma nova – e talvez, em última análise, mais limitante – restrição imposta à sustentabilidade dos atuais padrões de utilização de combustível fóssil no longo prazo.

Esses padrões sugerem que os combustíveis fósseis continuarão a desempenhar um papel dominante no *mix* mundial de energia pelas próximas décadas, mesmo com os esforços conjuntos para promover a eficiência energética e as alternativas que não liberem carbono. Portanto, a gestão e o aperfeiçoamento do uso do carvão, do petróleo e do gás natural durante o período de transição para um futuro energético mais sustentável – e, em particular, se é possível ou não fazê-lo de forma que mudanças climáticas e os riscos à segurança energética comecem a ser atenuados, ao mesmo tempo que se satisfazem as urgentes necessidades energéticas dos países em desenvolvimento – são uma questão-chave para os elaboradores de políticas e para líderes políticos no mundo todo. Esta seção descreve os desafios específicos que existem hoje em relação a cada

uma das principais opções de combustíveis fósseis. Uma parte significativa da discussão focaliza as perspectivas de uma nova geração de tecnologias de uso do carvão que sejam menos danosas ao clima, graças ao seu potencial para promover o avanço de múltiplos objetivos programáticos econômicos, ambientais, de desenvolvimento e de segurança energética.

### Status das reservas mundiais de combustíveis fósseis

Como contexto para esta discussão, é útil começar por rever o *status* das reservas de combustíveis fósseis em relação aos padrões de consumo atuais e projetados. A Tabela 3.1 mostra as reservas comprovadas de gás natural, petróleo e carvão, em relação aos níveis atuais de consumo e às estimativas de reservas totais para cada combustível no mundo. As reser-

**Tabela 3.1 Consumo, recursos e reservas de combustíveis fósseis**

	Consumo (EJ)				Reservas comprovadas (EJ) final 2006 <sup>b</sup>	Tempo de vida das reservas comprovadas (anos) pelo consumo atual	Parcela das reservas comprovadas, em relação ao consumo de 1860 a 2006	Base de reservas (ZJ) <sup>a</sup>	Tempo de vida da base de reservas (anos)
	1860-1998 <sup>a</sup>	1999-2006 <sup>b</sup>	1860-2006 <sup>a,b</sup>						
Petróleo	5 141	1 239	6 380	164	6 888	41	92%	32,4	198
Gás natural	2 377	785	3 163	109	7 014	63	45%	49,8	461
Carvão	5 989	878	6 867	130	19 404	147	35%	199,7	1 538

Obs.: Em Base de reservas, 1 zettajoule (ZJ) é igual a 103 exajoules (EJ). Reservas são definidas como concentrações de material sólido, líquido ou gasoso ocorrendo naturalmente dentro da ou sobre a crosta terrestre de forma que a extração econômica seja potencialmente viável. A base de reservas inclui as reservas comprovadas mais reservas (convencionais ou não) adicionais. As reservas não-convencionais poderiam estender a vida útil do petróleo, gás e carvão por um fator de cinco a dez, mas a extração vai envolver tecnologias avançadas, custos mais elevados e, possivelmente, sérios problemas ambientais.

Fontes: (a) UNDP, Undesa, WEC, 2000: Tabela 5-7. (b) BP, 2007.

vas comprovadas refletem a quantidade de combustível que a indústria calcula, com um razoável grau de certeza e com base nos dados geológicos e de engenharia disponíveis, que pode ser recuperada no futuro a partir de reservatórios conhecidos, nas condições econômicas e operacionais existentes. As reservas comprovadas geralmente representam apenas uma pequena fração da base total de recursos do mundo. Os valores tendem a mudar ao longo do tempo à medida que dados mais precisos se tornam disponíveis e as condições econômicas e tecnológicas se modificam. No caso do petróleo, por exemplo, as reservas estimadas cresceram ao longo dos últimos 50 anos porque houve uma melhora na capacidade de extração e novas descobertas acompanharam e até avançaram em relação ao ritmo crescente do consumo. Contudo, isso começou a mudar nos últimos anos, gerando a preocupação de que a produção de petróleo poderia atingir o ápice nas próximas décadas, levando a um período de declínio inevitável nas reservas disponíveis.

O suprimento global de carvão – tanto em termos de reservas comprovadas e reservas totais estimadas – é muito mais abundante do que os suprimentos globais de petróleo convencional e de gás natural (Tabela 3.1); para estes combustíveis, a razão entre as reservas convencionais comprovadas e o consumo atual é da ordem de 40 a 60 anos, enquanto as reservas comprovadas de carvão são suficientes para sustentar mais 150 anos de consumo nos níveis de 2006. Obviamente, qualquer estimativa das reservas comprovadas – já que as reservas são uma medida da base de recursos que podem ser economicamente recuperadas usando a tecnologia atual – está sujeita a alterações ao longo do tempo: conforme os preços aumentarem e/ou a tecnologia se aperfeiçoar, as reservas estimadas podem aumentar. Mesmo assim, as pressões de preço e oferta provavelmente continuarão a afetar os mercados de petróleo e gás natural nas próximas décadas (Tabela 3.1). A inclusão de recursos não convencionais expande amplamente o potencial da base de recursos, especialmente para o gás natural, se as estimativas de “ocorrências adicionais” – isto é, depósitos mais especulativos de hidrocarbonetos, que ainda não estão tecnicamente acessíveis para fins energéticos, tais como hidratos de metano – forem incluídas. Isso será discutido mais adiante, na seção sobre reservas não-convencionais.

Em suma, no curto prazo, as preocupações com a segurança energética e o abastecimento são relevantes, principalmente em relação ao petróleo e, em menor grau, ao gás natural. Essas são preocupações sérias, considerando-se o papel central que os dois combustíveis desempenham na economia energética global atualmente. Com a notável exceção do Brasil, que utiliza grandes quantidades de etanol como combustível veicular, sistemas de transporte em todo o mundo continuam a depender quase exclusivamente dos derivados de petróleo. A rápida modernização de grandes países em desenvolvimento, como a China e a Índia, combinada com a estagnação ou queda da economia de combustível veicular nos grandes países consumidores, como os Estados Unidos, e um crescimento contínuo do transporte de mercadorias e do transporte aéreo, aumentaram acentuadamente a demanda global por petróleo nos últimos anos, gerando pressões sobre a capacidade dos países produtores e gerando uma acentuada tendência de aumento para os preços do petróleo. A maior parte das reservas comprovadas mundiais de petróleo convencional está concentrada em alguns grandes depósitos em certas regiões do mundo, especialmente o Oriente Médio. Paralelamente, o gás natural já é uma importante fonte de energia em muitas partes do mundo – como a opção mais limpa e menos carbono-intensiva entre os combustíveis fósseis – e tem um papel importante a desempenhar na mitigação de gases do efeito estufa e outras emissões de poluentes, na transição para uma próxima geração de tecnologias de energia. Embora as reservas restantes de gás natural estejam mais amplamente distribuídas ao redor do mundo do que as reservas de petróleo, limitações regionais de abastecimento e preços altos estão começando a afetar também os mercados de gás, voltando-se os investimentos para o desenvolvimento de novos recursos e para a expansão da capacidade global de produção e transporte de gás natural liquefeito.

### *Definindo o desafio da sustentabilidade para combustíveis fósseis*

Para o petróleo e o gás natural, portanto, o desafio programático imediato consiste em encontrar formas de reforçar e diversificar os su-

primentos de maneira aceitável, do ponto de vista ambiental, ao mesmo tempo que se reduz a demanda, através da melhoria da eficiência de uso final e do maior uso de alternativas como combustíveis à base de biomassa (estes tópicos são abordados em outro ponto do presente relatório). No geral, contudo, as estimativas na Tabela 3.1 sugerem que a adequação dos recursos, por si só, não representa um desafio fundamental para os combustíveis fósseis nos próximos 100 anos e talvez por um período mais longo. O carvão, em particular, é abundante – tanto globalmente quanto em algumas das nações que provavelmente estarão entre os maiores consumidores de energia do mundo no século XXI (incluindo os Estados Unidos, a China e a Índia). Atualmente, o carvão é utilizado principalmente para gerar eletricidade (o setor de energia é responsável por mais de 60% do total da queima global de carvão) e como fonte de energia para o setor industrial (exemplo, para a produção de aço). Mais recentemente, o aumento dos preços do petróleo e do gás natural gerou um interesse renovado na utilização do carvão como uma fonte de combustíveis líquidos alternativos.

Sem substanciais aperfeiçoamentos tecnológicos, no entanto, o aumento da dependência do carvão para satisfazer uma vasta gama de necessidades energéticas – embora, talvez, positivo do ponto de vista da segurança energética – teria sérias implicações ambientais. A queima do carvão pulverizado nas centrais elétricas convencionais a vapor e a sua conversão em combustíveis líquidos ou gasosos utilizando métodos convencionais – isto é, sem captura e sequestro de carbono – geram quantidades substancialmente maiores de dióxido de carbono do que a queima direta do petróleo ou do gás natural. Evidentemente, o carbono gerado no processo de conversão de carvão em combustíveis líquidos pode ser, em tese, capturado e sequestrado (embora poucas ou nenhuma das propostas recentes para a conversão de carvão em líquidos preveja a captura de carbono). O carbono no combustível líquido resultante ainda é liberado, no entanto, quando o combustível é queimado, gerando emissões de gases do efeito estufa similares àquelas associadas à gasolina ou ao diesel convencionais. Do ponto de vista do clima, portanto, a tecnologia de conversão carvão em líquidos gera emissões que são, na melhor das hipóteses, mais ou menos

equivalentes às dos combustíveis convencionais que substitui. Se a captura e sequestro do dióxido de carbono não fizerem parte do processo de conversão do carvão em líquidos, serão geradas duas vezes mais emissões do que no ciclo completo de combustível do petróleo convencional.

Dessa forma, provavelmente, os impactos sobre o clima, mais do que o esgotamento dos recursos, emergirão como a restrição mais importante, no longo prazo, do uso de combustíveis fósseis, em geral, e da utilização do carvão, em particular. Todos os meios atuais de utilização de combustíveis fósseis emitem dióxido de carbono, o principal gás do efeito estufa diretamente gerado por atividades humanas. As reservas comprovadas de hoje representam mais do que o dobro do consumo acumulado que ocorreu entre 1860 e 1998 (Tabela 3.1). Mesmo que o consumo futuro de combustíveis fósseis seja limitado às reservas comprovadas hoje, o resultado da queima desses combustíveis (na ausência de medidas para a captura e sequestro das emissões de dióxido de carbono resultantes) seria a liberação de mais do que o dobro do carbono que já foi emitido na atmosfera. Assim, grande parte do restante dessa discussão focaliza as perspectivas de uma nova geração de tecnologias do carvão que permitiriam o uso continuado do combustível fóssil mais abundante do mundo, de uma forma compatível com o imperativo de reduzir os riscos da mudança climática.

Espera-se que o consumo de carvão venha a crescer fortemente nas próximas décadas, principalmente em resposta à demanda global crescente por eletricidade, em especial nas economias emergentes da Ásia. Atualmente, o carvão abastece quase 40% da produção total de eletricidade; em sua participação no fornecimento total de energia, prevê-se que a utilização do carvão se mantenha praticamente constante ou mesmo diminua ligeiramente, mas, em termos absolutos, espera-se que o consumo global de carvão aumente mais de 50% durante os próximos 25 anos – de 2 389 milhões de toneladas de petróleo equivalente em 2002 para 3 601 milhões toneladas de petróleo equivalente em 2030, segundo a mais recente previsão de caso de referência da IEA (2006). O aumento do consumo é inevitável, já que o carvão é, de longe, o mais abundante e o mais barato entre os recursos disponíveis para a China e a Índia, à medida que estes países continuam a se industrializar e tentem elevar os



padrões de vida de centenas de milhões de pessoas. A China, sozinha, está expandindo sua capacidade de gerar eletricidade à base de carvão em cerca de 50 gigawatts por ano, ou seja, aproximadamente o equivalente da capacidade de uma grande central (1 gigawatt) por semana. Sua utilização do carvão – 1,9 bilhão de toneladas em 2004 – já ultrapassa a dos Estados Unidos, Japão e União Europeia juntos. Com uma taxa de crescimento anual de 10,9% em 2005, o consumo de carvão da China poderá duplicar em sete anos. A Índia está em situação semelhante, com o rápido crescimento econômico e uma população que está se expandindo mais rapidamente do que a da China.

### *Opções de tecnologia avançada do carvão*

As tecnologias atuais predominantes para o uso de carvão envolvem a queima direta de carvão finamente triturado, ou pulverizado, em caldeiras a vapor. As usinas a carvão mais antigas e as usinas a carvão em grande parte do mundo em desenvolvimento operam em níveis relativamente baixos de eficiência e geram grandes quantidades de dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, fuligem e mercúrio, bem como dióxido de carbono. Esses poluentes criam riscos substanciais para a saúde pública, especialmente onde não há controle sobre as emissões (como em muitos países em desenvolvimento). Em algumas partes do mundo, as emissões das usinas a carvão também contribuem para problemas de poluição que transcendem fronteiras nacionais e mesmo continentais. Além disso, a extração do carvão também produz impactos ambientais locais significativos e gera importantes riscos à segurança e à saúde dos mineiros. Ao longo do tempo, a tecnologia do carvão pulverizado tem melhorado, até atingir uma eficiência de produção de eletricidade superior a 40%, e tecnologias sofisticadas de controle da poluição foram desenvolvidas e podem reduzir as emissões tóxicas de enxofre, nitrogênio e material particulado em 97% ou mais. É importante observar que essas tecnologias não reduzem as emissões de dióxido de carbono, que ainda continuam descontroladas nas utilizações atuais convencionais do carvão.

Benefícios ambientais significativos podem, portanto, ser obtidos, simplesmente aumentando-se a eficiência das usinas a carvão pulverizado convencionais (reduzindo, assim, o consumo de combustível e as emissões de carbono por unidade de eletricidade gerada) e acrescentando modernos controles de poluição. A Figura 3.1 mapeia a taxa média da eficiência de conversão nas usinas a carvão em diferentes países ao longo do tempo. O gráfico mostra que vários países têm alcançado aperfeiçoamentos significativos na média de eficiência ao longo da última década, mas o ritmo de progresso diminuiu ou estacionou em vários casos. A variação remanescente no desempenho médio das usinas em diversos países sugere que há espaço para maiores ganhos e que reduções substanciais de carbono podem ser conseguidas com aperfeiçoamentos na eficiência de usinas convencionais a carvão. Enquanto isso, uma nova geração de tecnologias do carvão oferece boas perspectivas para melhorar a eficiência, gerando coprodutos úteis e aumentando as possibilidades para captura e sequestro de carbono, com boa relação custo-benefício.

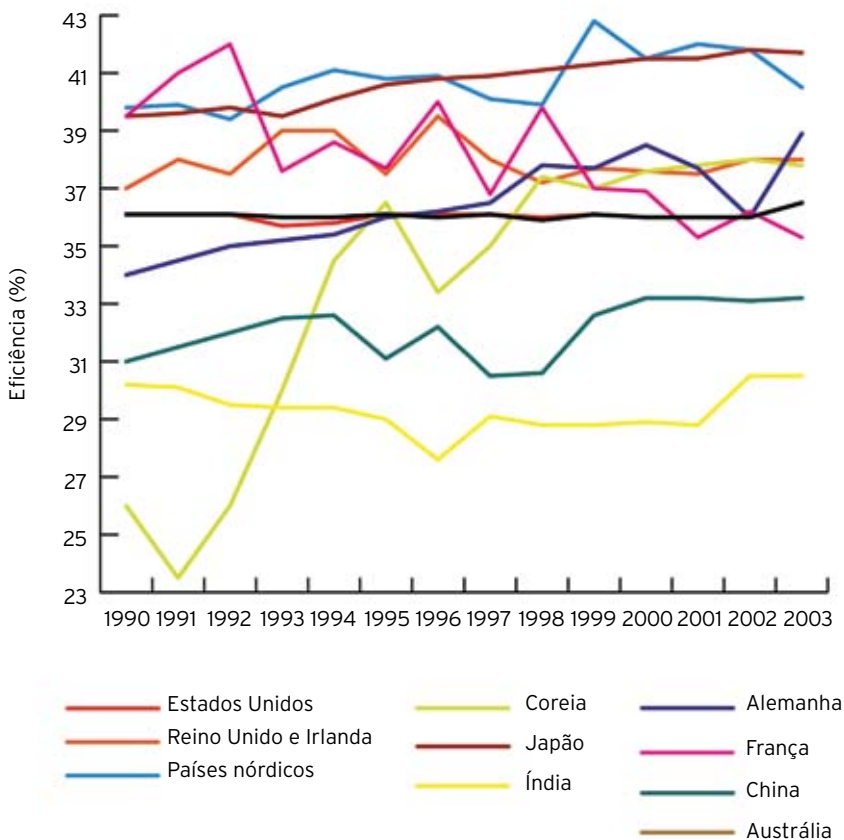
Duas tecnologias que melhoram a tecnologia convencional do carvão pulverizado estão sendo desenvolvidas há algum tempo e já estão em uso comercial em todo o mundo. Os chamados sistemas “super-críticos” geram vapor a alta pressão, resultando em maior eficiência do ciclo e menos emissões. Atualmente, cerca de 10% das encomendas de novas usinas a carvão são para sistemas a vapor super-críticos. Das mais de 500 unidades desse tipo que já existem, a maioria fica nos países da antiga União Soviética, Europa e Japão. Uma outra tecnologia, conhecida como leito de queima fluidizado, foi desenvolvida ainda no início da década de 1960.

Através da queima do carvão em um leito quente de partículas sorventes, essa tecnologia aproveita as características únicas de fluidização para controlar o processo de combustão. A combustão em leito fluidizado pode ser utilizada para queimar uma grande variedade de carvão com diferentes teores de enxofre e cinzas, ao mesmo tempo que continua a atingir níveis avançados de controle da poluição; atualmente, cerca de 1 200 usinas ao redor do mundo utilizam essa tecnologia. Sistemas de leito fluidizado têm, na verdade, se tornado menos comuns, em utilizações em

usinas de energia, porque a tecnologia é mais adequada para aplicações em pequena escala (exemplo, 30 unidades de megawatt).

Em contraste com os sistemas supercríticos ou de leito fluidizado, novos avanços na tecnologia do carvão provavelmente envolverão a gaseificação do carvão, primeiro, em vez da queima direta na forma pulverizada. A gaseificação converte o carvão (ou, potencialmente, qualquer material contendo carbono) em um gás de síntese, composto, em princípio, por monóxido de carbono e hidrogênio. O gás, por sua vez, pode ser utilizado como combustível para gerar eletricidade; também pode ser

**Figura 3.1** Eficiência da produção de energia com queima de carvão



Fonte: Graus e Worrell, 2006.

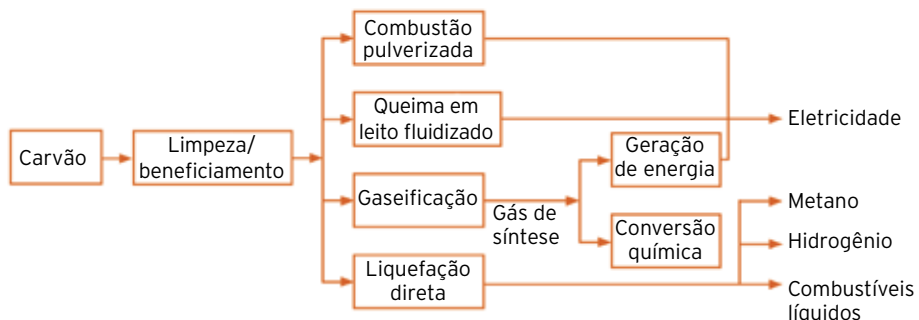
usado para sintetizar produtos químicos (como o amoníaco, oxi-químicos e combustíveis líquidos) e para produzir hidrogênio. A Figura 3.2 descreve a diversidade potencial dos usos da tecnologia de gaseificação do carvão de forma esquemática.

A tecnologia da gaseificação está bem desenvolvida (em nível mundial, cerca de 385 gaseificadores modernos estavam em funcionamento em 2004), mas, historicamente, tem sido utilizada, principalmente, em aplicações industriais para a produção de produtos químicos, com a geração de eletricidade como um processo secundário e subordinado. Mais recentemente o interesse centrou-se na tecnologia do ciclo combinado de gaseificação integrada à base de carvão (CCGI) como uma opção para gerar eletricidade.

O processo de gaseificação não só resulta em muito menos emissões de poluentes convencionais como também facilita a captura e o sequestro de carbono e permite a produção simultânea de valiosos coprodutos, incluindo os combustíveis líquidos. Considerando-se que altos níveis de controle da poluição também podem ser atingidos em usinas de carvão pulverizado de última geração, os dois últimos atributos fornecem a principal motivação para o interesse atual no CCGI de carvão.

A primeira central elétrica CCGI foi testada na Alemanha na década de 1970, mas aplicações em escala comercial desta tecnologia para a produção de eletricidade estão limitadas a um punhado de instalações de

**Figura 3.2** Do carvão para a eletricidade e outros produtos úteis



demonstração ao redor do mundo. Essa situação pode se alterar significativamente nos próximos anos, atendendo ao interesse crescente em tecnologia CCGI e em razão dos recentes anúncios de uma nova rodada de construção de usinas de demonstração nos Estados Unidos e outros países. Ao mesmo tempo, preocupações com os custos, confiabilidade e falta de familiaridade com tecnologia CCGI na indústria de geração de energia elétrica vão, provavelmente, continuar a criar obstáculos por algum tempo. As estimativas de custo variam, mas são 20% a 25% mais altas para uma nova central CCGI a carvão, em comparação com uma central convencional a carvão pulverizado, especialmente se a central convencional não possuir controles modernos de poluição para emissões de enxofre e óxido de nitrogênio. Além disso, processos baseados em gaseificação são mais sensíveis à qualidade do carvão; do ponto de vista do custo, o uso de carvões com valores mais baixos de aquecimento traz ainda mais desvantagens para a tecnologia CCGI em relação às alternativas convencionais. Esta pode ser uma questão importante em países como a China e a Índia, que têm grandes jazidas de carvão de qualidade relativamente pobre.

O maior custo da tecnologia CCGI de carvão pode, obviamente, criar um grande impedimento em alguns países em desenvolvimento, onde o acesso ao capital pode ser restrito e outras necessidades econômicas e de desenvolvimento são particularmente urgentes. Muitas vezes, sistemas mais avançados a carvão são também mais complexos para construir e operar e mais difíceis de manter. Isso não deveria ser um impedimento em si (sem contar as implicações do custo), uma vez que a construção e operação podem ser terceirizadas para as grandes multinacionais, mas a necessidade de recorrer à especialização e componentes de fora pode ser vista como uma desvantagem adicional por parte de alguns países. Para superar esses obstáculos, alguns países adotaram incentivos e outras políticas para acelerar a demonstração e implementação de tecnologia CCGI, mas a grande maioria das novas usinas a carvão, propostas ou em construção, tanto nos países industrializados como nos países em desenvolvimento, ainda depende da tecnologia do carvão pulverizado. Como cada nova unidade representa um compromisso de muitas décadas, em termos de investimento de capitais e futuras emissões (normalmente, espera-se

que usinas elétricas tenham uma vida útil de até 75 anos), não é exagerada a importância de acelerar a penetração das tecnologias avançadas do carvão no mercado.

Os futuros esforços para acelerar a implementação de tecnologias mais limpas do carvão em geral, e a tecnologia CCGI em particular, serão afetados por vários fatores: o custo de opções competitivas com baixos níveis de emissões, incluindo captura e sequestro de carbono pós-combustão nas tecnologias convencionais do carvão, bem como tecnologias para o gás natural e renováveis; a existência de apoio contínuo sob a forma de incentivos, financiamento público para atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e um tratamento regulatório favorável; e – talvez mais importante – a evolução de imposições ambientais, especialmente no que diz respeito ao controle de emissões de gases do efeito estufa.<sup>28</sup> A próxima seção deste capítulo apresenta uma discussão mais detalhada das perspectivas para as diferentes tecnologias do carvão – incluindo a tecnologia convencional do carvão pulverizado e a queima de oxi-combustível, bem como a gaseificação do carvão – em combinação com captura e sequestro de carbono. Entre outras coisas, sugere que, para a produção de energia por si só (isto é, deixando de lado oportunidades de coproduzir combustíveis líquidos), as vantagens de custo da tecnologia conhecida de carvão pulverizado em relação à tecnologia CCGI poderiam compensar amplamente as desvantagens de custos de captura de carbono pós-combustão. Outra importante constatação é que não se espera, atualmente, que o sequestro apresente quaisquer desafios insuperáveis, quer do ponto de vista dos depósitos geológicos disponíveis, quer do ponto de vista da tecnologia necessária para capturar, transportar e injetar fluxos de resíduos de carbono. No entanto, a captura e sequestro

---

28. O processo de gaseificação também facilita a captura de poluentes atmosféricos convencionais, como o enxofre e óxidos de hidrogênio. As exigências regulatórias relativas ao controle desses e de outros poluentes (como o mercúrio) também poderiam, portanto, afetar a competitividade do custo dos sistemas CCGI em relação aos sistemas convencionais a carvão pulverizado. Considerando-se que as tecnologias para um controle efetivo pós-combustão para a maioria dessas emissões de gases que não provocam o efeito estufa já foram bem demonstradas e estão disponíveis comercialmente, a política do carbono será, provavelmente, um fator decisivo regendo futuras implementações CCGI.

de carbono geralmente irão representar um custo adicional (exceto, talvez, em alguns casos em que possam ser usados para uma recuperação avançada de petróleo), e a experiência com sistemas de sequestro na escala necessária para capturar as emissões das usinas de energia comerciais ainda é limitada.

Qualquer que seja a combinação de tecnologias que se mostrar mais rentável e atraente para os investidores, a sinalização de preços associados a futuras restrições ao carbono terão de ser previsíveis e suficientes em magnitude para superar os diferenciais de custos restantes, quando esses diferenciais de custos refletirem não apenas o custo e o prêmio do risco associados com tecnologias avançadas do carvão, mas também o custo e a viabilidade da captura e sequestro de carbono. O avanço na redução daqueles diferenciais de custos reforçaria as perspectivas de uma transição bem-sucedida para sistemas energéticos sustentáveis, dada a relativa abundância e o baixo custo da base mundial de recursos de carvão. Além de fornecer eletricidade, sistemas avançados de gaseificação do carvão com captura e sequestro de carbono poderiam se tornar uma importante fonte de combustíveis alternativos para o transporte.

Já existem tecnologias para direta ou indiretamente (via gaseificação) converter hidrocarbonetos sólidos, como o carvão, em combustíveis líquidos. Tais sistemas de conversão carvão para líquido podem se tornar cada vez mais atraentes no futuro, especialmente quando países que são ricos em carvão, mas pobres em petróleo, enfrentarem preços do petróleo em alta. Infelizmente, os processos atuais de liquefação são energo-intensivos, requerem grandes quantidades de água, e geram emissões de carbono substanciais. Sistemas modernos e integrados de gaseificação que produzam eletricidade e combustíveis líquidos com queima limpa têm o potencial de melhorar a eficiência total do ciclo e o desempenho ambiental, especialmente se combinados com a captura e o sequestro de carbono custo-efetivos.

Num futuro próximo, a probabilidade é que novas instalações CCGI serão construídas nos Estados Unidos, Japão e – em menor medida, dado o crescimento relativamente pequeno na capacidade total de carvão – na União Europeia. Alguns países em desenvolvimento, notadamente a Chi-

na e a Índia, também demonstraram grande interesse por essa tecnologia. Em suma, observadores especialistas têm se expressado com diferentes graus de otimismo (ou pessimismo) sobre as perspectivas de difusão acelerada de tecnologias avançadas do carvão, mas há pouco desacordo sobre a natureza dos obstáculos do caminho ou sobre o quanto pode estar em risco em relação à sua bem-sucedida superação.<sup>29</sup>

### *Captura e sequestro de carbono*

O desenvolvimento bem-sucedido da tecnologia de captura e sequestro de carbono poderia melhorar consideravelmente as perspectivas de atingir a meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Do ponto de vista técnico, existem várias opções para a separação e captura de carbono, antes ou depois do ponto de queima do combustível. Além disso, imagina-se que o potencial da capacidade de armazenamento adequado em depósitos geológicos ao redor do mundo seja suficiente para acomodar muitas décadas (e talvez séculos) de emissões, às taxas atuais de utilização de combustível fóssil. Ao mesmo tempo, porém, obstáculos significativos precisam ser superados: esforços em larga escala para a captura e sequestro de carbono irão aumentar os custos, exigir mais energia e uma nova infraestrutura (incluindo gasodutos para o transporte de dióxido de carbono para os locais de sequestro e poços para injetá-lo no subsolo); também podem exigir novas disposições regulatórias e institucionais e serem de difícil aceitação por parte da população. A experiência operacional com alguns dos sistemas necessários para implementar a captura e sequestro de carbono vem, principalmente, das indústrias de processamento químico, refino de petróleo e processamento de gás natural e da utilização de dióxido de carbono comprimido para recuperação avançada de petróleo. Vários projetos de demonstração, especificamente destinados a explorar a captura e sequestro de carbono como uma estratégia de redução de gases

---

29. Para obter informações adicionais sobre tecnologias avançadas de carvão, consulte o relatório *The future of coal*, do MIT (2001).



de efeito estufa, têm sido propostos ou estão em curso, e duas instalações em escala industrial estão atualmente implementando o armazenamento de dióxido de carbono, com a finalidade exclusiva de evitar emissões na atmosfera. Mesmo assim, a implementação em larga escala desses sistemas provavelmente continuará a ser lenta – exceto nos casos em que a recuperação avançada de petróleo cria oportunidades econômicas favoráveis – sem imposições regulatórias ou sinalizações de mercado para evitar emissões de dióxido de carbono.

## CAPTURA DE CARBONO

A maneira mais direta de capturar o carbono proveniente de sistemas de energia fóssil é a recuperação depois da queima a partir dos gases de exaustão de grandes queimadores, como usinas elétricas. Em termos de volume, o dióxido de carbono normalmente representa de 3% (no caso de uma central com ciclo combinado de gás) a 15% (para uma central de queima de carvão) do fluxo de exaustão de gases provenientes dessas instalações. Apesar de várias opções para a captura pós-combustão estarem disponíveis, a abordagem preferida faz uso de uma reação química reversível entre um solvente aquoso alcalino (geralmente uma amina) e dióxido de carbono.

Como essa abordagem envolve a separação do dióxido de carbono a concentrações relativamente baixas de um volume muito maior de gases de exaustão, e como a regeneração do solvente de amina e outros aspectos do processo são energo-intensivos, a captura de carbono pós-combustão acarreta custos significativos e sanções energéticas. De acordo com uma revisão de literatura do IPCC (2005), as necessidades de combustível para uma nova central elétrica a vapor de carvão com um “esfregão de amina” são 24% a 40% mais altas do que para a mesma unidade eliminando dióxido de carbono. Visto de outra forma, a captura de carbono reduz a eficiência da central elétrica a tal ponto que a sua produção de eletricidade por unidade de combustível consumido é reduzida em 20% a 30%.

Outra abordagem, conhecida como combustão de oxi-combustível, utiliza oxigênio em vez de ar para a combustão, produzindo um fluxo de exaustão que consiste, principalmente, de água e dióxido de carbono. Esta opção ainda está em desenvolvimento. Uma terceira abordagem é a separação de carbono antes da combustão, convertendo, primeiro, o combustível em questão em um gás de síntese composto, principalmente, por monóxido de carbono e hidrogênio. O monóxido de carbono no gás de síntese reage, então, com vapor, para formar mais hidrogênio e dióxido de carbono. Normalmente, o dióxido de carbono é removido do gás de síntese usando-se um solvente físico que não se liga, quimicamente, ao dióxido de carbono, como fazem as aminas. Nesse ponto, a abordagem preferida para a produção de eletricidade é a queima do gás de síntese restante, rico em hidrogênio, em uma central que tenha um ciclo combinado de turbinas a gás e a vapor. Como alternativa, o processo pode ser ajustado de modo a deixar uma proporção mais alta de carbono para hidrogênio no gás de síntese e depois convertê-lo em combustíveis líquidos sintéticos, usando o processo de Fischer-Tropsch, ou outros processos químicos.

Os esforços para explorar a captura de carbono pré-combustão têm se concentrado, principalmente, na tecnologia CCGI para gerar energia usando carvão, coque ou outros resíduos de petróleo, ou biomassa. O processo de gaseificação oferece alguns benefícios potenciais – e alguma economia de custo pela compensação – em relação ao controle convencional de poluentes. Por outro lado, continua a ser mais caro – até que mais experiência seja adquirida com usinas de demonstração em grande escala – e menos conhecido que os sistemas de combustão convencionais em utilizações em usinas elétricas. No entanto, o interesse por sistemas avançados de carvão tem se intensificado significativamente nos últimos anos; e o mercado de tecnologia CCGI, pelo menos em algumas partes do mundo, parece agora estar evoluindo rapidamente.

O CCGI de carvão representa menos de 1 gigawatt de eletricidade, entre os 4 gigawatts de eletricidade da capacidade total CCGI que foi construída – a maior parte do restante envolve gaseificação de resíduos petrolíferos. Embora tenha havido apenas uma experiência modesta com

CCGI de carvão sem captura de carbono, a experiência com a gaseificação e tecnologias relacionadas com captura nas indústrias de processos químicos e de refino de petróleo torna possível calcular os custos para o CCGI do carvão com aproximadamente o mesmo grau de confiança que para as usinas convencionais a carvão vapor-eletricidade. Mais importante ainda, a vantagem decisiva do CCGI do carvão, em termos de captura de carbono, é do carvão betuminoso, que tem sido o foco da maioria dos estudos. A situação é menos clara para carvões sub-betuminosos e lignitos, para os quais muito poucas análises de CCGI têm sido publicadas. Mais estudos são necessários para trazer esclarecimentos sobre a classificação relativa das tecnologias de captura e sequestro de carbono para carvões de qualidade inferior.

A revisão da literatura do IPCC (2005) resumiu a informação disponível sobre os custos de captura e sequestro de carbono. Concluiu-se que os métodos disponíveis poderiam reduzir as emissões de dióxido de carbono de 80% a 90%, e que, em todos os tipos de usinas, o acréscimo da captura de carbono aumenta os custos de produção de eletricidade em US\$ 12 a US\$ 36 por megawatt-hora. A revisão do IPCC concluiu, ainda, que o custo total da produção de energia com captura de carbono em usinas movidas a combustíveis fósseis variou de US\$ 43 a US\$ 86 por megawatt-hora. O custo para evitar emissões de dióxido de carbono (levando em conta eventuais necessidades extras de energia para a tecnologia de captura e incluindo a compressão, mas não o transporte do dióxido de carbono capturado) variou US\$ 13 a US\$ 74 por tonelada métrica de dióxido de carbono.

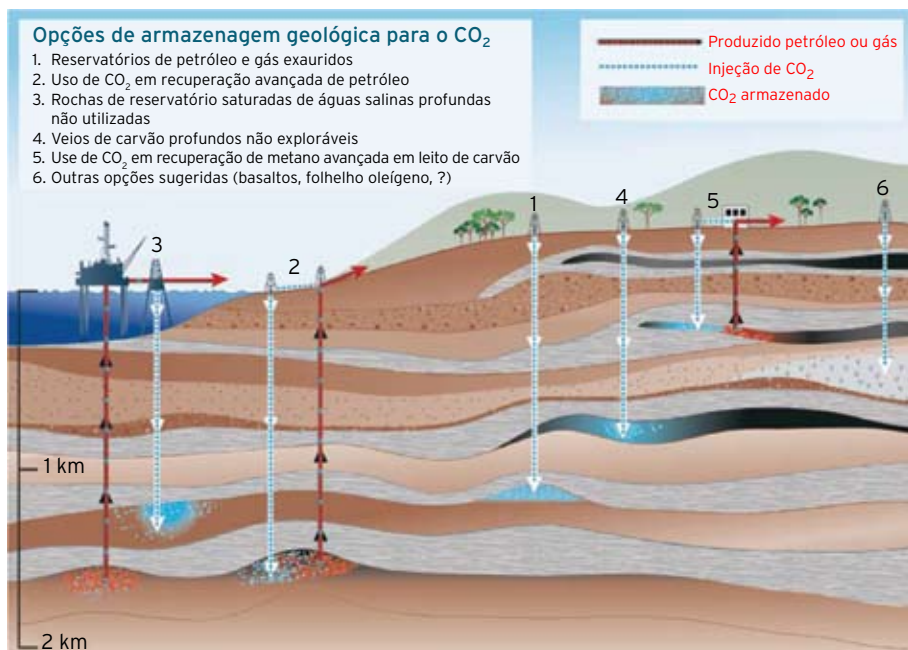
Segundo o IPCC, a maioria dos estudos indica que “usinas CCGI são um pouco mais dispendiosas sem a captura e um pouco menos dispendiosas com captura do que usinas de tamanho semelhante [a carvão pulverizado], mas as diferenças de custo para usinas com captura [de dióxido de carbono] podem variar conforme o tipo do carvão e outros fatores locais”. Além disso, “em todos os casos, os custos da captura [de dióxido de carbono] dependem de fatores técnicos, econômicos e financeiros, relacionados com a concepção e o funcionamento do processo de produção

ou do sistema de energia em questão, bem como a concepção e o funcionamento da tecnologia de captura [de dióxido de carbono] empregada. Assim, comparações de tecnologias alternativas, ou o uso de estimativas de custos [de captura e armazenamento de carbono], requerem um contexto específico para fazerem sentido”. Em outras palavras, ainda não surgiu um vencedor claro entre as opções concorrentes para captura de carbono – ao contrário, está em curso uma concorrência saudável entre as diferentes tecnologias – e é provável que as diferentes abordagens irão se revelar mais custo-efetivas em diferentes contextos e para diferentes tipos de carvão.

## SEQUESTRO DE CARBONO

Três tipos de formações geológicas estão sendo consideradas para sequestro de dióxido de carbono: campos de petróleo e gás exauridos; formações profundas cheias de água salgada (formações salinas); e formações profundas de carvão que não sejam exploráveis (Figura 3.3). Estas formações ocorrem nas bacias sedimentares, onde camadas de areia, sedimentos, argila e elementos evaporados foram compactados ao longo do tempo geológico para formar lacres naturais, impermeáveis, capazes de reter no subsolo fluidos em suspensão, como petróleo e gás. A maioria das experiências com as tecnologias necessárias para o sequestro de carbono surgiu a partir da utilização de dióxido de carbono para recuperação avançada de petróleo em campos de petróleo exauridos – uma abordagem que provavelmente continuará a oferecer vantagens significativas em termos de custos em curto prazo, considerando-se os preços elevados do petróleo. Como uma estratégia de redução de emissões no longo prazo, contudo, o sequestro de carbono precisaria se expandir para além da recuperação avançada do petróleo e de gás natural, para fazer uso das formações salinas, que têm o maior potencial de armazenamento para manter as emissões de dióxido de carbono fora da atmosfera.

**Figura 3.3** Ilustração esquematizada de uma bacia sedimentar com um certo número de opções geológicas de sequestro



Fonte: IPCC, 2005.

Organizações de pesquisa têm feito avaliações locais, regionais e globais da capacidade geológica potencial de sequestro, desde o início da década de 1990 (IPCC, 2005). Em geral, a informação mais confiável refere-se a reservatórios de petróleo e gás; a informação menos confiável diz respeito a veios de carvão. A confiabilidade das estimativas de capacidade para as formações salinas varia, dependendo da qualidade das informações geológicas disponíveis e do método utilizado para calcular a capacidade. A Tabela 3.2 resume a avaliação mais atual da capacidade de sequestro. Formações salinas têm a maior capacidade potencial, mas as estimativas mais altas são muito incertas, devido tanto à falta de uma metodologia aceita para avaliar a capacidade quanto à falta de dados, especialmente para algumas partes do mundo, como a China, a América Latina e a Índia. No total, as estimativas sugerem que um mínimo de cerca de 2 000 gigato-

neladas de capacidade de sequestro de dióxido de carbono está disponível no mundo todo; aproximadamente equivalente a 100 anos de emissões, à taxa atual de emissões globais, de cerca de 24 gigatoneladas por ano.<sup>30</sup>

**Tabela 3.2** Estimativas da capacidade geológica global de sequestro de CO<sub>2</sub>

Tipo de reservatório	Estimativa mais baixa da capacidade de armazenamento (GtCO <sub>2</sub> )	Estimativa mais alta da capacidade de armazenamento (GtCO <sub>2</sub> )
Campos de petróleo e gás	675 <sup>(a)</sup>	900 <sup>(a)</sup>
Veios de carvão não exploráveis (aperfeiçoar o metano de leitos de carvão)	3-15	200
Formações salinas profundas	1 000	Incertas, mas possivelmente 10 <sup>4</sup>

(a) Estas estimativas aumentariam em 25% se reservas ainda não descobertas fossem incluídas. Obs.: GtCO<sub>2</sub> diz respeito a giga toneladas de dióxido de carbono.

Fonte: IPCC, 2005.

Há várias razões para supor que o sequestro de dióxido de carbono possa ser permanente. A existência de reservatórios naturais de petróleo, gás e dióxido de carbono é, por si só, um indicativo. Mais evidências vêm da ampla experiência com métodos de injeção e armazenamento de fluidos no subsolo em outros contextos industriais e da experiência mais re-

30. A capacidade de armazenamento de dióxido de carbono disponível no subsolo não deve ser considerada uma quantidade fixa. Pelo contrário, o espaço poroso para armazenamento em formações sedimentares é como qualquer outra reserva mineral ou de combustível, em que a quantidade disponível ao longo do tempo provavelmente aumentará à medida que a ciência e a tecnologia se aperfeiçoarem e que aumente o preço que as pessoas estejam dispostas a pagar pelo recurso.

cente com vários projetos de demonstração preliminares. Por último, a existência de vários mecanismos de retenção naturais que, em conjunto, tendem a diminuir a probabilidade de vazamento ao longo do tempo, e os resultados de modelos de simulação em computador são razões para uma confiança maior na capacidade de garantir o armazenamento por longos períodos em reservatórios subterrâneos.

Em sua avaliação recente, o IPCC concluiu que a fração de dióxido de carbono retido em reservatórios geológicos adequadamente selecionados e geridos é “muito provavelmente superior a 99% por mais de 100 anos, e é provavelmente superior a 99% ao longo de 1 000 anos”(IPCC, 2005). A experiência passada indica também que os riscos associados com o sequestro geológico provavelmente serão administráveis, usando-se controles-padrão de engenharia, embora uma supervisão regulatória e novas capacidades institucionais possam ser necessárias para aumentar a segurança e para garantir estratégias sólidas para a seleção e o monitoramento dos locais. Usados em uma escala comparável às soluções industriais análogas existentes, os riscos associados à captura e sequestro de carbono são comparáveis aos das operações atuais de petróleo e gás.

Mesmo após o dióxido de carbono ser injetado, o acompanhamento de longo prazo será importante para assegurar a efetiva contenção e manter a confiança do público em instalações de sequestro. Embora o dióxido de carbono seja geralmente considerado seguro e não tóxico, é perigoso inalá-lo em concentrações elevadas e poderia representar riscos se acumulado em espaços muito baixos, confinados ou mal ventilados. A experiência passada sugere que o vazamento ou liberações na superfície têm maior probabilidade de ocorrer no local da injeção, ou em poços mais velhos, abandonados, que não foram devidamente lacrados; felizmente, existem vários métodos para a localização de tais vazamentos e o monitoramento dos poços de injeção. No entanto, a aceitação pública do sequestro de carbono no subsolo, em função do potencial de vazamento e riscos associados à segurança, poderia se tornar uma questão importante, especialmente nas primeiras fases da implementação, que terá de ser enfrentada.

O peso dos custos para a captura e sequestro de carbono podem ser divididos em custos de captura (que incluem secar e comprimir o dióxido

de carbono), de transporte do dióxido de carbono para os locais de armazenamento e de armazenagem. A revisão da literatura do IPCC de 2005 chegou a um custo médio total de US\$ 20 a US\$ 95 por tonelada de dióxido de carbono capturado e sequestrado, com base nas seguintes estimativas: os custos de captura vão de US\$ 15 a US\$ 75 por tonelada; os custos de transporte por gasodutos variam de US\$ 1 a US\$ 8 por tonelada (e de US\$ 2 a US\$ 4 por tonelada a cada 250 quilômetros de transporte por gasodutos em terra); custos de armazenamento geológico de US\$ 0,5 a US\$ 8 por tonelada (excluindo-se as oportunidades para recuperação avançada de petróleo); e custos de monitoramento que variam de US\$ 0,1 a US\$ 0,3 por tonelada.

## PROJETOS EXISTENTES E PLANEJADOS PARA CAPTURA E SEQUESTRO DE CARBONO

A primeira central comercial com esfregão de amina a empregar a captura de dióxido de carbono pós-combustão está em operação na Malásia desde 1999. Esta central recupera cerca de 200 toneladas de dióxido de carbono por dia para a fabricação de ureia (o equivalente à taxa de emissão de um queimador térmico a carvão de 41 megawatts). Uma central CCGI com captura de carbono ainda não foi construída e, como observado anteriormente, a experiência com sistemas a carvão CCGI para a geração de energia (mesmo sem captura e sequestro de carbono) permanece limitada. O primeiro exemplo de uma unidade CCGI com captura e sequestro será, provavelmente, uma unidade de 500 megawatts de eletricidade que irá gaseificar coque de petróleo na Refinaria Carson, no sul da Califórnia, e utilizar o dióxido de carbono capturado para recuperação avançada de petróleo nos campos de petróleo próximos, em terra. O projeto será conduzido pela *BP* e *Edison Mission Energy* e está previsto para entrar em operação no início da próxima década.

Em termos de sequestro geológico com a finalidade de evitar emissões de carbono na atmosfera, dois projetos em escala industrial estão em funcionamento hoje: um projeto de dez anos, no mar do Norte norueguês, e um projeto mais recente na Argélia. Espera-se que um terceiro



projeto na Noruega esteja em operação no final de 2007. (O sequestro geológico em escala industrial também está sendo implementado no projeto Weyburn, no Canadá, mas, nesse caso, para fins de recuperação avançada de petróleo.) Até agora, todos esses projetos têm operado com segurança, sem indicação de vazamentos. Planos para novos projetos de sequestro estão sendo anunciados a um ritmo de vários por ano, com projetos para novas utilizações em larga escala anunciados na Austrália, Noruega, Reino Unido e nos Estados Unidos (como parte do consórcio FutureGEN). Além disso, dezenas de projetos-piloto de sequestro em pequena escala estão em curso no mundo todo e outros são esperados. Por exemplo, o Departamento de Energia dos Estados Unidos patrocinou sete Parcerias Regionais de Sequestro para realizar 25 testes-piloto de sequestro em diferentes formações geológicas; testes-piloto semelhantes estão sendo realizados na Austrália, Canadá, Alemanha, Japão, Países Baixos e Polônia.

Olhando à frente, a recuperação avançada de petróleo pode oferecer as possibilidades mais promissoras, no curto prazo, para a captura e sequestro de carbono. O dióxido de carbono, principalmente a partir de fontes naturais, já está sendo utilizado para garantir um acréscimo na produção de petróleo de cerca de 200 000 barris por dia nos Estados Unidos. Isso já produziu uma experiência valiosa, em relação a muitos aspectos da tecnologia necessária para o êxito no transporte e sequestro – incluindo a experiência com gasodutos de dióxido de carbono. Em consequência, os custos das tecnologias necessárias para a captura de dióxido de carbono em grandes usinas elétricas ou outras instalações de energia já são baixos o suficiente para serem competitivos onde houver oportunidades de recuperação avançada de petróleo nas imediações (Williams e outros, 2006a e 2006b). O potencial econômico para a recuperação avançada de petróleo com o uso do dióxido de carbono é substancial (exemplo, o suficiente para garantir uma produção de 4 milhões de barris de petróleo por dia por 30 anos somente nos Estados Unidos). Embora a combinação da energia da gaseificação com projetos de recuperação avançada de petróleo nem sempre seja viável, esse nicho de oportunidade, contudo, poderia ser significativo o suficiente para ganhar ampla experiência inicial e diminuição de custos de tecnologias, tanto para a energia obtida da gaseificação quanto para

as tecnologias de captura e armazenagem de carbono, antes mesmo que uma política de mitigação das mudanças climáticas seja posta em prática.

### *Recursos não convencionais, incluindo os hidratos de metano*

A base mundial de recursos de petróleo e gás natural é consideravelmente maior se fontes não convencionais desses combustíveis forem incluídas (conforme observado na Tabela 3.1). No caso do petróleo, recursos não convencionais incluem petróleo pesado, areias betuminosas e xistos betuminosos. Calcula-se que, se esses recursos pudessem, a certa altura, ser economicamente recuperados de forma ambientalmente aceitável, o equilíbrio hemisférico dos recursos petrolíferos sofreria uma mudança substancial. O interesse na exploração dos recursos não convencionais tem crescido recentemente como consequência direta da elevação de preços do petróleo e do gás natural e em resposta às preocupações com a segurança energética, que aumentaram o interesse nas opções para diversificar o abastecimento mundial de petróleo e aumentaram a diferença entre a capacidade de produção disponível e a demanda. Atualmente, o Canadá está produzindo cerca de 1 milhão de barris por dia de petróleo não convencional a partir de areia betuminosa e a Venezuela começou a explorar suas grande reservas de petróleo pesado.

As tecnologias atuais de extração de petróleo não convencional talvez não sejam, no entanto, sustentáveis do ponto de vista ambiental. Dependendo do tipo de recurso a ser alcançado e das tecnologias utilizadas, os métodos de extração atuais são altamente energo-intensivos e, dessa forma, geram muito mais emissões de gases do efeito estufa em comparação com a produção de petróleo convencional. Em muitos casos, também produzem poluição substancial do ar, água e solo. A menos que possam ser desenvolvidas tecnologias para enfrentar esses impactos e que os custos ambientais da extração (incluindo, potencialmente, a captura e sequestro de carbono) sejam incluídos, é pouco provável que os esforços para desenvolver suprimentos de petróleo não convencional sejam ambientalmente sustentáveis.

Outras tecnologias relacionadas com combustíveis fósseis que poderão ter um impacto nas perspectivas de longo prazo para a oferta de combustíveis convencionais, com implicações potencialmente importantes para a segurança energética e os objetivos de sustentabilidade, incluem tecnologias para recuperação avançada de petróleo, aproveitamento de metano de leito de carvão, para alcançar “gás aprisionado” (gás natural que está preso em rochas duras, altamente impermeáveis, ou em arenito ou calcário não poroso) e para a gaseificação subterrânea de carvão.

A situação dos hidratos de metano é mais complexa e ainda é, por enquanto, mais especulativa, já que as tecnologias necessárias para explorar este recurso não foram demonstradas até agora. Hidratos ocorrem em determinadas condições de alta pressão e baixa temperatura, quando as moléculas de gás ficam presas em uma treliça de moléculas de água, formando uma estrutura sólida, similar ao gelo. Imagina-se que existam enormes depósitos de hidrato de metano na região ártica, tanto em terra quanto no mar, e em outros locais abaixo do solo oceânico (normalmente em profundidades variando entre 300 e 1 000 metros). Esses hidratos podem ser promissores como uma futura fonte de energia, tanto pelo enorme tamanho da base potencial de recursos, quanto porque o gás natural (metano) é um combustível de queima relativamente limpa, com menor densidade de carbono do que o petróleo ou o carvão. Ironicamente, no entanto, há também a preocupação de que os mesmos depósitos poderiam desempenhar um papel negativo, acelerando as mudanças climáticas se as temperaturas em elevação causarem a quebra dos hidratos, produzindo grandes liberações descontroladas de metano – um potente gás de aquecimento – diretamente na atmosfera.

Tecnologias de exploração de hidratos de metano estão em fase muito inicial de desenvolvimento. Como na produção convencional de petróleo, os métodos prováveis poderiam envolver despressurização, estimulação térmica, ou possivelmente injeção de solvente. O fato de hidratos serem estáveis somente dentro de uma estreita faixa de temperatura e condições de pressão torna o desafio mais complicado e tem o potencial de gerar consequências significativas não desejadas (exemplo, desestabilizando o leito do mar ou liberando acidentalmente grandes emissões

de metano na atmosfera). Atualmente, tanto as oportunidades como os riscos não são bem compreendidos, e tecnologias para acessar economicamente o metano aprisionado em hidratos que ocorrem naturalmente ainda não foram demonstradas na prática. No momento, o Japão lidera os esforços globais para corrigir essa lacuna e criou um consórcio de pesquisa visando desenvolver tecnologias viáveis para extração em escala comercial até 2016.

### *Em resumo: os combustíveis fósseis*

A dependência de combustíveis fósseis para satisfazer a maior parte das necessidades mundiais de energia está no cerne do desafio da sustentabilidade que confronta a humanidade neste século. A combustão de gás natural, petróleo e carvão gera emissões de dióxido de carbono, juntamente com outras formas prejudiciais de poluição atmosférica. O número cada vez maior de usinas a carvão poderá criar passivos climáticos consideráveis durante as próximas décadas. Ao mesmo tempo, a perspectiva de uma competição global mais acirrada e potencialmente desestabilizadora por suprimentos de petróleo e gás natural relativamente baratos e acessíveis está, novamente, gerando preocupações urgentes sobre a segurança energética em muitas partes do mundo. Enquanto isso, para muitos países pobres, gastos com petróleo e outros combustíveis importados consomem uma grande parte das divisas que poderiam ser utilizadas para investir em crescimento econômico e desenvolvimento social.

Nesse contexto, o problema fundamental em relação aos combustíveis fósseis não é, em primeiro lugar, o fato de serem escassos. O carvão, em especial, é relativamente barato e abundante ao redor do mundo e já está sendo visto como fonte alternativa de combustíveis substitutivos líquidos e gasosos, no contexto de mercados mais restritos e aumento dos preços de petróleo e gás natural. Infelizmente, a dependência crescente do carvão, com a utilização das tecnologias de hoje, aumentaria substancialmente os níveis crescentes de gases do efeito

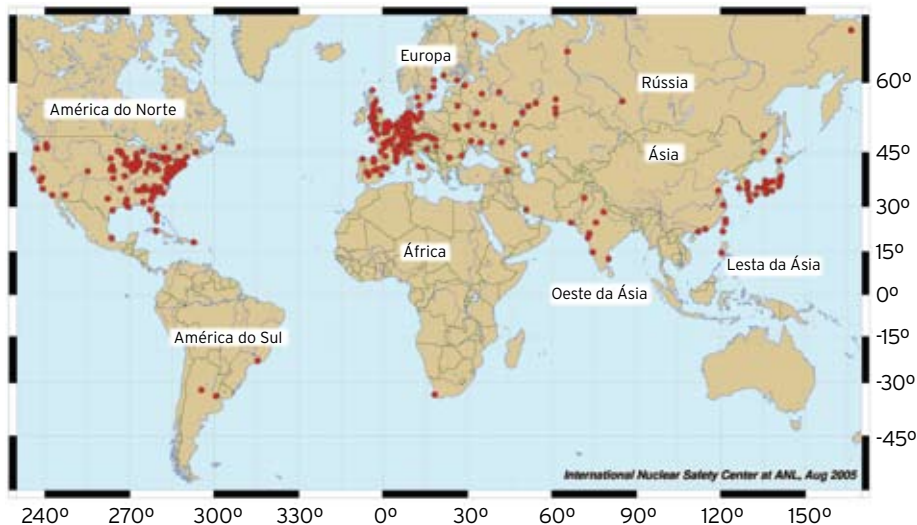
estufa na atmosfera, criando uma grande fonte de riscos ambientais (dadas as consequências potenciais do aquecimento global), bem como riscos sociais e econômicos.

A gestão desses riscos requer um foco urgente no desenvolvimento de alternativas econômicas, de baixo teor de carbono, aos combustíveis convencionais de hoje, juntamente com novas tecnologias para a utilização de combustíveis fósseis que reduzam, substancialmente, seus impactos negativos sobre a qualidade ambiental e a saúde pública. A disponibilidade de métodos custo-efetivos para a captura e armazenamento das emissões de dióxido de carbono, em especial, melhoraria enormemente as perspectivas de se atingirem os objetivos de sustentabilidade neste século e deveria ser o foco constante de esforços de pesquisa, desenvolvimento e implementação nos próximos anos. As tendências atuais de consumo de combustíveis fósseis, contudo, provavelmente não irão mudar sem uma guinada nas condições regulatórias e de mercado. As políticas governamentais devem ser realinhadas: subsídios para combustíveis convencionais já bem estabelecidos devem ser gradualmente eliminados, e deve ser introduzida uma firme sinalização de preços para emissões de gases do efeito-estufa evitadas – de magnitude suficiente para compensar as diferenças de custo para tecnologias de menor teor de carbono.

### 3.2 Energia nuclear

A energia nuclear supre aproximadamente 16% da demanda global de eletricidade e, juntamente com a energia hidrelétrica, representa a maior quota de geração de eletricidade a partir de fontes de energia sem emissão de carbono. Mais de 20 reatores estão agora em fase de construção ou serão modernizados ao longo dos próximos anos no Canadá, China, vários países da União Europeia, Índia, Irã, Paquistão, Rússia e África do Sul. A base atual de capacidade nuclear inclui 443 reatores com uma capacidade combinada de cerca de 365 gigawatts (Figura 3.4). A grande maioria dessas unidades (quase 80%) têm mais de 15 anos.

**Figura 3.4** Reatores nucleares existentes e previstos/propostos no mundo



Fontes: Centro Internacional de Segurança Nuclear, Argonne National Laboratory.

Embora a produção total de eletricidade e energia nuclear provavelmente cresça um pouco nesta década, refletindo o acréscimo da nova capacidade atualmente prevista ou em construção, espera-se que a contribuição nuclear total estacione daqui para a frente e até mesmo diminua um pouco ao longo das próximas duas décadas, à medida que haja mais usinas sendo desativadas do que acrescentadas em todo o mundo e à medida que o crescimento da produção das usinas nucleares caia em relação ao crescimento global da demanda por eletricidade. Em consequência, a mais recente previsão de caso de referência da IEA (Figura 3.5) indica que a participação da energia nuclear na produção global de eletricidade irá cair para apenas 12% até 2030. A estimativa da IEA para a produção nuclear total em 2030 é de um pouco menos de 3 000 terawatts-hora, apenas ligeiramente acima dos 2 500 terawatts-hora produzidos pela indústria em 2002. Essas projeções são mais ou menos consistentes com projeções publicadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) em 2004, que mostram que a contribuição da energia nuclear cairá para 13% a 14%

da produção mundial de eletricidade em 2030, com presunção de alto ou baixo crescimento<sup>31</sup>.

As expectativas atuais de produção nuclear, estacionária ou em declínio, refletem um pressuposto de que os altos custos iniciais e outros obstáculos<sup>32</sup> continuarão a ser uma desvantagem da energia nuclear em relação a outras opções para uma nova capacidade de gerar eletricidade, especialmente em relação às usinas convencionais a carvão pulverizado.

O interesse atual em inverter esta tendência e em apoiar uma expansão no papel da energia nuclear é o resultado, em grande parte, das considerações sobre as mudanças climáticas e do temor de que as outras opções que não geram carbono sozinhas – incluindo a eficiência energética, energia renovável e tecnologias fósseis avançadas com sequestro de carbono – não sejam suficientes para conciliar a expansão global da demanda por energia (especialmente a demanda crescente por eletricidade), com a necessidade de mitigação dos gases do efeito estufa. Por um lado, a tecnologia nuclear oferece vantagens importantes: pode proporcionar uma capacidade confiável de geração de eletricidade em larga escala;<sup>33</sup> não produz emissões de gases do efeito estufa ou gases poluentes atmosféricos convencionais, e os suprimentos de combustível nuclear, em forma de minério de urânio, são relativamente abundantes ao redor do mundo<sup>34</sup>.

---

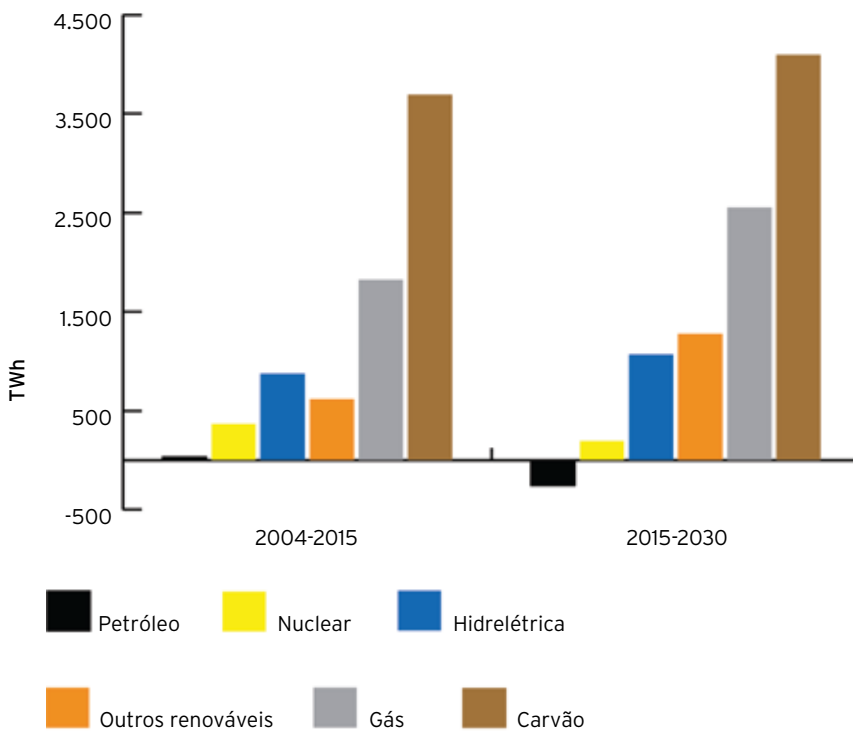
31. As projeções de alto crescimento da AIEA indicam uma capacidade nuclear de 592 gigawatts em 2030, comparada a 427 gigawatts nas projeções de baixo crescimento da AIEA. Como parcela na produção total de eletricidade, no entanto, a contribuição nuclear é, na realidade, ligeiramente menor no caso de alto crescimento (13%) do que no caso de baixo crescimento (14%). Isso porque a demanda total de eletricidade cresce ainda mais rapidamente do que a capacidade nuclear, no caso de crescimento elevado (AIEA, 2004).

32. Os custos de funcionamento de usinas nucleares são geralmente baixos em relação às centrais a combustíveis fósseis.

33. Em contrapartida, uma desvantagem das centrais nucleares em alguns contextos é que elas devem operar em uma capacidade de carga base. Uma possibilidade para utilizar a geração de energia nuclear durante as horas de baixo consumo seria fazer uso de outro vetor energético, como o hidrogênio. A produção de hidrogênio através da eletrólise poderia fornecer um meio de armazenar a energia nuclear livre de carbono em períodos de baixa procura.

34. A sustentabilidade do urânio como fonte de energia no longo prazo tem sido muito debatida, com alguns argumentando que suprimentos limitados de minério de baixo custo vão restringir a produção de energia nuclear neste século, caso não haja progresso no desenvolvimento de sistemas aceitáveis de ciclo fechado de combustível. As atuais condições do mercado sugerem, porém, que é pouco provável que a adequação dos suprimentos de urânio disponíveis seja um problema sério por enquanto. Por exemplo, um estudo do MIT (2003) concluiu que o suprimento

**Figura 3.5** Geração incremental de eletricidade projetada por tipo de combustível



Fonte: IEA, 2006.

Além disso, existe o potencial para utilizar a energia nuclear para a produção de hidrogênio para altas temperaturas, o que permitiria que a

mundial de minério de urânio era suficiente para a implementação de 1000 novos reatores nos próximos 50 anos e para abastecer esta nova frota de centrais ao longo de 40 anos de vida operacional. Além disso, os preços do urânio ao redor do mundo têm sido relativamente baixos e estáveis, e a distribuição geográfica das jazidas de urânio é tal que o combustível em si provavelmente será menos suscetível a cartéis, embargos ou instabilidade política. Caso restrições no fornecimento venham a provocar uma elevação dos preços do urânio, haveria um aumento imediato de exploração, provavelmente com um aumento substancial das reservas estimadas; opções de longo prazo também poderiam surgir para a extração de urânio, que é um elemento relativamente comum, a partir de fontes não convencionais, como a água do mar.



tecnologia atendesse a uma vasta gama de necessidades energéticas, além de produção de eletricidade. Planos para reatores “híbridos” que poderiam coproduzir hidrogênio e eletricidade já foram propostos.

Outros fatores que podem continuar a motivar alguns governos a apoiar a energia nuclear incluem as preocupações com a segurança energética, especialmente à luz da recente volatilidade nos mercados de petróleo e da percepção de que o desenvolvimento de uma capacidade nuclear nativa oferece um caminho para o avanço tecnológico, ao mesmo tempo que confere um certo *status* de “elite” entre os países industrializados do mundo. Por fim, os esforços para construir uma indústria nuclear nacional podem criar uma situação de ambiguidade útil para governos que desejem deixar em aberto a possibilidade de desenvolvimento de armas nucleares. Equipamentos associados (como laboratórios quentes), treinamento de operadores e experiência em questões de saúde e segurança são alguns exemplos óbvios do potencial de transferência da tecnologia da energia nuclear para capacitação em armas nucleares que está latente em qualquer programa de energia nuclear civil.

Mas a energia nuclear também sofre com vários problemas difíceis e bem conhecidos, que provavelmente continuarão a restringir futuros investimentos nesta tecnologia. Os principais obstáculos para investidores primários incluem custos iniciais elevados, dificuldades de localização e licenciamento, oposição pública e incertezas em relação a responsabilidades futuras quanto à eliminação de resíduos e desativação de usinas. Além dessas questões – e indissociavelmente interligadas a elas –, os especialistas concordam que as preocupações com a segurança dos reatores, eliminação de resíduos e proliferação de armas nucleares têm de ser solucionadas para que a tecnologia nuclear possa desempenhar um papel importante na transição para um *mix* energético global sustentável. Um outro obstáculo em muitas partes do mundo é a necessidade de significativos montantes de capital e a considerável capacidade institucional e os conhecimentos técnicos exigidos para construir com sucesso e operar com segurança as usinas nucleares.

Algumas dessas questões poderiam ser resolvidas se houvesse êxito no desenvolvimento da tecnologia de fusão nuclear (em oposição à

fissão), mas esta é uma perspectiva de longo prazo. Mesmo que a fusão nuclear, em última análise, se revele viável, é improvável que a tecnologia esteja disponível até meados do século ou mais tarde.

Em suma, as usinas nucleares são muito mais complexas que usinas elétricas movidas a combustíveis fósseis, e as consequências dos acidentes são piores. Na verdade, a potencial dependência de outros países por especialização tecnológica ou combustível nuclear pode desencorajar alguns governos a desenvolver a capacidade nuclear, ainda que um desejo pelo *status* tecnológico ou a segurança energética possam motivar outros na direção oposta. A decisão do Brasil na década de 1970 de não buscar uma relação com a Alemanha que teria levado a uma grande expansão da capacidade brasileira em energia nuclear foi impulsionada por esse tipo de reflexão.

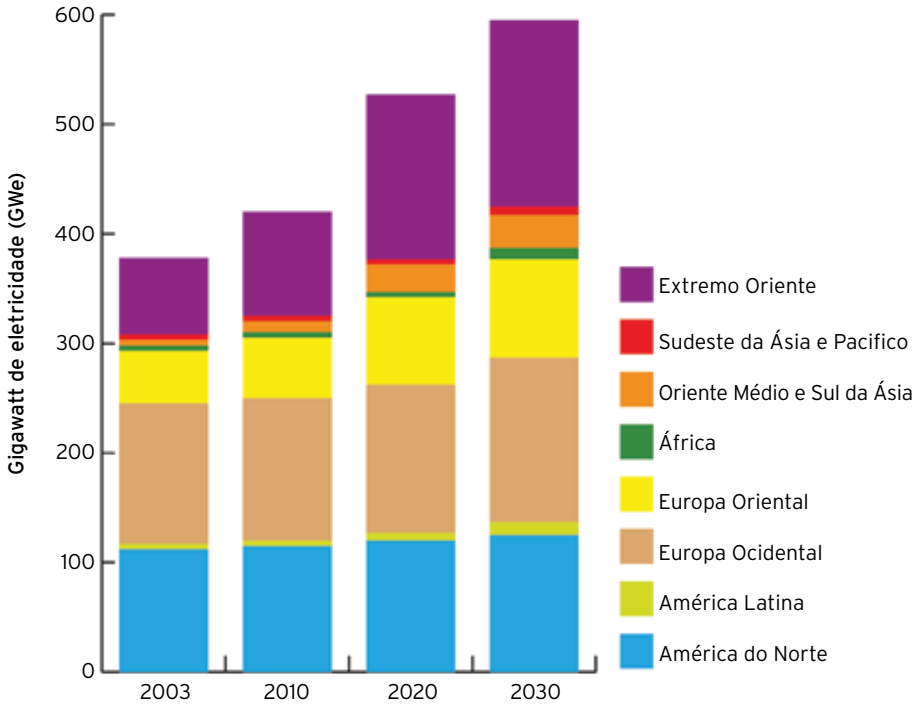
Os planos atuais, de curto prazo, para expandir a capacidade de geração nuclear estão centrados, em grande parte, na Ásia, com a Índia, a China e o Japão liderando em termos do número de novas instalações propostas ou em construção. Cada vez mais esses países e outros estão interessados em desenvolver e construir seus próprios projetos de reatores. A Figura 3.6 mostra o detalhamento regional da nova capacidade nuclear nas projeções para alto crescimento da AIEA de 2004 para 2030. De acordo com essa figura, o maior aumento na capacidade nuclear (em termos de gigawatts acrescentados) irá ocorrer no Extremo Oriente, enquanto o crescimento mais forte, em termos percentuais, irá ocorrer no Oriente Médio e Sul da Ásia. A capacidade aumenta também, embora menos acentuadamente, nos países do Leste da Europa e na Europa Ocidental, mas permanece essencialmente estável na América do Norte.

A maior parte das novas instalações que podem entrar em operação nos próximos anos incorpora modificações substanciais e aperfeiçoamentos nos projetos de reatores existentes, incluindo características de segurança que simplificam os requisitos de resfriamento em caso de acidente. Espera-se que esses projetos, portanto, (embora isso ainda não tenha sido demonstrado) tenham um desempenho mais confiável em termos de segurança, a um custo total menor.<sup>35</sup> Já estão sendo feitos esforços

---

35. A maioria das centrais que se encontram atualmente em construção ou que tenham come-

**Figura 3.6** Distribuição regional da capacidade nuclear global na projeção alta da AIEA



Fonte: AIEA, 2004; McDonald, 2004.

para desenvolver uma terceira geração de modelos de reator nuclear que seriam “passivamente seguros”, nos quais a possibilidade de derretimento do núcleo seria (quase) impossível, mesmo na eventualidade de perda total de operação dos sistemas de controle do reator (Quadro 3.1). A quarta geração de reatores poderia, além de incorporar características de

çado a operar recentemente usa projetos de reator GEN III +. Eles são considerados seguros, passivamente, porque normalmente dependem da gravidade, circulação natural e ar comprimido para fornecer refrigeração para o núcleo do reator e estrutura de contenção, no caso de um acidente grave. Comparados com sistemas ativamente seguros utilizados nos reatores existentes, esses modelos requerem menos válvulas, bombas, tubos e outros componentes. Note-se que reator modular de leito de seixos refrigerado a gás é classificado como um modelo GEN III +, mas é seguro, mesmo na ausência de qualquer elemento refrigerante.

segurança passiva, conseguir novos aperfeiçoamentos em termos de custo e desempenho, reduzindo também as exigências para eliminação dos resíduos, minimizando as necessidades de combustível e/ou reciclando o combustível gasto.

Em 2002, dez países e a União Europeia constituíram o Fórum Internacional de Geração IV (GIF) para promover a colaboração internacional no desenvolvimento de uma quarta geração de usinas nucleares<sup>36</sup>. Depois de mais de dois anos de estudo, cada nação participante concordou em assumir a liderança na exploração de pelo menos um dos vários tipos de reatores para potencial implementação até 2030. Os tipos de reator identificados pelo GIF como os mais promissores incluem o reator a gás de alta temperatura, o reator supercrítico a água, o reator rápido refrigerado a chumbo, o reator rápido refrigerado a sódio, o reator rápido refrigerado a gás e o reator de sal derretido. Além disso, outros projetos potenciais têm sido estudados ou desenvolvidos nos últimos anos, incluindo projetos de reatores menores, modulares e até mesmo transportáveis, bem como modelos voltados para a produção de hidrogênio.

Até agora, nenhum dos projetos propostos para a quarta geração de reatores foi construído, embora um certo número de países estejam prosseguindo ativamente com os esforços de pesquisa e desenvolvimento e tenham adotado políticas destinadas a facilitar a construção de novas usinas. Mesmo quando muitos dos novos modelos oferecem vantagens importantes em relação às gerações mais antigas de reatores – pelo menos no papel –, as perspectivas de longo prazo da indústria continuam incertas. O restante desta seção fornece mais detalhes sobre os desafios específicos que confrontam a energia nuclear e analisa as perspectivas atuais para enfrentar esses desafios com novos aperfeiçoamentos em projetos de reatores e tecnologia nuclear.

---

36. Os Estados Unidos lideraram a formação do GIF, que também inclui a União Europeia, Argentina, Brasil, Canadá, França, Japão, Coreia do Sul, África do Sul, Suíça e Reino Unido. A Rússia não foi incluída, devido a divergências a respeito da assistência ao programa nuclear do Irã. No entanto, a Rússia deu início a um programa separado para tratar do desenvolvimento de reatores avançados: o Projeto Internacional de Reatores Nucleares Inovadores e Ciclos Combustíveis da AIEA.

## Desafios para a energia nuclear

A fusão nuclear continua a ser uma alternativa distante às tecnologias de fissão. Na fusão nuclear, a energia é produzida pela fusão do deutério e do trítio, dois isótopos de hidrogênio, para formar hélio e um nêutron.

Quantidades efetivamente ilimitadas dos combustíveis primários, deutério e lítio (a partir do qual o trítio é produzido), estão facilmente disponíveis. Devido ao baixo inventário de combustíveis, uma reação incontrolável ou o derretimento de um sistema de fusão não são possíveis. Resíduos radioativos provenientes de fusão se deterioram em 100 anos em níveis de atividade semelhante à do carvão. O risco de proliferação da fusão é mínimo, uma vez que quaisquer materiais férteis seriam facilmente detectáveis.

### Quadro 3.1 Quatro gerações de reatores nucleares

As primeiras usinas nucleares a serem desenvolvidas, muitas de pequeno porte, são agora chamadas reatores Geração I (GEN I). Talvez os únicos reatores GEN I ainda em funcionamento sejam seis pequenas usinas (de menos de 250 megawatts de eletricidade) refrigeradas a gás no Reino Unido. Todos os outros foram desligados.

A maioria dos reatores em funcionamento hoje é de reatores Geração II. Concebidos no final dos anos 1960 e 1970, são de dois tipos principais: reatores de água pressurizada (PWR, na sigla em inglês) ou reatores de água fervente (BWR). Reatores GEN II têm atingido um nível elevado de confiabilidade operacional, principalmente através do aperfeiçoamento constante de suas operações.

Reatores Geração III foram concebidos na década de 1990, visando à diminuição dos custos e padronização dos projetos. Foram construídos, nos últimos anos, na França e no Japão. Projetos mais recentes são rotulados como reatores GEN III + e provavelmente serão construídos nos próximos anos. Exemplos típicos são o reator avançado de água fervente (ABWR), no Japão, o novo reator PWR, na Coreia, o reator evolucionário (EPR, em inglês), na França, e o reator econômico de água fervente simplificado (ESBWR) e o AP-1000 (avançado passivo), nos Estados Unidos.

O reatores GEN III + de água leve (LWR) são baseados em tecnologia comprovada,

mas com aperfeiçoamentos significativos e, no caso do AP-1000 e ESBWR, com sistemas de emergência passivos de refrigeração que substituem os sistemas convencionais a eletricidade. O documento World Energy Assessment de 2004 menciona, especificamente, o reator modular de leito de seixos (PBMR) como um conceito de projeto que está sendo retomado, devido ao potencial para um elevado grau de segurança inerente e a oportunidade para operar em um ciclo de combustível de urânio desnaturado e tório resistente à proliferação. O PBMR também é considerado um reator GEN III +. Os sistemas GEN III + provavelmente serão o modelo utilizado na próxima expansão da energia nuclear (UNDP, Undesa e WEC, 2004).

Nenhum dos “reatores avançados” Geração IV foi construído e nenhum está perto de ser construído. O GEN IV é amplamente reconhecido como um programa de P&D para reatores com recursos avançados que vão muito além de GEN III + LWR. Reatores GEN IV estão sendo preparados para o futuro, começando em 2035 a 2040. Enquanto os tipos anteriores de reator progrediam de forma evolutiva, projetos de reatores GEN IV buscam mudar significativamente a natureza da energia nuclear, seja incorporando conceitos de alta temperatura e alta eficiência, seja propondo soluções que aumentem significativamente a sustentabilidade da energia nuclear (redução de resíduos; aumento da utilização dos recursos naturais).

Seis tipos de reator estão sendo estudados por um grupo de dez países: o reator de temperaturas muito elevadas, que utiliza refrigeração a gás, pode alcançar altos níveis de eficiência termodinâmica e apoiar a produção de hidrogênio; o reator a água supercrítico, que também permite maior eficiência e reduz a produção de resíduos; três reatores rápidos de nêutron, refrigerados a gás (reator rápido a gás), chumbo (reatores rápidos de chumbo) ou sódio (reatores rápidos de sódio), que fazem uso de ciclos fechados de combustível, e o reator de sal fundido. Tanto os reatores rápidos de temperatura muito elevada como os de gás podem usar combustível do tipo seixo.

Os futuros sistemas nucleares, tais como os que são estudados no programa GEN IV e a Iniciativa para Ciclo de Combustível Avançado, têm por objetivo tornar a energia nuclear mais sustentável, ou através de um aumento de eficiência do sistema ou utilizando ciclos fechados de combustível, em que os resíduos nucleares são parcial ou totalmente reciclados. Outro objetivo para esses sistemas é a redução de custos de capital e operacionais. Desafios científicos e técnicos significativos devem ser solucionados antes que esses sistemas estejam prontos para implementação:

- materiais de alta fluência a temperaturas elevadas (ou seja, materiais não danificados seriamente por fluxos de nêutrons ultraelevados);

- combustíveis que possam conter quantidades elevadas de actínídeos menores precisam ser demonstrados;
- novas tecnologias para o transporte de calor e geração de eletricidade com pegadas menores do que os ciclos de vapor atuais;
- tecnologias de separação que ofereçam alta resistência à proliferação e produzam um mínimo de resíduos;
- modelos mais compactos que reduzam custos de capital.

Para atingir esses objetivos ambiciosos, uma estratégia de pesquisa de três eixos está sendo implementada nos Estados Unidos:

- 1) O papel das ciências básicas está sendo realçado. As ferramentas atuais de pesquisa empírica devem ser gradualmente eliminadas e substituídas por técnicas modernas.
- 2) O papel da simulação e modelagem passará a ser central, quando a atual geração de *softwares* - desenvolvidos em grande parte na década de 1980 - for substituída por ferramentas de alto desempenho. Pode-se esperar que algumas das principais dificuldades, como, por exemplo, o desenvolvimento de combustíveis avançados, possam ser solucionadas de forma mais eficiente, uma vez que essas ferramentas estejam em uso.
- 3) O processo de concepção será simplificado e otimizado.

Investigações sobre o possível desenvolvimento comercial da energia de fusão incluem fusão inercial e as diversas formas de confinamento magnético de plasma de alta temperatura. A pesquisa atual está centrada em confinamento magnético em geometrias toroidais (em forma de rosca) e confinamento inercial induzido a laser. As experiências laboratoriais em *tokomaks* – máquinas que produzem um campo magnético toroidal para confinar plasma – têm produzido 10 megawatts de calor de fusão por cerca de 1 segundo. O projeto Iter (Iter significa “o caminho”, em latim), uma colaboração da China, Europa, Índia, Japão, Rússia, Coreia do Sul e Estados Unidos, poderá produzir 500 megawatts de calor de fusão por mais de 400 segundos. Em paralelo com o Iter, há pesquisas planejadas para obter mais potência e operação contínua, além de desenvolver materiais e componentes avançados que possam suportar altos fluxos de nêutrons. Alguns parceiros do Iter preveem usinas de

demonstração de energia a fusão para 2035, aproximadamente, e de comercialização para 2050.

## CUSTO

Embora os custos operacionais de muitas das atuais usinas nucleares sejam bastante baixos, o custo verdadeiro do aporte de capital inicial para a construção de uma nova unidade é maior do que o custo de novas tecnologias de geração de eletricidade com queima de combustíveis fósseis<sup>37</sup>. Reduções de custo poderiam contribuir para melhorar a competitividade da energia nuclear em termos de custos reais, nivelados em centavos por quilowatt-hora, em relação a outras opções (Tabela 3.3).<sup>38</sup> Projeções de custo futuro para energia nuclear são, evidentemente, altamente incertas, especialmente no caso de projetos de reatores avançados que ainda têm de ser construídos ou colocados em operação em qualquer parte do mundo. Em alguns países, além disso, as incertezas sobre o custo provavelmente serão agravadas pelo potencial para atrasos e dificuldades na determinação do local, licenciamentos e construção. Por todas essas razões, os mercados financeiros privados em muitas partes do mundo tenderão a atribuir um prêmio de risco substancial aos novos investimentos em energia nuclear por algum tempo ainda.

---

37. Em termos de valor líquido atual, 60% a 75% do custo do ciclo de vida da energia nuclear pode ser *front-loaded*, isto é, os custos de aporte inicial de capital são muito superiores aos custos de operação no longo prazo. Limitações de capital podem, portanto, representar um importante obstáculo para investimentos em centrais nucleares, especialmente considerando-se a aversão ao risco dos mercados financeiros privados e de grande parte da indústria de energia elétrica.

38. Como é também o caso de muitas outras tecnologias da energia, é enganoso simplesmente tirar a média do desempenho das antigas e novas tecnologias nucleares. A forma correta de avaliar opções tecnológicas em termos de sua contribuição potencial para o desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis daqui para a frente é usar características típicas do desempenho do tipo “melhor de sua categoria”, que poderiam ser os 10% ou 15% que estão no nível mais alto de desempenho. Nos últimos anos, as modernas centrais de energia nuclear têm alcançado fatores de capacidade superiores a 90%, um aperfeiçoamento significativo em relação aos 75% a 85% dos fatores de capacidade que foram, em certa época, mais típicos da indústria. Este aperfeiçoamento no desempenho das usinas tem um impacto significativo sobre a economia da energia nuclear.



---

**Tabela 3.3 Custos comparativos de energia**

---

Caso	Custo real nivelado (US\$ centavos/ kW <sub>e</sub> h)
Nuclear (reator de água leve)	6,7
• Reduz o custo de construção em 25%	5,5
• Reduz o tempo de construção de cinco para quatro anos	5,3
• Reduz ainda mais as operações e gerenciamento 13 milhões por kW <sub>e</sub> h	5,1
• Reduz o custo de capital em relação a gás/carvão	4,2
Carvão pulverizado	4,2
TGCC (preços de gás baixos, US\$ 3,77 por MCF)	3,8
TGCC (preços de gás moderados, US\$ 4,42 por MCF)	4,1
TGCC (preços de gás altos, US\$ 6,72 por MCF)	5,6

---

Obs.: Os custos do gás refletem os custos de aquisição reais, nivelados, por mil pés cúbicos (MCF, na sigla em inglês) ao longo da vida econômica do projeto. TGCC se refere a turbina a gás de ciclo combinado; kW<sub>e</sub> h refere-se a quilowatts-hora de eletricidade. Os valores são para o dólar em 2002.

Fonte: MIT, 2005.

---

Obviamente, uma série de desenvolvimentos poderia alterar o quadro do custo relativo para a energia nuclear. Outros aperfeiçoamentos tecnológicos, maior aceitação pública e certezas quanto a marcos regulatórios, e os progressos no enfrentamento da questão da eliminação de resíduos produziram estimativas de custos mais baixos, e, o que talvez seja ainda mais importante, alterariam as percepções atuais a respeito dos riscos de investimento.<sup>39</sup> O desenvolvimento bem sucedido de projetos de reatores simplificados, padronizados – o que agilizaria o licenciamento e a construção – poderia melhorar bastante as perspectivas da indústria. A energia nuclear também seria mais competitiva no caso de limitações impositivas de carbono e/ou se os preços dos combustíveis fósseis subirem. Se uma limitação de carbono iria ou não, por si só, pro-

---

39. Há uma grande diferença de opinião, mesmo entre os observadores bem informados, em relação a qual dessas preocupações com a energia nuclear (gestão de resíduos, proliferação, o risco de acidentes etc.) seria a mais importante.

duzir uma mudança significativa em direção à energia nuclear dependeria, obviamente, da magnitude da sinalização de preços e do custo de outras alternativas com teor baixo ou nulo de carbono, incluindo as fontes renováveis de energia, carvão com captura e sequestro de carbono e tecnologias altamente eficientes do gás natural. Sem a presença de um limite de carbono ou imposto sobre o carbono e/ou intervenção governamental ativa, na forma de partilha dos riscos e/ou subsídios financeiros, a maioria dos especialistas conclui que é improvável que o setor privado faça investimentos substanciais no curto prazo em tecnologia nuclear e outras alternativas com teor baixo ou nulo de carbono – especialmente no contexto de mercados de energia cada vez mais competitivos e desregulamentados.

Uma análise da IEA sobre a economia nuclear mostra que vários governos da OCDE já subsidiam a indústria nuclear, provendo serviços de fornecimento de combustível, descarte de resíduos, reprocessamento de combustível e financiamento para P&D. Muitos governos também limitam a responsabilidade dos proprietários de usinas, no caso de um acidente, e auxiliam na reparação. Um caso recente é o *US. Energy Policy Act* de 2005, que contém subsídios substanciais e incentivos fiscais para uma nova geração de usinas nucleares. Ainda não se sabe se esses incentivos serão suficientes para estimular uma nova rodada de construção de usinas nucleares nos Estados Unidos; nesse meio tempo, é provável que as perspectivas imediatas de expansão da capacidade de energia nuclear permaneçam concentradas nas economias em rápido crescimento da Ásia, notadamente a China e a Índia.

## SEGURANÇA DAS INSTALAÇÕES E DESCARTE DE RESÍDUOS

Os acidentes de Three Mile Island, em 1979, e Chernobyl, em 1986, bem como os acidentes em instalações de ciclo de combustível no Japão, Rússia e Estados Unidos tiveram um efeito duradouro sobre a percepção pública a respeito da energia nuclear e ilustram alguns dos riscos ao meio ambiente, à segurança e à saúde inerentes à utilização dessa tecnologia.

Já que um projeto de usina nuclear totalmente isenta de riscos, como em praticamente todos os campos de empreendimento humano, é altamente improvável, o papel da energia nuclear tem de ser avaliado com uma análise mais completa dos riscos e benefícios em que pesem todos os fatores, inclusive os impactos ambientais das diferentes opções energéticas, seus riscos e benefícios de segurança energética, bem como a probabilidade de futuros aperfeiçoamentos tecnológicos.

Um outro desafio é a formação do pessoal habilitado necessário para se construir e operar com segurança as instalações nucleares, incluindo não apenas os reatores de água leve existentes, mas também reatores GEN III mais seguros. O desafio de desenvolver competências adequadas e conhecimentos especializados é mais significativo no caso dos reatores GEN IV, os quais: (a) são muito diferentes dos reatores GEN III,<sup>40</sup> (b) apresentam questões mais difíceis de segurança e de proliferação e (c) exigem considerável especialização para projetar, construir e operar.

Nos últimos anos, evidentemente, a ameaça do terrorismo acrescentou uma dimensão nova e potencialmente mais complexa às preocupações de longa data sobre a operação segura de instalações nucleares e o transporte de materiais nucleares. Embora o registro de segurança de reatores de água leve, que predominam na base existente da energia nuclear do mundo seja, em geral, muito bom, Chernobyl permanece como “um poderoso símbolo de quanto as consequências de um acidente nuclear podem ser graves e persistentes”, ainda que a probabilidade de tais acidentes seja baixa (Porritt, 2006). Em resposta a potenciais ameaças terroristas, muitos países têm implementado medidas adicionais de segurança nas usinas nucleares existentes; concepções inovadoras de reatores – possivelmente incluindo instalações que possam ser construídas

---

40. Centrais GEN IV são reatores rápidos de nêutrons que operam num espectro de energia de aproximadamente 1Mev nêutron. Sendo assim, são muito diferentes dos reatores GEN III, que utilizam nêutrons térmicos. Em Reatores GEN IV, a densidade de energia é mais elevada e a refrigeração é muito mais crítica. As centrais GEN III e IIIa podem ser construídas de forma a serem muito seguras. Nas projeções atuais da razão entre centrais GEN III e GEN IV, a relação necessária para chegar ao estado constante de queima de resíduos nucleares de longa vida é de cerca de quatro para um. Embora reatores GEN III possam ser implantados mais amplamente, centrais GEN IV apresentam questões mais significativas de segurança e proliferação.

no subsolo ou que tenham sido reforçadas e equipadas com recursos de segurança passiva para suportar ataques externos e sabotagem interna – podem ajudar a aliviar as preocupações do público sobre vulnerabilidades específicas associadas a instalações nucleares. Um dos pontos a favor de uma nova geração de reatores de leito de seixos é que podem ser construídos no subsolo.

O descarte de combustível usado altamente radioativo, na escala em milênios que é o período de tempo em que os resíduos nucleares podem representar um risco para a segurança pública e a saúde humana, é um outro problema que há muito tem atormentado a indústria e ainda tem de ser totalmente solucionado em qualquer país com um programa ativo de energia nuclear em operação comercial. Embora o descarte de longo prazo em repositórios geológicos estáveis seja tecnicamente viável, nenhum país chegou a concluir ou começou a operar tais depósitos. Atualmente, a Finlândia é o país mais próximo de implementar esta solução. Sem um consenso sobre armazenamento dos resíduos no longo prazo, várias estratégias intermediárias têm surgido. Incluem o armazenamento de combustível usado, temporariamente, na própria usina, por exemplo, utilizando o método de recipientes blindados; ou, em alguns países, o reprocessamento ou reciclagem do combustível usado para remover os produtos da fissão e separar o urânio e o plutônio para reutilização no combustível do reator. O reprocessamento reduz a quantidade de resíduos em mais de uma ordem de grandeza e tem o potencial de reduzir o tempo de armazenamento em várias ordens de grandeza; mas, mesmo após o reprocessamento, centenas de anos de armazenamento seguro são necessários. O reprocessamento também gera preocupações significativas com a proliferação, uma vez que gera quantidades de plutônio – o ingrediente essencial em armas nucleares – que devem ser guardadas em segurança para evitar o roubo ou desvio para fins relacionados a armas.

Na verdade, os riscos da proliferação são uma grande preocupação em todos os atuais modelos de reator de “ciclos fechados de combustível”, especialmente para o chamado “reator procriador”, que exige o reprocessamento de combustível usado para separar e reciclar plutônio que possa

ser usado em armas. Um estudo interdisciplinar sobre a energia nuclear do MIT (2003), que analisou as implicações da gestão de resíduos tanto em ciclos *once through* como em ciclos fechados de combustível, concluiu que nenhuma “defesa convincente pode ser feita, somente com base nas considerações de gestão de resíduos, de que os benefícios da separação e transmutação superem os riscos ambientais e de segurança inerentes, além dos custos econômicos”. Outros especialistas discordam e acreditam que as preocupações ambientais e de segurança associadas aos ciclos fechados de combustível podem ser solucionadas tecnicamente. Eles enfatizam que reatores rápidos de nêutrons multiplicariam por 100 os suprimentos de urânio e permitiriam a utilização de tório, ao mesmo tempo que se reduziria a quantidade de resíduos com que lidar. Com base nessas vantagens, argumentam que esforços conjuntos de pesquisa devem ser envidados para ver se tais reatores podem fazer parte das soluções de energia deste século.

Considerando que o urânio é relativamente abundante e barato atualmente, e uma vez que os benefícios da redução dos resíduos pelo reprocessamento de combustível usado não parecem superar os riscos de proliferação, ciclos de combustível *once through* provavelmente continuarão a ser a opção mais segura, pelo menos nas próximas décadas, embora pesquisas que possam conduzir a soluções técnicas venham a mudar o cenário. Os projetos mais recentes de reatores tendem a exigir menos combustível por quilowatt-hora gerado; uma taxa maior de queima total, por sua vez, reduz a quantidade de resíduos que restam para serem administrados no final do ciclo do combustível. É o caso dos projetos mais recentes de reatores de seis meses, embora as pastilhas usadas nesses projetos exijam níveis muito mais altos de enriquecimento de urânio.

Enquanto isso, tensões políticas aparentemente irreduzíveis continuam a inibir soluções para o problema do descarte de resíduos nucleares em todo o mundo. Meio século atrás, a indústria nuclear impôs a si própria um padrão de gerenciamento de resíduos que alguns especialistas acreditam ser irrealizável. A indústria concordou que iria gerir resíduos nucleares de tal forma que não haveria impacto discernível sobre as gerações futuras por um período que muitas vezes chegava a 10.000 anos. Com a

compreensão sobre a geologia adquirida desde então, essa tarefa poderia ter-se tornado mais fácil. Na verdade, tornou-se mais difícil. Parece haver poucas perspectivas de que o objetivo inicial possa ser atingido nesta geração, embora talvez possa ser alcançado em uma ou duas gerações a partir de agora.

Com essa percepção, está começando a surgir um consenso entre os especialistas de que o objetivo do armazenamento dos resíduos deveria se deslocar do armazenamento irrecuperável para recuperável. Em outras palavras, os resíduos seriam armazenados com a expectativa de que se volte a lidar com eles dentro de algumas décadas. Nos Estados Unidos e em outros países a atenção tem se voltado, recentemente, para a tecnologia de armazenamento em recipientes blindados, que possam manter resíduos nucleares termicamente seguros por períodos de tempo da ordem de meio século. Uma mudança nos objetivos de gerenciamento de resíduos de energia nuclear, embora cada vez mais discutida em círculos de especialistas, não foi, contudo, proposta de forma ampla ao público em geral e exigiria alterações na estrutura legal que rege a gestão de resíduos nos Estados Unidos. Essa estrutura pode representar um grande obstáculo no curto prazo, nos Estados Unidos e em outras partes do mundo.

Outros países, enquanto isso, continuaram a se concentrar no reprocessamento de combustível usado e no armazenamento geológico de longo prazo como principais estratégias para gestão de resíduos. Em 2006, a França, por exemplo, aprovou legislação que (a) formalmente declara o descarte geológico profundo como a “solução de referência” para resíduos radioativos de alto nível e de vida longa, (b) estabelece 2015 como a data-alvo para o licenciamento de um repositório e (c) estabelece 2025 como a data-alvo para a abertura de um repositório de longo prazo<sup>41</sup>. Nesse interim, alguns especialistas têm sugerido que se os países

---

41. De acordo com a Associação Nuclear Mundial (WNA, 2007), as leis francesas também afirmam o princípio do reprocessamento de combustível usado e o uso do plutônio reciclado em combustível de óxidos mistos (MOX) 89 a fim de reduzir a quantidade e toxicidade dos resíduos finais e solicitam a construção de um reator-protótipo de quarta geração até 2020 para testar a transmutação de actínídeos de longa vida.

pu dessem chegar a um consenso sobre a implementação de instalações internacionais para fornecer o serviço de reprocessamento de combustível usado e de enriquecimento de urânio em um ambiente altamente seguro e transparente, esta opção poderia ser muito útil para enfrentar tanto as preocupações com a proliferação quanto as questões de gestão de resíduos. Até que essa ou outras soluções de longo prazo possam ser encontradas, no entanto, a questão dos resíduos provavelmente continuará a representar um obstáculo considerável, e talvez um problema insolúvel, à significativa expansão da capacidade comercial da energia nuclear em todo o mundo.

### **Proliferação nuclear e aceitação pública**

O desenvolvimento e a utilização da tecnologia nuclear para produção comercial de energia tem, há muito tempo, gerado a preocupação de que os conhecimentos ou materiais associados poderiam ser desviados para fins não pacíficos. Até agora, nenhum programa nuclear civil foi diretamente relacionado ao desenvolvimento de armas nucleares, mas existe o risco de que programas comerciais de energia nuclear possam ser utilizados como “cobertura” para atividades ilícitas relacionadas a armas ou como fonte (voluntária ou involuntariamente) de urânio ou de plutônio altamente enriquecido necessário para construir armas nucleares. Na Índia e na Coreia do Norte, reatores nominalmente destinados à pesquisa civil foram utilizados para produzir plutônio para armas. Preocupações com a proliferação se aplicam mais fortemente ao enriquecimento de urânio e a elementos do reprocessamento de combustível usado de um programa civil de energia nuclear. Como a American Physical Society ressaltou, “reatores nucleares por si sós não são o principal risco de proliferação; a principal preocupação é de que os países com a intenção de proliferar podem, dissimuladamente, usar as usinas de enriquecimento ou de reprocessamento para produzir os materiais essenciais para um explosivo nuclear” (APS, 2005: i).

O regime internacional atual para gerenciamento de riscos de proliferação é amplamente considerado inadequado e seria ainda mais pressio-

nado por uma expansão significativa da energia nuclear em mais países, com condições de segurança que variam enormemente. Aqui, mais uma vez, importa qual é a tecnologia que está sendo implantada: os riscos apresentados por reatores GEN III são muito diferentes e provavelmente serão mais administráveis do que os que seriam representados pela implementação internacional de sistemas rápidos de nêutrons. Dado o impacto devastador que até mesmo uma única arma nuclear, associada a um programa civil de energia nuclear, poderia ter, as salvaguardas internacionais atuais precisarão, claramente, ser reforçadas. Os esforços para desenvolver tecnologias resistentes à proliferação, especialmente para o enriquecimento e reprocessamento de combustível, também merecem alta prioridade. O aumento da colaboração internacional é necessário para explorar opções para enfrentar as necessidades de enriquecimento e reprocessamento de forma a minimizar os riscos de proliferação e à segurança pública. Em especial, composições multilaterais mais fortes – incluindo instalações que enriqueceriam e reprocessariam combustível para utilização por vários países, com supervisão multinacional, talvez em combinação com garantias internacionais de abastecimento – poderiam ajudar a enfrentar as preocupações com proliferação.

Em alguns países, é provável que a aceitação pública continue a representar um desafio significativo para a energia nuclear, embora futuros acréscimos à capacidade de instalações já existentes possam aliviar as dificuldades de implementação. As percepções públicas podem mudar ao longo do tempo, naturalmente, e podem tornar-se mais propensas a aceitar a energia nuclear, à medida que crescem as preocupações com as mudanças climáticas e os países e comunidades começam a se familiarizar com sistemas de energia nuclear. No entanto, mesmo que o clima da opinião em torno da energia nuclear já mostre sinais de mudança, o público provavelmente não perdoará qualquer acidente ou atentado envolvendo sistemas civis de energia nuclear. Um único incidente em qualquer lugar lançaria uma mortalha sobre a energia nuclear onde quer que existisse. Um crescimento substancial tanto no número de usinas em funcionamento em todo o mundo quanto na quantidade de combustível transportado e manuseado para o enriquecimento, reprocessamento ou descarte de re-



sídios inevitavelmente aumenta o risco de que alguma coisa, algum dia, dê errado, mesmo que a probabilidade de qualquer evento isolado seja extremamente baixa. Em consequência, alguns especialistas calculam que um novo aumento, em ordem de grandeza, da segurança dos reatores, juntamente com avanços substanciais internacionais para enfrentar as preocupações atuais com a proliferação, será necessário para garantir a aceitação pública diante um programa de energia nuclear que se expandiu significativamente ao redor do mundo. Enquanto isso, parece claro que os desafios fundamentais para a energia nuclear são políticos e sociais, tanto quanto ou talvez até mais do que tecnológicos ou científicos.

### Em resumo: A energia nuclear

Com base na discussão precedente, não se chega a nenhuma conclusão definitiva em relação ao futuro papel da energia nuclear, exceto que é improvável que um renascimento global da energia nuclear comercial venha a se materializar ao longo das próximas décadas sem: o apoio substancial dos governos; esforços efetivos para promover a colaboração internacional (especialmente para lidar com as preocupações a respeito da segurança, resíduos e proliferação); mudanças na percepção pública; e a imposição de restrições aos gases do efeito estufa, que tornariam as tecnologias de energia de baixo ou nulo teor de carbono mais competitivas, em termos de custos, em comparação com as tecnologias correlatas de combustíveis fósseis, atualmente mais baratas.<sup>42</sup> No caso da energia nuclear, é preciso afirmar que o conhecimento sobre tecnologia e dos desen-

---

42. O custo da energia nuclear é dominado pelo custo do projeto, aprovação, construção e licenciamento. Custos de combustível são uma pequena porcentagem do total dos custos de produção, amortizados ao longo da vida útil de uma usina. Nos Estados Unidos, as concessionárias que sabem como operar centrais nucleares eficientemente (alta capacidade de utilização ou fatores de capacidade) estão agora oferecendo programas de treinamento para outras concessionárias, da mesma forma que as grandes companhias aéreas oferecem programas de treinamento de pilotos e recertificação para as pequenas companhias aéreas. Em consequência, a fração de tempo em que as centrais nucleares dos Estados Unidos estão produzindo energia aumentou dramaticamente e é agora superior a 90%.

volvimentos potenciais que poderiam atenuar algumas das preocupações comentadas acima, tanto por parte do público como daqueles que traçam as políticas, está ultrapassado. É necessário reexaminar essas questões relativas à energia nuclear e suas soluções potenciais, de forma transparente e guiada por princípios científicos.

### 3.3 Renováveis que não a biomassa

As fontes renováveis de energia – biomassa, eólica, solar, hidrelétrica, geotérmica e oceânica – contribuíram para satisfazer as necessidades energéticas da humanidade por milhares de anos.<sup>43</sup> Uma maior contribuição das modernas tecnologias de energia renovável pode ajudar a promover o avanço de importantes metas de sustentabilidade; também é considerada desejável por várias razões:

- **Benefícios ambientais e de saúde pública.** Na maioria dos casos, as modernas tecnologias de energia renovável geram emissões muito mais baixas (ou quase nulas) de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos convencionais, em comparação com as alternativas de combustível fóssil;<sup>44</sup> outros benefícios podem envolver necessidades menores no uso de água e tratamento de resíduos, bem como impactos evitados de mineração e prospecção.
- **Benefícios de segurança energética.** Recursos renováveis reduzem a exposição à escassez de oferta e à volatilidade dos preços nos mercados de combustíveis convencionais; também oferecem um meio

---

43. Os oceanos do mundo representam uma vasta fonte potencial de energia, mas as propostas atuais para explorar esse recurso ainda estão em fase experimental. Considerando-se que o potencial de energia do oceano continua a ser, por ora, em grande parte especulativo, essa forma de energia renovável não receberá mais atenção aqui.

44. Não é intenção dessa afirmação dar a entender que os impactos dos projetos de energia renovável sobre as emissões de gases do efeito estufa e sobre o meio ambiente, de um modo mais geral, são sempre indubitavelmente positivos. No caso da energia hidrelétrica, está em curso um intenso debate relativo ao potencial de emissões substanciais de metano e dióxido de carbono provenientes de grandes instalações, particularmente nos trópicos. Estas emissões são geradas pela decomposição de matéria orgânica submersa e podem ser significativas.

para muitos países diversificarem os seus suprimentos de combustível e para reduzir a dependência das fontes estrangeiras de energia, incluindo a dependência do petróleo importado.

- **Desenvolvimento e benefícios econômicos.** O fato de muitas tecnologias renováveis poderem ser implantadas gradativamente, em aplicações isoladas de pequena escala, faz com que sejam adequadas para os contextos dos países em desenvolvimento, em que existe uma necessidade urgente de estender o acesso aos serviços de energia nas zonas rurais; além disso, uma maior dependência dos recursos renováveis nacionais pode reduzir a transferência de pagamentos por energia importada e estimular a criação de empregos.

Como acontece com todas as opções de fornecimento de energia, tecnologias de energia renovável também apresentam inconvenientes, muitos deles relacionados ao fato de o recurso que está sendo explorado (exemplo, eólico ou luz solar) é difuso e geralmente tem baixa densidade de potência. Uma primeira questão, obviamente, é o custo – em especial, os custos relativos às opções de recursos convencionais, com e sem sinalização de preços para internalizar impactos climáticos. Sem sinalização de preços, muitas opções de energia renovável continuam a ser mais caras, neste momento, do que as alternativas convencionais, (embora algumas tecnologias – como a eólica – estejam rapidamente se aproximando ou já tenham alcançado competitividade comercial em algumas configurações).

A natureza difusa de muitos recursos renováveis significa, também, que esforços de larga escala para desenvolver seu potencial energético normalmente exigem mais terras (ou água) do que instalações convencionais de energia. Por consequência, os impactos sobre a vida animal, os *habitats* naturais e a paisagem podem se tornar uma questão significativa em alguns projetos. No caso das grandes centrais hidrelétricas, preocupações adicionais podem incluir impactos sobre assentamentos humanos e o potencial para compensar emissões de metano e dióxido de carbono. Em muitos casos, as preocupações a respeito dos impactos sobre o solo ou o ecossistema podem ser resolvidas por meio de localização adequada, modificações da tecnologia ou outras medidas; além disso, existem opor-

tunidades promissoras para implementar algumas tecnologias renováveis em aplicações descentralizadas (exemplo, painéis solares em telhados).

O restante desta seção focaliza as opções de energia renovável que não a biomassa (modernas tecnologias de biomassa são discutidas em separado na próxima seção). No curto ou médio prazo, esses recursos têm o potencial para competir com combustíveis convencionais em quatro mercados distintos: geração de eletricidade, aquecimento de água e de ambiente, transporte e energia rural (fora da rede).

### *Contribuição dos recursos renováveis*

Atualmente, continua a ser relativamente pequena a contribuição das pequenas centrais hidrelétricas, eólicas e outras fontes de energia que não a biomassa, que representam apenas 1,7% da produção total de energia primária global em 2005.<sup>45</sup> Nos últimos anos, porém, tem-se observado um crescimento explosivo em várias indústrias-chave renováveis. A Tabela 3.4 mostra a produção média anual de energia e as taxas de crescimento da produção para diferentes tecnologias renováveis modernas, para o período de 2001 a 2005.<sup>46</sup> Em média, a contribuição das modernas energias renováveis para o fornecimento total de energia primária (TPES, em inglês) aumentou cerca de 11,5% ao ano, durante o período de 2001 a 2005. A Figura 3.7 mostra a contribuição projetada das energias renováveis modernas, incluindo a biomassa, para o fornecimento total de energia primária em 2010 e 2020, com base em um crescimento contínuo de 11,5% ao ano.

Cada vez mais comuns em muitos países, as políticas governamentais – normalmente motivadas pelas mudanças climáticas e preocupações

---

45. Se for acrescentada a moderna energia da biomassa, esta percentagem aumenta para 3,6 e caso a energia da biomassa tradicional e das grandes centrais hidrelétricas forem acrescentadas, o percentual vai para 13,6.

46. É importante ressaltar que o recente crescimento substancial na capacidade instalada renovável no mundo tem sido amplamente impulsionado pela introdução de políticas e incentivos agressivos em uma porção de países. Um empenho semelhante em outros países aceleraria ainda mais as taxas atuais de implementação e estimularia investimentos adicionais no aperfeiçoamento tecnológico contínuo.

**Tabela 3.4 Modernas energias renováveis: produção e crescimento**

Fonte / Tecnologia		Produção (Exajoules)				Taxa de crescimento (2005-2006) em % por ano
		2001	2004	2005		
Energia de biomassa moderna	<i>Total</i>	8,32	9,01	9,18	2,50	
	Bioetanol	0,40	0,67	0,73	16,36	
	Biodiesel	0,04	0,67	0,73	34,27	
	Eletricidade	1,26	1,33	1,39	2,41	
	Calor	6,62	6,94	6,94	1,17	
Energia geotérmica	<i>Total</i>	0,60	1,09	1,18	18,37	
	Eletricidade	0,25	0,28	0,29	3,84	
	Calor	0,35	0,80	0,88	26,31	
Pequenas hidrelétricas	<i>Total</i>	0,79	1,92	2,08	27,47	
Eletricidade eólica	<i>Total</i>	0,73	1,50	1,86	26,56	
Energia solar	<i>Total</i>	0,73	2,50	2,96	41,83	
	Calor a baixa temperatura	0,68	2,37	2,78	41,92	
	Eletricidade térmica	0,01	0,01	0,01	0,46	
	FV na rede		0,06	0,10	55,00	
	FV fora da rede	0,03	0,06	0,07	20,25	
Energia marinha	<i>Total</i>	0,01	0,01	0,01	0,46	
Total de renováveis modernos não biomassa		2,86	7,02	8,09		
Total de renováveis modernos		11,16	16,02	17,26	11,51	
Total de suprimento de energia primária (TPES)		418,85	469,00	477,10	1,60	
Renováveis modernos/ TPES (em porcentagem)		2,7	3,4	3,6		

Fontes: UNDP, Undesa e WEC, 2000 e 2004; REN 21, 2006; e IEA, 2006.

com a segurança energética – têm desempenhado um papel importante no estímulo aos recentes investimentos em energia renovável.<sup>47</sup> Atualmente, pelo menos 45 países, incluindo 14 países em desenvolvimento, adotaram diversas políticas – muitas vezes combinadas – para promover a energia renovável (REN21, 2006 e 2005). Os exemplos principais incluem investimentos ou créditos fiscais de produção; tarifas de aquisição (que exigem que as concessionárias paguem um montante mínimo por energia renovável fornecida para a grade); padrões ou metas de portfólio (que estabelecem uma quota específica de suprimento de energia ou de eletricidade a ser fornecida usando os recursos renováveis)<sup>48</sup>; e subvenções, empréstimos, ou outras formas de apoio direto para pesquisa, desenvolvimento, demonstração, e esforços iniciais de implementação. Por exemplo, em março de 2007, os estados-membros da União Europeia concordaram em adotar, como meta impositiva, a meta de suprir 20% de todas as necessidades de energia da UE com fontes renováveis até 2020. A China adotou a meta de 10% de capacidade renovável de geração elétrica até 2010 (excluindo as grandes centrais hidrelétricas) e 10% da energia primária a partir de fontes renováveis dentro do mesmo prazo (Tabela 3.5).

Incentivos ou metas adicionais e outras políticas para promover a energia renovável estão sendo adotados, cada vez mais, em nível estadual e municipal. O dispêndio atual em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias renováveis nos Estados Unidos e Europa totaliza mais de US\$ 700 milhões por ano; além disso, cerca de US\$ 500 milhões por ano estão sendo direcionados para projetos de energia renovável nos países em desenvolvimento.<sup>49</sup> Os avanços recentes no mundo dos negócios refletem o

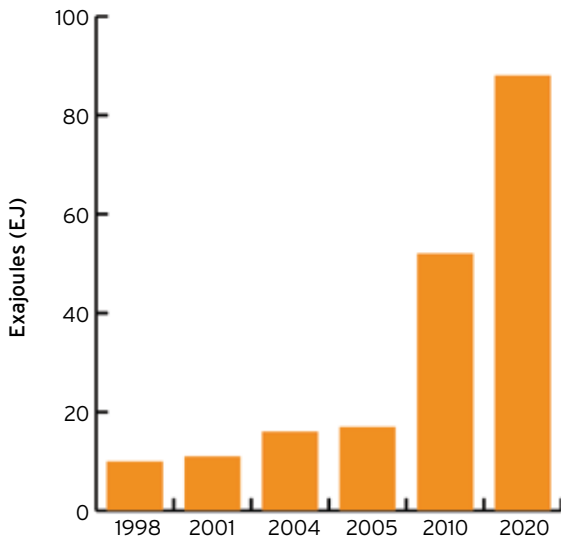
---

47. Estritamente de uma perspectiva de mitigação climática, os custos em dólar de algumas dessas tecnologias por tonelada de carbono evitado pode ser alto, em relação a outras opções de mitigação. Normalmente, contudo, os governos se sentem motivados a apoiar a energia renovável por outras razões, incluindo a diversidade de combustíveis, a independência energética e as melhorias ambientais locais.

48. Tais compromissos podem contrabalançar a tendência comum no planejamento do sistema de energia, que favorece os geradores de larga escala.

49. O financiamento para projetos de países em desenvolvimento vem de organizações como o German Development Finance Group, World Bank Group, Global Environment Facility e outros doadores. Muitos dos dados apresentados neste capítulo provêm dos Relatórios de Status Global REN21, de 2005 e 2006.

**Figura 3.7** Projeções para energias renováveis modernas para 2010 e 2020



Obs.: Projeções para as fontes renováveis modernas (incluindo pequenas hidrelétricas e excluindo as grandes), com base em um crescimento anual de 11,5%, no período de 2001 a 2005.

Fontes: PNUD, Undesa e WEC, 2000 e 2004; REN21, 2006; E AIE, 2006

crescente entusiasmo por energia renovável: grandes bancos comerciais começaram a considerar investimentos em energia renovável em suas carteiras de empréstimos como tendência predominante, e várias grandes corporações recentemente fizeram investimentos ou aquisições substanciais em empreendimentos de energia renovável. As 60 maiores empresas de energia renovável, ou divisões de empresas negociadas na Bolsa, têm agora uma capitalização de mercado conjunta de US\$ 25 bilhões e novas organizações estão surgindo para facilitar investimentos em energias renováveis através de redes especializadas, intercâmbio de informações, pesquisa de mercado, treinamento, financiamento e outras formas de assistência (REN21, 2006).

As tendências atuais são animadoras, mas a maior parte do crescimento previsto para a capacidade de energia sustentável continua concentrada em alguns países (cinco ou seis). O desafio é manter taxas sau-

**Tabela 3.5 Políticas para a promoção de energias renováveis e metas em países selecionados**

País	Metas de energia renovável modernas	Mecanismos de políticas
Austrália	9,5 terawatts-hora até 2010	Padrões renováveis em portfólio (RPS, na sigla em inglês), subsídios, certificados negociáveis, financiamento público
Brasil	3,3 gigawatts até 2006 a partir da energia eólica, biomassa, pequenas hidrelétricas	Tarifas de aquisição, financiamento público
Canadá	3,5% a 15% de eletricidade em quatro províncias	Subsídios, créditos fiscais, financiamento público; varia por província
China	10% da capacidade até 2010 (~ 60 GW), 5% da energia primária até 2010, 10% da energia primária até 2020	Tarifas de aquisição, subsídios, créditos fiscais, financiamento público, licitações competitivas
UE-25	20% de toda a energia até 2020	Varia por país
Índia	10% de capacidade nova entre 2003 e 2012 (~ 10GW)	Subsídios, créditos fiscais, financiamento público, licitações competitivas
Israel	2% de eletricidade até 2007, 5% até 2016	Tarifas de aquisição
Japão	1,35% de eletricidade até 2010, excluindo geotérmica e grandes centrais hidrelétricas	RPS, subsídios, certificados negociáveis, <i>net metering</i> , financiamento público
Coreia	7% da eletricidade até 2010, incluindo grandes centrais hidrelétricas; 1,3 GW de energia solar fotovoltaica conectada à rede em 2011	Tarifas de aquisição, subsídios, créditos fiscais
Nova Zelândia	30 petajoules de capacidade acrescentada (incluindo calor e combustíveis para transportes) até 2012	Subsídios, financiamento público
Noruega	7 TWh do calor e do vento, até 2010	Subsídios, créditos fiscais, certificados negociáveis, licitações competitivas
Filipinas	4,7 GW da capacidade total existente até 2013	Créditos fiscais, financiamento público
Suíça	3,5 TWh de eletricidade e calor até 2010	Tarifas de aquisição
Tailândia	8% do total de energia primária até 2011	Tarifas de aquisição, RPS, subsídios, <i>net metering</i>
EUA	5% a 30% da eletricidade em 20 estados	Varia por estado

Obs.: Dados atualizados conforme novas metas da UE. A tabela apresenta metas aprovadas por diferentes governos. Nenhuma tentativa foi feita para converter essas metas a uma única medida, facilmente comparável, tais como produção de eletricidade, capacidade, parcela de geração ou parcela de capacidade. A UE adotou sua meta na primavera de 2007; os Estados-membros da UE devem elaborar políticas e regulamentações específicas por país.

Fonte: REN21, 2005.



dáveis de crescimento nos países que já têm compromissos ambiciosos de energia renovável e dar início a esforços semelhantes de implementação em outros países ao redor do mundo. Esse desafio tem dimensões institucionais, sociais, tecnológicas e econômicas importantes. A construção da capacidade, por exemplo, surgiu como uma questão fundamental para a manutenção da infraestrutura de energias renováveis no mundo em desenvolvimento. Muitos projetos bem-intencionados de energia renovável, financiados por agências internacionais ou governos estrangeiros, falharam devido à falta de atenção para a necessidade concomitante de técnicos e gestores competentes para a manutenção desses sistemas. Outros fatores que têm contribuído para uma taxa de sucesso decepcionante para projetos de energias renováveis na África incluem a falta de políticas adequadas, de envolvimento dos grupos-alvo, de compromisso com a manutenção de projetos por parte dos governos dos países em questão e de coordenação entre os doadores.

### *Questões e obstáculos para as opções não biomassa*

Várias questões e obstáculos de mercado se aplicam a cada uma das principais opções “novas” não biomassa de energia renovável: eólica, fotovoltaica solar (FV), térmica solar, pequenas centrais hidrelétricas e geotérmica. Para cada opção energética, os elaboradores de políticas enfrentam uma série de questões semelhantes:

- A tecnologia disponível é adequada – na teoria e na prática – para atender à demanda crescente?
- Existem aspectos da fonte – tais como a natureza intermitente do vento e da luz solar – que atualmente limitem o seu papel no mercado?
- A tecnologia poderá competir economicamente com outras opções em um mundo de emissões limitadas (levando-se em conta os atuais subsídios para fontes convencionais e não convencionais, bem como custos e benefícios que atualmente não estão internalizados nos preços de mercado)?

- Como superar outras barreiras, incluindo questões de localização, barreiras de mercado ou regulatórias, limitações de infraestrutura e outros obstáculos?

Embora os pontos específicos destas questões variem para as diferentes tecnologias e recursos, diversos aspectos genéricos devem ser observados antes de se prosseguir com uma discussão mais detalhada das diferentes opções.

A adequação dos recursos geralmente não é problema, embora algumas partes do mundo sejam mais promissoras para certas tecnologias renováveis do que outras. A taxa de absorção da luz solar pela Terra é aproximadamente 10 000 vezes maior do que a taxa de utilização de todos os tipos de energia comercial por todos os seres humanos. Mesmo quando limitações práticas são incluídas na conta, a base restante de recursos renováveis continua enorme. Um estudo recente, encomendado para este relatório, sugere que se forem consideradas apenas as áreas em terra que já são economicamente viáveis para turbinas eólicas comercialmente disponíveis (ou seja, áreas com ventos Classe 5 ou melhores) e se for aplicado um fator de exclusão de 90% (isto é, presume-se que apenas 10% dessas áreas estarão disponíveis, devido à concorrência para uso do solo ou por outros motivos), o potencial energético eólico ainda é teoricamente suficiente para abastecer 100% do consumo global atual de eletricidade e até 60% do consumo mundial projetado para 2025 (Greenblatt, 2005).

Os desafios para as tecnologias de energia renovável, portanto, são essencialmente tecnológicos e econômicos: como capturar a energia de fontes dispersas que normalmente têm baixa densidade de potência em comparação com combustíveis fósseis ou nucleares e levar essa energia aonde e quando ela for necessária a um custo razoável. Reduções significativas de custos foram obtidas para as tecnologias solar e eólica na década passada, mas como meio de geração de energia elétrica essas opções geralmente continuam sendo mais caras por quilowatts-hora produzidos do que seus concorrentes convencionais. Outros obstáculos à implementação decorrem da natureza da fonte em si. A energia eólica e solar, por serem

intermitentes e não estarem disponíveis sob demanda, apresentam desafios em termos da integração em redes de distribuição de energia elétrica, que precisam responder de imediato a cargas mutáveis. A intermitência impõe custos aos sistemas de energia elétrica – custos que podem ser substanciais em níveis previsíveis de implementação de energia eólica e solar.

Para enfrentar esse problema, aperfeiçoamentos em larga escala em infraestrutura de transmissão, acréscimo de geração convencional de resposta mais rápida e, possivelmente, tecnologias de armazenamento talvez possam permitir que a energia eólica abasteça mais de 30% da geração de eletricidade, mantendo os custos da intermitência abaixo de alguns centavos por quilowatt-hora (DeCarolis e Keith, 2005; 2006). O desenvolvimento de opções de armazenamento custo-efetivas deve ser uma prioridade para futuras pesquisas e desenvolvimento, já que o êxito nesta área poderá afetar significativamente o custo de recursos renováveis intermitentes e a dimensão de sua contribuição para o fornecimento de energia no longo prazo. Opções potenciais de armazenamento incluem capacidade térmica aumentada, armazenamento de energia de água bombeada ou ar comprimido e, por fim, hidrogênio. A energia das grandes hidrelétricas tem a vantagem de não ser intermitente e já é bastante competitiva em termos de custos, mas o potencial para novas instalações em muitas áreas pode ser limitado por causa das preocupações com os impactos adversos sobre os *habitats* naturais e assentamentos humanos.

## EÓLICA

Com a capacidade instalada aumentando a uma média de 30% ao ano desde 1992, a energia eólica está entre as tecnologias de energia renovável de mais rápido crescimento e responde pela maior parcela da geração de eletricidade de fontes renováveis adicionada nos últimos anos. Só em 2006, 15,2 gigawatts de nova capacidade eólica (representando um investimento de mais de US\$ 24 bilhões) foram adicionados em nível mundial, elevando a capacidade eólica total instalada para 59 gigawatts (GWEC, 2006). Os países líderes no desenvolvimento da energia eólica são a Alemanha (18,4

gigawatts total), Espanha (10 gigawatts), Estados Unidos (9,1 gigawatts), Índia (4,4 gigawatts) e Dinamarca (3,1 gigawatts). Esse progresso impressionante é devido, em grande parte, à contínua redução dos custos (os custos de capital para a energia eólica diminuíram mais de 50% entre 1992 e 2001) e a grandes incentivos governamentais em alguns países (Juninger e Faaij, 2003). Ao longo do tempo, turbinas eólicas tornaram-se maiores e mais altas: a capacidade média de cada uma das turbinas instaladas em 2004 foi de 1,25 megawatt, o dobro do tamanho médio da base de capacidade existente (BP, 2005).

Uma simples extrapolação das tendências atuais – ou seja, sem levar em conta as intervenções das novas políticas – sugere que a capacidade eólica vai continuar a crescer fortemente. A previsão da IEA para 2030 no *World Energy Outlook* (2004) inclui 328 gigawatts de capacidade eólica global e 929 terawatts-hora de geração eólica total, um aumento mais do que cinco vezes maior que a atual base de capacidade. Os defensores das energias renováveis têm proposto cenários muito mais agressivos para futuras implementações eólicas: no Cenário de Políticas Internacionais Avançadas do Conselho Europeu de Energias Renováveis, por exemplo, prevê-se que a geração eólica aumente para 6 000 terawatts-hora até 2030 e 8 000 terawatts-hora até 2040.<sup>50</sup> Em geral, os recursos eólicos potenciais são imensos, mas não estão uniformemente distribuídos ao redor do globo. Com base nos levantamentos disponíveis, a América do Norte e uma grande parte do litoral da Europa Ocidental têm os recursos mais abundantes, enquanto a base de recursos da Ásia é consideravelmente menor, com a possível exceção de algumas áreas, como a Mongólia Interior, onde o potencial eólico pode ser de 200 gigawatts. Olhando para além da escala continental, os recursos eólicos na América do Norte estão concentrados no centro do continente, enquanto na Europa os melhores recursos es-

---

50. Supondo um fator de capacidade de cerca de 30%, isso é mais ou menos consistente com as projeções que Greenblatt (2005) cita: a European Wind Energy Association (Ewea) e o Greenpeace preveem um crescimento para 1200 gigawatts até 2020 (12% da demanda), divididos em 230 gigawatts na Europa, 250 gigawatts nos Estados Unidos, 170 gigawatts na China, e 550 gigawatts no resto do mundo, com o crescimento se estabilizando em 3200 gigawatts globalmente em 2038. Note-se, também, o cenário de políticas agressivas do Erec mostra a energia fotovoltaica com um papel um pouco maior do que a eólica até 2040 (Ewea e Greenpeace, 2004).

tão ao longo da costa ocidental, na Rússia e na Sibéria. Mais estudos são necessários para avaliar a base de recursos na África, onde parece que os recursos eólicos podem estar concentrados em poucas áreas nas bordas do sul e do norte do continente.

A intermitência é uma questão importante para a energia eólica: as velocidades do vento são altamente variáveis, e a produção de energia cai rapidamente à medida que diminui a velocidade do vento. Em consequência, as turbinas produzem, em média, muito menos eletricidade do que sua capacidade nominal máxima. Fatores típicos de capacidade (a proporção entre produção real e capacidade nominal) variam de 25% em terra até 40% em alto-mar, dependendo tanto das características da turbina como do vento. Nos níveis atuais de penetração, a intermitência da energia eólica é, em geral, facilmente administrável: operadores da rede podem ajustar a produção de outros geradores para compensar, quando necessário. Nestas situações, os operadores tratam os parques eólicos de forma muito parecida com “cargas negativas” (Kelly e Weinberg, 1993; DeCarolis e Keith, 2005). Num prazo mais longo, à medida que a penetração da energia eólica se expande para níveis significativamente mais elevados (exemplo, acima 20% da capacidade total da rede), a questão da intermitência pode se tornar mais significativa e exigir uma combinação de técnicas inovadoras de gestão da rede, integração avançada da rede, recursos de reserva acionados sob demanda e tecnologias de armazenamento de energia custo-efetivas.<sup>51</sup> Obviamente, algumas dessas opções – tais como capacidade de reserva e armazenamento de energia – aumentariam o custo marginal da energia eólica. Além disso, novos investimentos na capacidade de transmissão e o aperfeiçoamen-

---

51. Muitas regiões estão quase atingindo ou estão estabelecendo a meta de 20% ou mais de geração renovável (Greenblatt, 2005). Nas aplicações atuais, em que a energia eólica geralmente compõe uma parte relativamente pequena da rede, as turbinas a gás natural frequentemente garantem a geração de apoio, devido a suas rápidas trajetórias ascendentes e baixos custos de capital. Em outros casos, usinas a carvão ou hidrelétricas podem ser usadas para fornecer geração de apoio; a energia nuclear raramente é utilizada, devido à necessidade de funcionar em plena potência. A geração complementar renovável (exemplo, energia solar fotovoltaica, que tem seu pico durante o dia, em comparação com a energia eólica, que muitas vezes tem seu pico à noite) ou gestão pelo lado da demanda são outras opções, mas a sua utilização não é generalizada.

to da tecnologia de transmissão, que permitiriam um transporte mais econômico por longas distâncias, usando, por exemplo, linhas de alta voltagem de corrente direta, permitiriam a integração da rede para cobrir áreas geográficas muito maiores e poderiam desempenhar um papel crucial para superar preocupações com a intermitência, ao mesmo tempo que se expandiria o acesso a áreas remotas, mas promissoras, em termos desse recurso.<sup>52</sup>

Nesse meio tempo, conforme já observado, as opções de baixo custo de armazenamento de energia na escala e nos períodos de tempo necessários (ou seja, várias horas ou dias) merecem ser mais bem exploradas. Opções potenciais para armazenamento de energia eólica e outros recursos renováveis intermitentes incluem armazenamento bombeado de energia hidrelétrica, armazenamento de energia a ar comprimido e hidrogênio. A energia hidrelétrica bombeada exige dois reservatórios de água, a alturas diferentes, enquanto a armazenagem a ar comprimido – nos dois projetos comerciais deste tipo que existem até o momento – implicou o uso de uma grande caverna subterrânea. O armazenamento a ar comprimido também pode ser viável em aquíferos subterrâneos, que são mais comuns. Embora a energia hidrelétrica bombeada possa ser preferível quando há uma fonte elevada de armazenamento de água por perto, o armazenamento a ar comprimido pode ser instalado onde a geologia subterrânea for adequada. Deve-se observar, no entanto, que o ar comprimido deve ser aquecido de alguma forma, antes que possa ser usado diretamente em uma turbina a ar; daí o habitual pressuposto de que o armazenamento a ar comprimido seria integrado com uma turbina a gás. Num prazo mais longo, o hidrogênio pode oferecer uma outra opção promissora de armazenamento para as energias renováveis intermitentes. Quando a energia solar ou eólica estiverem disponíveis, poderão ser usadas para produzir

---

52. Com custos de transmissão suficientemente baixos, a energia eólica em áreas remotas em terra, explorada através de transmissão de longa distância, pode ser um forte concorrente para a energia eólica gerada em alto-mar, mesmo que esta última esteja mais próxima da demanda, especialmente considerando-se os custos mais altos e as exigências de manutenção associadas às instalações em alto-mar. Na verdade, ao mesmo tempo que a Europa constrói, agressivamente, parques eólicos em alto-mar, também está considerando a transmissão de longa distância a partir de instalações de energia eólica fora da região, como no Marrocos, Rússia e Sibéria.

hidrogênio, que, por sua vez, poderia ser utilizado em uma variedade de aplicações – incluindo a produção de eletricidade, como fonte de combustível primário, ou em células combustíveis –, desde que as tecnologias apropriadas para a infraestrutura de distribuição e para uso final sejam desenvolvidas.<sup>53</sup>

Para um prazo mais longo, outras inovações têm sido sugeridas para melhorar ainda mais a posição competitiva da energia eólica. O potencial em P&D inclui técnicas de “diminuição” (*derating*) que permitam que as turbinas operem em velocidades mais baixas do vento (reduzindo, assim, os custos de capital e as necessidades de armazenamento de energia); turbinas avançadas e outras infraestruturas de acesso a recursos de alto-mar; ou mesmo sistemas concebidos para capturar os vastos recursos eólicos que existem na troposfera livre, vários quilômetros acima da superfície terrestre.

## ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Tecnologias solares FV usam semicondutores para converter fótons de luz diretamente em eletricidade. Como ocorreu com a eólica, a capacidade instalada aumentou rapidamente ao longo da última década; a capacidade solar FV conectada à rede cresceu, em média, mais de 60% por ano de 2000 a 2004. Esse crescimento, no entanto, começou com uma base pequena. A capacidade total instalada era de apenas 2 gigawatts, no mundo todo, até o final de 2004; aumentou para 3,1 gigawatts até ao final de 2005 (REN21, 2006). A energia solar FV, porém, há muito ocupava um importante nicho, em aplicações fora da rede, fornecendo energia em áreas sem acesso à rede elétrica. Até recentemente, a energia solar FV estava concentrada no Japão, Alemanha e Estados Unidos, onde é apoiada por vários incentivos e políticas. Juntos, estes países respondem por mais de

---

53. Note-se que o hidrogênio pode, potencialmente, ser utilizado como combustível primário em aplicações dispersas (exemplo, para aquecimento e para cozinhar em áreas rurais), antes mesmo que a tecnologia das células combustíveis de hidrogênio seja comercializada com sucesso.

85% da capacidade fotovoltaica solar instalada nos países da OCDE (BP, 2005). Também se espera que a energia solar FV se expanda rapidamente na China, onde a capacidade instalada – atualmente, de cerca de 100 megawatts – aumentará para 300 megawatts em 2010 (NDRC, 2006). Cada vez mais, a energia solar FV está sendo utilizada em aplicações integradas, onde módulos FVs são incorporados a telhados e fachadas de edifícios e conectados à rede, para que se possa dirigir o fluxo de energia em excesso de volta para o sistema.

Estimativas sobre a contribuição futura da energia solar variam amplamente e, como todas as projeções ou previsões, dependem muito dos pressupostos de políticas e de custos. Tal como acontece com a energia eólica, a base de recursos potenciais é grande e amplamente distribuída em todo o mundo, embora, obviamente, as perspectivas sejam melhores em alguns países do que em outros. Na medida em que os módulos FVs possam ser integrados ao ambiente construído, alguns dos desafios de localização que se aplicam a outras tecnologias de geração são evitados. O principal obstáculo às aplicações dessa tecnologia em conexões com a rede é o custo elevado. Os custos da energia solar FV variam de acordo com a qualidade do recurso e do módulo solar utilizado, mas são normalmente mais altos do que o custo da geração de energia convencional e substancialmente mais elevados do que os custos atuais de geração de energia eólica.

Outra questão importante, tal como acontece com outras opções renováveis, como a energia eólica, é a intermitência. Diferentes parâmetros econômicos e de confiabilidade se aplicam a utilizações fora da rede, onde a energia solar fotovoltaica costuma ser menos onerosa do que as outras alternativas, especialmente quando as alternativas exigem investimentos substanciais na rede.

Conseguir novas reduções no custo da energia solar provavelmente irá exigir aperfeiçoamentos tecnológicos adicionais e pode eventualmente envolver novas tecnologias inovadoras (tais como células solares sensibilizadas por corante).<sup>54</sup> Oportunidades para reduções de custo no curto

---

54. Instalações de energia solar FT têm avançado mais do que a produção anual, levando a preços mais altos dos módulos FV.



prazo incluem o aperfeiçoamento da tecnologia da produção de células, o desenvolvimento de tecnologias de filmes finos que reduzam a quantidade de material semicondutor necessário, a concepção de sistemas que usem luz solar concentrada e a substituição do silício por semicondutores mais eficientes. No médio e no longo prazo, propostas ambiciosas foram apresentadas para se construir usinas de energia solar FV em escalas de megawatts em áreas desérticas e transmitir a energia por linhas de transmissão de alta tensão ou por dutos de hidrogênio.<sup>55</sup> Conceitos ainda mais futurísticos têm sido sugeridos. Nesse meio tempo, é provável que a energia solar fotovoltaica continue a ter um importante potencial, no curto prazo, em aplicações dispersas, de “geração distribuída”, como parte integrante de projetos de envelopagem de edifícios e como alternativa a outras opções não conectadas à rede (como os geradores a diesel) em áreas rurais.

## ENERGIA SOLAR TÉRMICA

Tecnologias de energia solar térmica podem ser utilizadas para condicionamento de ar (tanto quente como frio) em edifícios, para aquecer água ou para produzir eletricidade e combustíveis. As oportunidades mais promissoras, no momento, são para aplicações dispersas, de pequena escala, normalmente para fornecer água quente e aquecimento de ambientes diretamente a residências e empresas. A energia solar térmica pode ser efetivamente captada usando características arquitetônicas “passivas”, como vidros voltados para o sol (*sunfacing glazing*), coletores solares montados em paredes ou no telhado, paredes externas duplas, janelas para ventilação cruzada, paredes termicamente maciças por trás de vidros, ou pré-aquecimento do ar através de tubos embutidos. Também pode ser usada como uma fonte direta de luz e ventilação pela simples implementação de dispositivos que possam concentrar e dirigir a luz solar, mesmo

---

55. A utilização do hidrogênio como vetor de energia gerada pelo sol poderia ser limitada em zonas desérticas, pela escassez de água, que é a matéria-prima necessária para a produção de hidrogênio.

no interior de um edifício, e aproveitando as diferenças de pressão que são criadas entre as diferentes partes de um edifício quando faz sol. Em combinação com sistemas de energia altamente eficientes, de 50% a 75% do total das necessidades energéticas dos edifícios construídos da forma usual podem, normalmente, ser eliminados ou satisfeitos utilizando energia solar por meios passivos.

Sistemas ativos de energia térmica solar podem fornecer água quente em edifícios residenciais e comerciais, bem como para a secagem de colheitas, processos industriais e dessalinização. As principais tecnologias de coletores – em geral consideradas maduras, mas que continuam a avançar – incluem painéis planos e tubos evacuados. Hoje, a tecnologia da energia solar térmica ativa é utilizada, principalmente, para aquecimento da água: no mundo todo, um número estimado de 40 milhões de residências (cerca de 2,5% do total de domicílios) usam sistemas solares de água quente. Os principais mercados para esta tecnologia estão na China, Europa, Israel, Turquia e Japão, com a China, por si só, respondendo por 60% da capacidade mundial instalada.<sup>56</sup> Sistemas ativos para proporcionar o aquecimento de ambientes estão se tornando mais comuns em alguns países, especialmente na Europa. Os custos da água quente aquecida por energia solar térmica, aquecimento de ambientes e sistemas combinados variam de acordo com a configuração do sistema e a localização. Dependendo do tamanho dos painéis e tanques de armazenagem, e da envelopagem do edifício, calcula-se que de 10% a 60% das necessidades de água quente e aquecimento de domicílios possam ser satisfeitas com energia solar térmica, mesmo na Europa Central e no norte da Europa.

Atualmente, a energia solar térmica é utilizada principalmente para aquecimento de água. No entanto, também existem tecnologias para a utilização direta de energia solar térmica para resfriamento e desumidificação. O custo continua a ser um obstáculo significativo, embora o desempenho, em matéria de custo, possa, às vezes, ser melhorado através

---

56. Instalações de aquecedores solares de água atingiram 62 milhões de metros quadrados na China, até o final de 2005. Contudo, isso representava apenas 5% dos possíveis clientes, sugerindo que o potencial para uma maior expansão da tecnologia da energia solar térmica na China é substancial.

de sistemas combinados que proporcionem tanto refrigeração no verão quanto aquecimento no inverno. Simulações com um protótipo para refrigeração evaporativa direta-indireta na Califórnia indicam uma economia anual de energia para refrigeração de mais de 90%. Essa economia seria menor em um clima mais úmido, embora isso possa ser melhorado com o uso de dessecantes líquidos regenerados a energia solar. Por fim, sistemas que ativamente colem e armazenem a energia solar térmica podem ser projetados para proporcionar aquecimento e refrigeração a vários edifícios de uma só vez; esses sistemas já estão em demonstração na Europa – o maior deles, na Dinamarca, envolve 1 300 casas.

Há também uma série de tecnologias para concentrar a energia solar térmica para gerar calor para processos industriais e produzir eletricidade. Normalmente, calhas, torres e antenas parabólicas que seguem o sol são utilizadas para concentrar a luz solar a uma alta densidade energética; a energia térmica concentrada é então absorvida por alguma superfície material e usada para operar um ciclo de energia convencional (como um motor Rankin ou uma turbina a vapor de baixa temperatura). Tecnologias de concentração de eletricidade solar térmica funcionam melhor em áreas de alta incidência de radiação solar direta e oferecem vantagens, em termos de capacidade embutida de armazenamento de energia térmica.

Até recentemente, o mercado para essas tecnologias estava estagnado, com poucos avanços desde o início dos anos 1990, quando uma planta de 350 megawatts foi construída na Califórnia, usando créditos fiscais. Contudo, os últimos anos têm testemunhado um ressurgimento do interesse na geração de eletricidade a energia solar térmica, com projetos de demonstração em curso ou propostos em Israel, na Espanha e nos Estados Unidos e em alguns países em desenvolvimento. A tecnologia também está atraindo novos investimentos significativos de capital de risco. No longo prazo, existe o potencial para aperfeiçoar ainda mais os métodos existentes para concentrar a energia térmica solar, particularmente em relação às tecnologias de rastreamento menos desenvolvidas de antenas parabólicas e espelho/torre. Métodos de produção de hidrogênio e de outros combustíveis (exemplo, gaseificação a vapor, com energia solar, do

carvão ou outros combustíveis sólidos) e outros meios de utilizar formas diluídas de calor solar (exemplo, tubos coletores evacuados, lagoas solares, chaminés solares e utilização da energia térmica oceânica) também estão sendo pesquisados.

## ENERGIA HIDRELÉTRICA

A energia hidrelétrica continua a ser o recurso renovável mais desenvolvido em todo o mundo: responde, hoje, pela maior parte (85%) da produção de eletricidade renovável e é uma das tecnologias disponíveis de geração de custo mais baixo. Mundialmente, a capacidade das grandes centrais hidrelétricas totalizava cerca de 772 gigawatts em 2004 e representava cerca de 16% da produção total de eletricidade, o que significava 2 809 terawatts-hora, de um total de 17 408 terawatts-hora em 2004 (IEA, 2006).

Tal como acontece com outras fontes renováveis, o potencial teórico da energia hidrelétrica é enorme, da ordem de 40 000 terawatts-hora por ano (World Atlas, 1998). Levando-se em consideração critérios econômicos e de engenharia, o potencial técnico estimado é menor, mas ainda é substancial – cerca de 14 000 terawatts-hora por ano (ou mais de quatro vezes os níveis atuais de produção). O potencial econômico, que leva em consideração limitações sociais e ambientais, é o mais difícil de estimar, uma vez que pode ser seriamente afetado por preferências da sociedade, que são inerentemente incertas e difíceis de prever. Supondo-se que, em média, 40% a 60% do potencial técnico de uma região possa ser utilizado, calcula-se um potencial econômico mundial de energia hidrelétrica de 7 000 a 9 000 terawatts-hora por ano.

Na Europa Ocidental e nos Estados Unidos, cerca de 65% e 76%, respectivamente, do potencial técnico hidrelétrico tem sido aproveitado, um total que reflete restrições sociais e ambientais. Para muitos países em desenvolvimento, o potencial técnico total, com base em engenharia simplificada e critérios econômicos com poucas considerações ambientais, não foi plenamente medido, e o potencial econômico permanece ain-

da mais incerto. Prevê-se, atualmente, um crescimento contínuo da produção hidrelétrica, especialmente no mundo em desenvolvimento, onde um grande aumento da capacidade já está planejado, principalmente em países asiáticos não OCDE. Em outros lugares, preocupações com a aceitação pública (incluindo as preocupações com o risco de rompimento de barragem); impactos ambientais (incluindo perda de *habitat*, bem como o potencial para emissões de dióxido de carbono e metano provenientes de grandes barragens, especialmente em ambientes tropicais); suscetibilidade à seca; impactos de realocação de populações; e disponibilidade de locais estão atraindo mais atenção para pequenas centrais hidrelétricas. Em 2000, um relatório publicado pela Comissão Mundial de Barragens identificou questões relativas à futura construção de barragens (tanto para gerar energia como para irrigação) e enfatizou a necessidade de uma abordagem mais participativa nas futuras decisões sobre gestão de recursos (WDC, 2000).

Hoje, no mundo inteiro, a capacidade instalada das pequenas centrais hidrelétricas é superior a 60 gigawatts, com a maior parte dessa capacidade (mais de 13 gigawatts) na China.<sup>57</sup> Outros países que trabalham ativamente para desenvolver pequenas centrais hidrelétricas incluem a Austrália, o Canadá, a Índia, o Nepal e a Nova Zelândia. As pequenas centrais hidrelétricas são, geralmente, utilizadas de forma autônoma (não conectadas à rede) para fornecer energia em nível de aldeias, no lugar de geradores a diesel ou outras centrais de pequena escala. Isso as torna adequadas para as populações rurais, especialmente em países em desenvolvimento. No mundo todo, a base de recursos das pequenas centrais hidrelétricas é bastante grande, uma vez que a tecnologia pode ser aplicada em uma ampla gama de pequenos rios. Além disso, o investimento do capital necessário é geralmente viável, o ciclo de construção é curto e centrais modernas são altamente automatizadas e não necessitam de pessoal operacional permanente. Os principais obstáculos são, portanto, sociais e econômicos e não técnicos. Os esforços recentes em P&D têm se centrado na incorporação

---

57. Não há uma definição única, amplamente aceita, do que seja uma pequena central hidrelétrica, mas um tamanho limite típico é da ordem de 10 megawatts (de capacidade).

de novas tecnologias e métodos operacionais e em minimizar ainda mais os impactos sobre as populações de peixes e outros usos da água.

## GEOTÉRMICA

A energia geotérmica situada abaixo da superfície da terra tem sido explorada, há muito tempo, como fonte de calor direto e, no último século, para gerar eletricidade.<sup>58</sup> A produção geotérmica de eletricidade só é prática, geralmente, quando existem vapor ou água subterrâneos a temperaturas superiores a 100°C; em temperaturas mais baixas (50 a 100°C) a energia geotérmica pode ser utilizada em aplicações diretas de calor (exemplo, aquecimento de estufas de plantas e ambientes, fornecimento de água quente, resfriamento por absorção). Um tipo diferente de aplicação envolve bombas de calor que efetivamente utilizam a terra como meio de armazenamento. Bombas de calor de fontes no solo aproveitam as temperaturas relativamente estáveis que existem abaixo do solo como fonte de calor no inverno e para absorver calor no verão, pois podem fornecer aquecimento e refrigeração de forma mais eficiente do que as tecnologias convencionais de ar condicionado ou bombas de calor de fontes do ar, em várias partes do mundo.

A capacidade global de geração de energia elétrica geotérmica é de cerca de 9 gigawatts, a maior parte concentrada na Itália, Japão, Nova Zelândia e Estados Unidos. O potencial para um maior desenvolvimento da energia geotérmica usando a tecnologia atual é limitado pelos locais disponíveis, mas a base de recursos disponíveis poderia ser significativamente afetada por tecnologias avançadas.<sup>59</sup> Os campos hidrotérmicos mais quentes são encontrados na orla do oceano Pacífico, em algumas regiões do Mediterrâneo e na bacia do oceano Índico. No mundo todo,

---

58. A energia geotérmica é geralmente incluída entre os recursos renováveis, embora não seja, no sentido mais estrito, renovável na mesma escala de tempo em que outros recursos o são.

59. Para uma discussão mais aprofundada do potencial geotérmico, ver Capítulo 7 do World Energy Assessment (UNDP, Undesa e WEC, 2000).

imagina-se que existam mais de 100 campos hidrotérmicos a profundidades bastante rasas, de 1 a 2 quilômetros, com temperaturas fluidas altas o suficiente para produzir energia. De acordo com o caso de referência da IEA (2006), *World Energy Outlook*, espera-se que a capacidade e a produção energética geotérmicas atinjam 25 gigawatts e 174 terawatts-hora, respectivamente, até 2030, respondendo por cerca de 9% da contribuição total de novas fontes renováveis. Aperfeiçoamentos tecnológicos que reduzissem custos de perfuração e permitissem o acesso a recursos geotérmicos em maior profundidade poderiam expandir substancialmente a base de recursos. Além disso, as tecnologias que poderiam extrair calor de rochas secas, em vez de depender de água quente ou vapor, podem aumentar significativamente o potencial geotérmico. Essas tecnologias ainda não estão desenvolvidas, mas estão sendo exploradas na Europa. Um programa de pesquisa já existente da UE, por exemplo, está buscando a utilização da energia geotérmica de rochas secas quentes para a produção de energia elétrica (EEIG, 2007).

A base potencial de recursos para a utilização de energia geotérmica de calor direto é muito maior. Na verdade, a utilização direta de calor quase dobrou entre 2000 e 2005, com 13 gigawatts térmicos acrescentados durante esse período e com pelo menos 13 países usando o calor geotérmico pela primeira vez. A Islândia lidera no mundo, em termos de capacidade existente de calor direto, suprimindo cerca de 85% de suas necessidades totais de aquecimento de ambientes usando a energia geotérmica, mas outros países – notadamente a Turquia – expandiram substancialmente o uso desse recurso nos últimos anos. Cerca de metade da capacidade global atual está em forma de energia geotérmica ou bombas de calor de fontes no solo, com cerca de 2 milhões de unidades instaladas em mais de 30 países do mundo todo (principalmente na Europa e nos Estados Unidos).

### *Em resumo: Opções renováveis que não a biomassa*

No futuro, um aperfeiçoamento contínuo das tecnologias de conversão, armazenamento e transmissão de energia poderia melhorar ainda

mais a relação custo-competitividade das opções de fontes renováveis de energia, contribuir para enfrentar preocupações sobre a confiabilidade que podem surgir em níveis mais altos de penetração e expandir o número de locais adequados para o desenvolvimento de energias renováveis. Assegurar que o progresso continue no ritmo necessário para garantir um papel primordial para as fontes renováveis de recursos energéticos, na primeira metade deste século, exigirá, contudo, que os governos no mundo todo tenham o compromisso de implementar políticas e de financiar investimentos que irão acelerar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias renováveis. Limitações significativas de carbono, especialmente em países industrializados, fazem parte desse quadro e serão essenciais na criação de oportunidades para que novas alternativas renováveis possam competir com as tecnologias convencionais que atualmente dominam os mercados da energia mundial.

### 3.4 Biomassa

A conversão da luz solar em energia química garante quase toda a vida animal e vegetal na Terra. A biomassa é um dos recursos energéticos mais antigos da humanidade e, de acordo com as estimativas disponíveis, ainda representa cerca de 10% do consumo global de energia primária hoje. Dados precisos não existem, mas um terço da população mundial depende de lenha, resíduos agrícolas, esterco animal e outros resíduos domésticos para satisfazer as necessidades energéticas de domicílios. Estima-se que essas utilizações tradicionais da biomassa respondam por mais de 90% da contribuição da biomassa para o suprimento global de energia, a maior parte do qual ocorre fora da economia formal de mercado, e principalmente nos países em desenvolvimento. Nesses países, calcula-se que a biomassa tradicional responda por mais de 17% do consumo total de energia primária. Modernas utilizações de biomassa para gerar eletricidade e calor, ou como fonte de combustível para transportes, podem representar menos de 10% do consumo total de energia de biomassa em todo o mundo.



Como a biomassa é um recurso renovável que pode atingir emissões de carbono baixas ou quase nulas (desde que tecnologias apropriadas de conversão sejam usadas e que as matérias-primas utilizadas sejam geridas de forma sustentável), considera-se que uma maior dependência da biomassa em aplicações modernas pode desempenhar um papel importante na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis. A biomassa merece atenção especial porque, no curto a médio prazo, oferece as alternativas mais promissoras aos combustíveis líquidos à base de petróleo para o setor de transporte. Em contrapartida, a utilização de biomassa nas aplicações tradicionais frequentemente tem impactos negativos sobre a saúde pública e sobre o meio ambiente e é muitas vezes conduzida de uma forma que não pode ser considerada *sustentável* ou *renovável* (no sentido de evitar a degradação ou a exaustão da base de recursos subjacentes ao longo do tempo). Dados agregados sobre energia raramente distinguem entre os diferentes tipos de uso de biomassa: é difícil dizer, a partir das estatísticas disponíveis, por exemplo, que parte da contribuição estimada da biomassa é composta por resíduos florestais e agrícolas recolhidos manualmente por pequenas comunidades *versus* a produção em larga escala de carvão a partir de florestas nativas para abastecer indústrias e cidades.<sup>60</sup>

Em geral, as utilizações tradicionais da biomassa, principalmente para cozinhar, em muitas partes da África, Ásia e América Latina, são muito ineficientes e frequentemente resultam na exaustão dos recursos naturais. A dependência dos combustíveis de biomassa pode levar ao desmatamento, por exemplo, e, ao fazê-lo, pode tornar-se uma fonte de emissões de gases do efeito-estufa. Além disso, nas aplicações tradicionais, a qualidade dos serviços de energia com o uso de recursos da biomassa (principalmente iluminação e aquecimento) é geralmente ruim e representa um alto custo

---

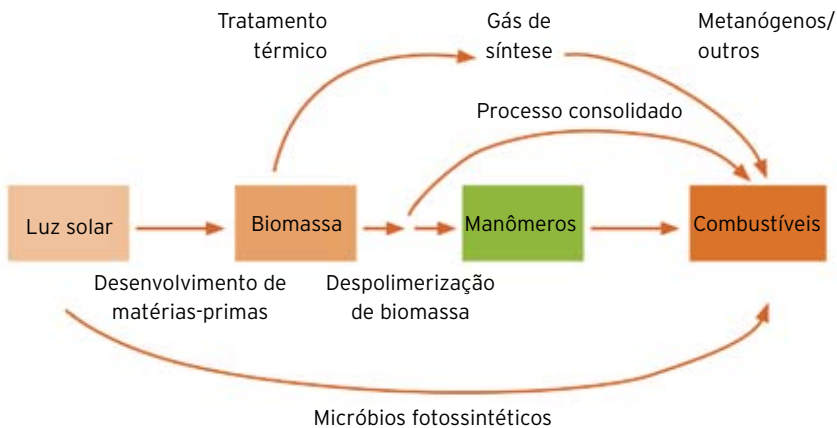
60. As melhores bases de dados disponíveis apresentam as taxas de desmatamento como um todo, incluindo uma grande parcela de mudança de uso do solo não relacionada ao consumo de energia (FAO, 2005). Estimativas de consumo de lenha são muitas vezes obtidas por métodos indiretos que dependem de outras medidas, tais como o crescimento da população, e correlações negativas com os substitutos como querosene, gás liquefeito de petróleo ou até mesmo a eletricidade.

em termos de trabalho humano necessário para recolher e transportar o combustível. Esse trabalho pode ter o efeito de excluir populações inteiras – em especial meninas e mulheres – da economia formal. E os impactos sobre a saúde associados a níveis elevados de poluição do ar em ambientes internos normalmente representam um risco maior para os membros mais vulneráveis da comunidade (mulheres, crianças e idosos). Apesar desses inconvenientes, bilhões de pessoas continuam a depender de esterco, resíduos de colheitas e lenha, pela simples razão de que estes combustíveis são os recursos energéticos mais acessíveis e menos onerosos à sua disposição. A biomassa seca é facilmente armazenada. Seu uso tem raízes culturais em muitas sociedades. Sem ela, muitos países teriam de aumentar suas importações relacionadas com a energia e muitas famílias pobres teriam de gastar uma parcela maior dos seus recursos limitados na aquisição de outras formas comerciais de energia. O progresso no fornecimento de energia moderna para as zonas rurais tem sido lento, mas existem oportunidades significativas para melhorar ou substituir métodos tradicionais de utilização da energia de biomassa, com os consequentes benefícios para a saúde humana e para a preservação da natureza. Várias opções tecnológicas para melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões estão disponíveis a um custo relativamente modesto: um fogão de cozinha moderno, por exemplo, pode obter uma melhoria de eficiência de 10% a 30%, a um custo de 5 a 10 euros. Mudar da biomassa tradicional para biogás, querosene, propano (gás liquefeito de petróleo) ou mesmo eletricidade pode aumentar substancialmente a eficiência dos fogões de cozinha a um custo de 20 a 60 euros por unidade (ver Quadro 1.2 no Capítulo 1).

Usos modernos de biomassa, no entanto, oferecem um leque muito mais amplo de possibilidades para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir emissões de gases do efeito estufa e promover desenvolvimento econômico sustentável. Uma série de tecnologias de energia de biomassa, adequadas para a aplicação em pequena e grande escala, está disponível. Incluem a gaseificação, a produção combinada de calor e eletricidade (cogeração), gás de aterro sanitário, recuperação de energia a partir de resíduos sólidos municipais ou biocombustíveis para o setor de transportes (etanol e biodiesel).

O recente interesse pela energia de biomassa tem-se concentrado, principalmente, em aplicações que produzem combustíveis líquidos para o setor de transportes. A Figura 3.8 apresenta caminhos potenciais para a futura produção de biocombustíveis. Dadas as crescentes preocupações a respeito da adequação da oferta global de petróleo e a atual falta de diversidade entre as opções disponíveis de combustível para o setor dos transportes, tais combustíveis representam o uso de maior valor da energia de biomassa no momento. Em última análise, as aplicações mais promissoras de biomassa podem envolver sistemas integrados em que, por exemplo, a biomassa é utilizada como combustível e como matéria-prima na coprodução de combustíveis líquidos para transporte e eletricidade.

**Figura 3.8** Caminhos potenciais para a produção de biocombustíveis



Obs.: A produção atual de biocombustíveis a partir de matérias-primas de biomassa lignocelulósica - incluindo a biomassa cultivada para a produção de energia e resíduos orgânicos (exemplo, palha de arroz e trigo, restos de madeira) - passa por um processo de pré-tratamento que separa a lignina dos açúcares de cadeia longa (celulose e hemicelulose), despolimerização em açúcares simples e, finalmente, fermentação para produzir álcool. Caminhos alternativos que estão sendo explorados incluem a possível consolidação do pré-tratamento, despolimerização e fermentação. Uma via alternativa envolve a conversão da biomassa em um gás de síntese (uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio), que é então convertido em combustível de hidrocarbonetos. A produção industrial de biocombustíveis através de microrganismos, como algas ou bactérias, é outra possibilidade.

Fontes: Beth Burnside, pró-reitora de Pesquisa e professora de Biologia Celular e Molecular da Universidade da Califórnia em Berkeley; e Steve Chu, diretor do Lawrence Berkeley National Laboratory, e professor de Física e Biologia Celular e Molecular da Universidade da Califórnia em Berkeley.

De todas as opções disponíveis, o etanol de cana-de-açúcar é o combustível de biomassa de maior êxito comercial sendo produzido atualmente. O etanol de cana-de-açúcar tem um balanço energético positivo e tem se beneficiado do apoio de políticas públicas em vários países, inclusive o Brasil, que atualmente satisfaz cerca de 40% de suas necessidades de combustível para automóveis (um terço da demanda total de energia para transporte) com o etanol de cana-de-açúcar (Macedo e outros, 2004; Goldemberg e outros, 2003). Globalmente, existe uma grande oportunidade para expandir a produção de etanol de cana-de-açúcar no curto prazo: quase 100 países cultivam cana-de-açúcar e tecnologias de conversão de última geração estão disponíveis. Além disso, a experiência no Brasil sugere que os impactos ambientais adversos associados à produção de etanol de cana-de-açúcar em larga escala podem ser significativamente atenuados pela experiência e pela aplicação de regulamentações ambientais. O etanol também está sendo produzido em escala comercial a partir do milho nos Estados Unidos, que há alguns anos subsidia o etanol e, mais recentemente, aprovou um decreto federal sobre combustíveis renováveis para promover alternativas aos combustíveis à base de petróleo para o transporte (Usdoe, 2006; Perlack e outros, 2005).

Um outro tipo de combustível para transporte à base de biomassa – o biodiesel – recentemente tornou-se disponível comercialmente em consequência de programas na Europa e na América do Norte, mas essa opção oferece um potencial limitado para a redução dos custos de produção, e sua viabilidade provavelmente continuará a depender de incentivos externos, como os subsídios agrícolas. Além disso, a obediência a especificações dos combustíveis e um controle de qualidade eficaz são fatores importantes para assegurar a viabilidade comercial do biodiesel. Os avanços tecnológicos recentes têm envolvido esforços para diversificar a cadeia de fornecimento de biodiesel, usando, por exemplo, o bioetanol em vez do metanol de carvão como matéria-prima.

A energia do biogás, a partir da digestão anaeróbica em aterros sanitários, em instalações para tratamento de esgotos e em locais para gestão de estrume, é considerada uma opção de fácil acesso no contexto de créditos de carbono disponíveis através do Mecanismo de Desenvolvimento

Limpo internacional (MDL). Essa forma de energia de biomassa não apenas substitui a combustão de combustíveis fósseis mas também reduz as emissões de metano, um gás de efeito-estufa mais potente que o dióxido de carbono.

Tecnologias disponíveis comercialmente para converter a biomassa em formas de energia utilizável variam em termos de escala, qualidade dos combustíveis e custo. Tecnologias de grande escala que já estão no mercado incluem combustão de leito fixo, leitos fluidificados, queima de pó, biomassa e co-combustão de carvão mineral, recuperação da energia de resíduos urbanos sólidos, bem como vários tipos de sistemas de gaseificação, pirólise etc. Contudo, muitas dessas tecnologias ainda não estão comercialmente disponíveis em países em desenvolvimento e exigem apoio financeiro – bem como construção de capacidade local – para serem mais amplamente implementadas.

### *O futuro da biomassa moderna*

Tal como acontece com algumas outras opções de energia renovável, o potencial teórico da energia de biomassa é enorme. Dos cerca de 100 000 terawatts de fluxo de energia solar que atingem a superfície da Terra, aproximadamente 4 000 terawatts incidem sobre 1,5 bilhão de hectares de terras cultivadas do mundo. Presumindo-se que modernas tecnologias de biomassa podem alcançar uma eficiência de conversão de energia de 1%, as terras cultivadas existentes podem, em teoria, gerar um fluxo de energia utilizável de 40 terawatts, ou mais de três vezes o fluxo de fornecimento de energia primária global atual, de 14 terawatts. Este exercício não se destina a sugerir que todas as terras aráveis devem ser convertidas para fins de produção de energia, mas apenas para ilustrar que há margem para uma expansão significativa da contribuição da energia da biomassa moderna, já que essa contribuição foi estimada em apenas 0,17 gigawatt em 2003 (Somerville, 2005; Macedo, 2005).

Há inúmeras áreas nos países em desenvolvimento onde o cultivo de matérias-primas avançadas de biocombustíveis pode substituir a coleta

atual de plantas forrageiras nativas. O uso eficiente destas matérias-primas de biomassa para a coprodução local de calor, eletricidade e combustível para transporte também teria um profundo impacto sobre a capacidade das populações rurais acessarem formas mais limpas e modernas de energia. Soluções energéticas que possam ser implementadas com investimentos modestos de capital serão um elemento crucial de uma estratégia energética efetiva. Também será fundamental – como parte de qualquer expansão em larga escala de produção de energia de biomassa – administrar as demandas antagônicas da produção de alimentos e preservação de *habitats*. Nas áreas em que a base de recursos é suficientemente abundante para garantir o cultivo tanto de alimentos como de culturas energéticas, ou em casos onde é viável fazer uso complementar das mesmas matérias-primas (exemplo, utilizando resíduos de culturas alimentares para a produção de energia), limitações de uso de solo de terras podem não aparecer como uma questão importante. Em outras áreas, no entanto, o potencial que a produção de energia tem para desalojar a produção de alimentos pode gerar preocupações – em especial se a produção de alimentos se destinar à população local, enquanto a produção de energia for voltada principalmente para a exportação.<sup>61</sup>

Algumas das oportunidades mais promissoras para enfrentar essas preocupações e expandir a contribuição da energia da biomassa moderna envolvem avanços de vanguarda nas ciências biológicas e químicas, incluindo o desenvolvimento de culturas destinadas à produção de energia, através da seleção genética ou engenharia molecular, enzimas especializadas e até mesmo a simulação artificial de processos biológicos naturais, como a fotossíntese. Grandes conquistas em novas fronteiras no campo da energia de biomassa, em qualquer uma das várias áreas de pesquisa descritas no Quadro 3.2, podem ter profundas implicações para o futuro das tecnologias da energia da biomassa. Conforme acontece com outras opções de recursos renováveis, a magnitude da contribuição da biomassa dependerá da forma como os avanços forem feitos em áreas-chave:

---

61. Um aumento acentuado nos preços do milho, devido em parte à rápida expansão da demanda por etanol nos Estados Unidos, causou tumultos no México no início de 2007.

- redução de custos;
- mitigação dos impactos ambientais, como o uso da água, produtos químicos (pesticidas ou fertilizantes), perdas de biodiversidade;
- minimização da pressão sobre recursos escassos de terras, em termos de exigências conflitantes entre produção de alimentos e fibras e preservação de *habitats*.

Soluções que enfrentem simultaneamente todos esses obstáculos envolvem: a expansão das terras disponíveis para a produção de energia da biomassa; a integração do desenvolvimento da energia da biomassa com práticas agrícolas e florestais sustentáveis; melhoria da produtividade das culturas em relação ao uso do solo, água e nutrientes; desenvolvimento de tecnologias avançadas de produção e de conversão. Os biocombustíveis produzidos a partir de lignocelulose, em vez de amidos, parecem mais promissores, tanto em termos de minimizar os conflitos potenciais entre produção de alimentos e produção de energia quanto em termos de maximizar os benefícios ambientais (incluindo reduções de gases do efeito-estufa) em relação ao uso de combustíveis fósseis.

Melhorias significativas têm, naturalmente, sido obtidas em todo o mundo em relação à produtividade agrícola. Entre 1950 e 1999, a área utilizada para cultivar cereais aumentou 17%. Durante esse mesmo período, a produção de cereais aumentou 183%, graças a avanços em produtividade. A introdução de novas estirpes de espécies vegetais tem diversificado as culturas, permitindo um cultivo eficiente em diferentes condições de solos, clima e água, e também um melhor rendimento.

A União Europeia e os Estados Unidos estão intensificando a P&D para melhorar o custo-competitividade da produção comercial de etanol. Os esforços atuais concentram-se no aproveitamento eficiente dos açúcares através da hidrólise de frações de celulose e hemicelulose da biomassa, bem como uma melhor fermentação do açúcar. Os pesquisadores estão investigando um grande número de possíveis ajustes nos processos para diferentes culturas, esperando reduzir os custos de produção de etanol em até um terço em cinco anos (Macedo, 2005).

Com preços do petróleo e do gás natural subindo e com os novos incentivos gerados pelos mercados emergentes de carbono, o gás de aterros

sanitários, o bagaço de cana, o biodiesel, a madeira de manejo florestal e esquemas de conversão de resíduos em energia estão se tornando opções cada vez mais atraentes. Com base nas tendências atuais de desenvolvimento tecnológico, espera-se que os custos para a recuperação da energia da biomassa diminuam em até dois terços em 20 anos, à medida que um vasto *mix* de produtos à base de biomassa – incluindo não apenas os produtos energéticos, mas também matérias-primas químicas – se tornem comercialmente viáveis. (Macedo, 2005).

Progressos no desenvolvimento de alternativas energéticas da biomassa, além de aliviar a pressão sobre os recursos finitos de combustíveis fósseis, reduziriam o custo de mitigar emissões de carbono. O etanol de cana-de-açúcar, por exemplo, tem um balanço energético líquido positivo de oito para um e um custo atual de mitigação de carbono quase nulo. Como forma de evitar emissões de gases do efeito estufa, o bioetanol pode logo alcançar custos negativos, à medida que se torna mais barato do que a gasolina – mesmo sem subsídios governamentais – em alguns mercados. Por outro lado, grande parte do etanol e do biodiesel produzidos comercialmente nos países da OCDE no momento tem custos de mitigação de carbono na faixa dos US\$ 60 a US\$ 400 por tonelada de dióxido de carbono equivalentes se energia a montante e os insumos químicos forem computados.

### Quadro 3.2 Fronteiras na produção de biocombustíveis

Atualmente, a indústria dos biocombustíveis está baseada principalmente na produção de etanol através da fermentação de açúcares ou amidos e na produção de biodiesel derivado de óleos vegetais. Acredita-se, no entanto, que o uso de materiais de biomassa lignocelulósica (lenhosa ou fibrosa) – em vez de amidos ou açúcares – tem muito mais potencial para maximizar a conversão eficiente da luz do sol, água e nutrientes em biocombustíveis. Plantas perenes, como gramíneas ou árvores de crescimento rápido, parecem particularmente atraentes para a produção sustentável de biocombustíveis em larga escala, por diversas razões: (a) nenhum preparo da terra é necessário por cerca de 10 a 15 anos, depois do primeiro plantio; (b) raízes longevas podem ser desenvolvidos para estabelecer interações simbióticas com bactérias, para obter nitrogênio e nutrientes minerais, resultando



em muito menos escoamento de nitrato e erosão do solo; e (c) algumas plantas perenes retiram uma fração substancial de nutrientes minerais das partes que ficam acima do solo antes da colheita. Gramíneas do tipo silvestre, como o miscanto, têm produzido até 26 toneladas secas por acre (o suficiente para produzir 2 600 galões de etanol por acre) em terra não irrigada, não-fertilizada nos Estados Unidos (Long, 2006). Esse rendimento é aproximadamente cinco vezes superior ao rendimento médio da beterraba ou de matérias-primas de amido, como o milho (este último em peso seco). Em geral, o rendimento de biodiesel da maioria dos tipos de matérias-primas - com exceção do óleo de palma - são menores.

Os métodos atuais de produção de etanol a partir de matérias-primas celulósicas se desenrolam em três etapas:

- (a) pré-tratamento termoquímico de matérias-primas da biomassa para produzir polímeros complexos de celulose e hemicelulose mais acessíveis à quebra enzimática;
- (b) aplicação de coquetéis especiais de enzimas para hidrolisar polissacarídeos da parede celular vegetal em uma mistura de açúcares simples; e
- (c) fermentação, mediada por bactérias ou levedura, para converter esses açúcares em etanol.

A lignina rica em energia que é separada da celulose e hemicelulose pode então ser queimada para fornecer energia para a biorrefinaria ou convertida em gás de síntese e, em seguida, em combustíveis Fischer-Tropsch.

Os métodos atuais dependem de etapas complexas, energo-intensivas, nas quais o pré-tratamento é incompatível com a desconstrução enzimática. Em consequência, mais etapas adicionais de neutralização são necessárias, aumentando o custo total e reduzindo a eficiência global do processo. Em futuras biorrefinarias, a despolimerização (sacarificação) e processos de fermentação podem ser consolidados em uma única etapa usando uma mistura de organismos na conversão de biomassa em etanol. Melhorias significativas na redução dos insumos de energia e custos de enzimas e o número de etapas de processamento são altamente prováveis se uma abordagem sistêmica da produção de biocombustíveis for adotada.

A aplicação de avanços nas áreas de ciência e tecnologia de rápido desenvolvimento, tais como a biologia sintética e genômica funcional de alto rendimento, oferece boas perspectivas para rápidos aperfeiçoamentos de matérias-primas e a conversão dessas matérias-primas em biocombustíveis. Possíveis áreas de pesquisa que aumentariam a produção de biomassa e a sua conversão em combustível estão listadas na Tabela 3.6. Materiais celulósicos, tais como palha de arroz e trigo, palha e talos de milho e outros resíduos de colheitas e florestas, podem servir como fontes de matérias-primas celulósicas.

O desenvolvimento de micróbios fotossintéticos que produzam lipídios ou hidrocarbonetos também tem um grande potencial para a produção de biocombustíveis. Embora seja improvável que a produção vegetal de biomassa utilizável seja superior a uma eficiência de conversão de energia solar de 1% a 2%, as algas podem converter a energia solar com uma eficiência superior a 10%. Uma combinação de processos microbianos anaeróbicos e aeróbicos pode ser otimizada separadamente, de forma que um precursor de combustível possa ser produzido em um ambiente anaeróbico e o produto final, em um aeróbico. O cultivo eficiente de algas que poderia obter o máximo proveito da alta eficiência quântica destes microrganismos, exigiria, contudo, uma infraestrutura de uso intensivo de capital.

**Tabela 3.6 Percursos de pesquisa para a produção dos biocombustíveis celulósicos avançados**

Objetivo	Status atual	Questões científicas	Tecnologias a serem utilizadas
<b>Desenvolvimento de matérias-primas</b>			
Desenvolver culturas energéticas sustentáveis de alto rendimento e baixa manutenção.	A maioria das matérias-primas de biomassa é de plantas sem melhoramentos. Métodos modernos de melhoramento genético e engenharia poderiam aumentar significativamente o rendimento da biomassa, a resistência à seca e a doenças e outras características desejáveis.	Quais são os genes que controlam e os diversos aspectos da composição e síntese de polissacarídeos? É possível fazer modificações úteis na composição das paredes das células alterando as atividades desses genes?	Genômica funcional de alto rendimento para identificar funções de todas as proteínas ativas de carboidratos em espécies vegetais representativas. Os genes que conferem resistência à seca podem ser identificados. Modificar plantas para que contenham genes de fixação de nitrogênio para que aceitem simbiontes que fixem hidrogênio.

Desenvolver culturas destinadas a facilitar a quebra da lignocelulose em açúcares simples.	A presença de grandes quantidades de lignina é um sério impedimento à hidrólise de polissacarídeos. A remoção da lignina requer pré-tratamentos energo-intensivos e difíceis, como explosão de vapor ou hidrólise com ácido quente.	A lignina é necessária para conferir integridade estrutural às plantas. É possível alterar a proporção e composição de várias ligninas para produzir plantas robustas que possam ser facilmente decompostas, de modo que a maioria dos polissacarídeos seja acessível à hidrólise?	Já se demonstrou que alterar a proporção de lignina guaiacil e siringil melhora a eficiência da hidrólise. Deve ser possível modificar as ligninas existentes para melhorar a desconstrução de plantas (exemplo, lignina concebida com elos que possam ser clivados).
--	---	--	---

### Desconstrução

Desenvolver métodos altamente eficientes de pré-tratamento de matérias-primas.	Os atuais métodos de pré-tratamento, como a explosão de vapor, hidrólise a ácido quente e termo-hidrólise são dispendiosos e energo-intensivos.	Há processos menos difíceis de pré-tratamento que possam aumentar a superfície de contato dos sítios de ligação para despolimerização enzimática e que sejam mais compatíveis com as enzimas ou microrganismos a serem utilizados?	Empregar microssistema de ensaios de alto rendimento de combinações de pré-tratamento, com plantas transgênicas com lignina modificada. Usar modelagem de diferentes processos físicos e químicos para otimizar o método de pré-tratamento.
Identificar enzimas mais eficientes para polimerização.	A eficiência e o custo das enzimas representa um alto custo na produção de etanol à base de celulose.	Pode-se melhorar significativamente a atividade enzimática com diminuição da inibição do produto?	Empreender buscas mais sistemáticas, de alto rendimento, por enzimas melhores. Aperfeiçoar enzimas recém-descobertas com mutagênese e métodos de evolução dirigida.
Desenvolver comunidades microbianas para degradação de lignocelulose.	Comunidades microbianas e seu papel na decomposição da biomassa ainda são pouco compreendidos.	É possível usar comunidades microbianas autossustentáveis na desconstrução da lignocelulose?	Existem muitas comunidades microbianas inexploradas que podem ser separadas para degradação

---

de compostagem, sequenciamento metagenômico, caracterização, e cultivo. Essas comunidades microbianas podem servir como uma nova fonte de enzimas lignocelulósicas.

---

### Síntese de combustíveis

---

Melhorar a produção de etanol.	<p>Microrganismos existentes são incompatíveis com os pré-tratamentos atuais.</p> <p>Os organismos atuais não são compatíveis com altos níveis (superiores a 15%) de produção de etanol.</p>	<p>Podemos desenvolver organismos de fermentação que possam tolerar pH baixo ou outras condições de processamento?</p> <p>Podemos compreender e melhorar a tolerância de um organismo aos combustíveis que ele produz?</p>	<p>Utilizar a genômica, a metagenômica e a biologia sintética para desenvolver tolerância às condições de tratamento não encontradas na natureza.</p> <p>Aplicar biologia sintética e de sistemas para criar tolerância. Desenvolver métodos de extração contínua de combustível para limitar a concentração de combustível no meio de fermentação.</p>
Desenvolver microrganismos para produzir combustíveis aperfeiçoados para transporte.	<p>A produção de etanol através da fermentação tem por base uma tecnologia de 5 000 anos de idade.</p>	<p>Butanol e combustíveis mais pesados de hidrocarbonetos (do tipo do diesel) têm maior eficiência e densidade energética e não absorvem ou se misturam na água. É possível desenvolver organismos para produzir esses combustíveis mais desejáveis para o transporte?</p>	<p>Um desafio para a biologia sintética para criar microrganismos que possam eficientemente produzir um combustível de hidrocarboneto mais pesado para transportes que se separe sozinho de seu ambiente aquoso.</p>

---

O uso de fertilizantes para produzir matérias-primas de biomassa, por exemplo, pode produzir emissões de óxido nitroso, um potente gás de efeito estufa – que assim anula alguns dos benefícios para o clima associados ao uso de petróleo evitado. Do mesmo modo, a conversão da biomassa em combustíveis líquidos requer energia e – dependendo da eficiência de conversão do processo e das fontes de energia utilizadas – também pode produzir emissões de compensação significativas. Melhorar o desempenho dos combustíveis de biomassa do ponto de vista da mitigação climática depende, portanto, da redução desses insumos.

Visando atingir este objetivo, esforços significativos em P&D estão agora centrados no desenvolvimento de métodos comercialmente viáveis para a produção de etanol a partir de matérias-primas celulósicas, o que poderia reduzir consideravelmente os custos e aumentar as reduções de gases do efeito estufa. Também tem crescido o interesse pelo desenvolvimento de sistemas integrados que permitiriam a coprodução de matérias-primas energéticas e outros produtos agrícolas, como meio de obter uma economia significativa e benefícios ambientais. Por exemplo, a produção de biodiesel pode fazer sentido somente se forem utilizadas como matéria-prima sementes que não são comestíveis (tanto por seres humanos como por animais), ou se puder ser associada ao cultivo de alimentos para animais.

Outros exemplos potencialmente promissores de sistemas integrados envolvem processos de gaseificação que permitiriam a coprodução de vários produtos valiosos, incluindo a eletricidade, combustíveis líquidos para transportes e produtos químicos. A tecnologia de gaseificação pode ser usada com várias matérias-primas, incluindo culturas energéticas, resíduos animais e uma vasta gama de materiais orgânicos, bem como carvão mineral e outros combustíveis carbonáceos. Em geral, o processo envolve produzir um gás de síntese (composto principalmente de monóxido de carbono e hidrogênio) a partir de qualquer material contendo carbono e hidrogênio; o gás de síntese pode então ser utilizado para impulsionar turbinas altamente eficientes e como matéria-prima para a fabricação de uma variedade de produtos químicos sintéticos ou combustíveis. A tecnologia de gaseificação em pequena escala poderá, eventualmente, surgir

como uma opção promissora para melhorar o acesso à energia em regiões isoladas. Enquanto isso, o uso mais importante de resíduos de biomassa disponíveis localmente pode ser em combinação com modernas tecnologias de combustão, em substituição ao óleo diesel, que hoje é comumente utilizado em motores a diesel antigos e ineficientes. As tecnologias potenciais para a conversão direta da biomassa para esses fins incluem processos térmico-químicos e catalíticos.

Hoje, a indústria da biotecnologia começa a visar além dos processos de produção já consolidados, para opções mais avançadas, como a hidrólise e fermentação do etanol, enzimas de biodiesel, maior fixação de carbono nas raízes, e recuperação aperfeiçoada de petróleo (Somerville, 2005). Avanços na engenharia genética já permitiram o desenvolvimento de cepas resistentes a doenças e culturas que são viáveis em ambientes (como áreas degradadas) que antes eram considerados impróprios para o cultivo, bem como culturas com menos exigências em termos de insumos químicos e de água. Novas tecnologias de ponta em desenvolvimento incluem técnicas de bioprocessamento lignocelulósico que possibilitem a co-produção de combustíveis e produtos químicos em “biorrefinarias” e modificações genéticas de matérias-primas de biomassa, para facilitar a aplicação de tecnologias de processos que podem atingir de 70% a 90% de eficiência na conversão de energia (Quadro 3.2).

### *Em resumo: Biomassa*

A indústria da biomassa é impulsionada pelo mercado e irá buscar avanços em produtividade em conformidade com o mesmo. Os agentes privados também vão querer remover barreiras comerciais – tanto tarifárias como técnicas – à utilização mais ampla de seus produtos. Mercados mais sofisticados, pressão pública, acordos internacionais e controles ambientais mais rigorosos estão forçando os produtores de biocombustíveis a desenvolver práticas social e ambientalmente sólidas que reduzam a necessidade de água e produtos químicos, preservem os ecossistemas,

reduzam os gases do efeito estufa e as emissões de poluentes convencionais, além de gerar empregos de qualidade. No entanto, subsídios e outros incentivos podem ser necessários para fazer avançar tecnologias de biomassa em estágios iniciais. Estes subsídios devem ser progressivamente removidos à medida que as indústrias de energia de biomassa subam na curva de aprendizagem. O esforço bem-sucedido do Brasil para desenvolver o etanol de cana como um combustível alternativo para o transporte, que hoje é plenamente competitivo em relação à gasolina em mercados internacionais, oferece um paradigma útil a esse respeito.

Ao mesmo tempo, o entusiasmo para com alternativas de biomassa aos combustíveis à base de petróleo para o transporte deve ser moderado: incentivos governamentais e imposições para promover a independência energética não devem distorcer abertamente as forças de mercado que moderam a concorrência entre os biocombustíveis, a produção de alimentos e outros usos do solo – nem devem saltar à frente da tecnologia necessária para a produção em larga escala dos biocombustíveis, de forma ambientalmente sustentável e economicamente sensata.

### 3.5 Resumo dos pontos principais

O mundo não está prestes a ficar sem energia: as reservas de carvão, por si sós, seriam suficientes para garantir centenas de anos de consumo nos níveis atuais e o potencial teórico de recursos renováveis é praticamente ilimitado. As limitações que enfrentamos são fundamentalmente ambientais e econômicas: podemos produzir novos suprimentos de energia que não causem riscos inaceitáveis, ambientais ou de outro tipo, a um preço, na quantidade e no prazo necessários para satisfazer a crescente demanda mundial?

- **Sem algum avanço tecnológico energético imprevisível, fundamental, nenhuma opção de fornecimento oferece, sozinha, a solução do tipo “único tiro” para os problemas de energia do mundo.** O caminho para a sustentabilidade certamente envolverá – junto com uma forte ênfase na eficiência energética e opções pelo lado da

demanda – um portfólio diversificado de recursos de fornecimento. Isso não significa que todas as opções de suprimentos devam ser buscadas com igual vigor. Os recursos mundiais são finitos e escolhas terão de ser feitas. Os cientistas podem contribuir para a seleção das prioridades de P&D, que devem se basear na economia, escalabilidade, potencial tecnológico e outros fatores.

- **Escolhas futuras em relação a vetores energéticos finais – como a eletricidade ou o hidrogênio – terão implicações importantes para o *mix* de fontes de energia primárias utilizadas para satisfazer as necessidades energéticas mundiais.**
- **Atualmente, preocupações regionais e globais a respeito de preços e da segurança do fornecimento são muito relevantes em relação ao petróleo convencional e, em escala menor, para o gás natural.** Considerando-se a natureza finita das reservas convencionais de petróleo, em particular, e a distribuição geográfica irregular desses recursos, as preocupações relacionadas com o petróleo e o gás continuarão a ser uma alta prioridade para muitos governos ao longo das próximas décadas. Assegurar o acesso ao gás natural será uma questão relevante, dada a importância do gás natural como um “combustível-ponte” na transição para uma carteira de recursos energéticos menos carbono-intensiva. Nesse meio tempo, para abordar as preocupações com a segurança do petróleo, será fundamental desenvolver alternativas ao petróleo convencional, especialmente no setor de transportes, que sejam compatíveis com outros objetivos de sustentabilidade. Ao mesmo tempo, vale destacar que os governos às vezes fazem lances errados. Incentivos e imposições mal concebidos podem produzir importantes consequências imprevistas e distorções de mercado indesejáveis.
- **Dada a existência de vastas reservas globais e o custo relativamente baixo, é provável que o carvão seja um elemento importante do quadro da energia por algum tempo.** Portanto, é urgente o desenvolvimento e comercialização de tecnologias – como a captura e sequestro de carbono – que permitam que o carvão continue a ser usado de uma forma que não crie riscos ambientais inaceitáveis.



- **A tecnologia nuclear pode dar uma importante contribuição para o futuro abastecimento de energia de baixo teor de carbono**, mas novos investimentos significativos em energia nuclear são improváveis, se não houver: apoio substancial do governo; colaboração internacional mais eficaz em relação às preocupações com as questões de segurança, resíduos e proliferação; mudanças na percepção pública; imposição de limitações de gases do efeito estufa que tornariam as tecnologias de baixo ou nulo teor de carbono mais custo-competitivas em relação às tecnologias de combustíveis fósseis convencionais. É necessário um reexame transparente e cientificamente dirigido das questões que envolvem a energia nuclear e suas possíveis soluções.
- **O potencial inexplorado de energia renovável da Terra é enorme e amplamente distribuído, tanto em países industrializados como nos países em desenvolvimento.** Em muitas situações, a exploração desse potencial oferece oportunidades únicas para promover objetivos de desenvolvimento ambiental e econômico. Quedas dramáticas de custos, o forte crescimento em muitas indústrias de energia renovável e novos compromissos programáticos são promissores. Por exemplo, a União Europeia adotou recentemente a meta de suprir 20% de suas necessidades energéticas usando fontes renováveis até 2020. No entanto, consideráveis barreiras tecnológicas e de mercado ainda persistem e devem ser superadas, para que as fontes renováveis de energia possam desempenhar um papel significativamente maior no *mix* de energia do mundo.

### Referências bibliográficas\*

AMERICAN PHYSICAL SOCIETY. **Nuclear power and proliferation resistance: securing benefits, limiting risks: a report by the Nuclear Energy Study Group of the American Physical Society Panel on Public Affairs.** Washington, D.C., 2005.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **International Nuclear Safety Center.** Argonne, IL. Disponível em: <[www.insc.anl.gov/](http://www.insc.anl.gov/)>.

BP. **Statistical review of world energy**, 2007. Disponível em: <<http://www.bp.com/statisticalreview>>.

BP. **Statistical review of world energy**, 2005. Disponível em: <<http://www.bp.com/statisticalreview>>.

DeCAROLIS, J.F.; KEITH, D.W. The costs of wind's variability: is there a threshold? **The Electricity Journal**, v.18, p. 69-77, 2005.

DeCAROLIS, J.F.; KEITH, D.W. The economics of large-scale wind power in a carbon constrained world. **Energy Policy**, v.34, p. 395-410, 2006.

EUROPEAN ECONOMIC INTEREST GROUP. **HDR Project Soutz**. Kutzenhausen, France, 2007. Disponível em: <<http://www.soutz.net/version-en.htm>>.

EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION AND GREENPEACE. **Wind Force 12: a blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020**. Brussels: Global Wind Energy Council, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Statistical databases**. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 2005. Disponível em: <[http://www.fao.org/waicent/portal/statistics\\_en.asp](http://www.fao.org/waicent/portal/statistics_en.asp)>.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind 2006 report**. Brussels, 2006.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind 2005 report**. Brussels, 2005.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; NASTARI, P.M.; LUCON, O. Ethanol learning curve: the Brazilian experience. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n.3, p. 301-304, 2003.

GRAUS, W.; WORRELL, E. **Comparison of efficiency, fossil power generation**. Ecofys. Utrecht, 2006.

GREENBLATT, J. Wind as a source of energy, now and in the future. [Unpublished paper commissioned for the Inter Academy Council study report, **Lighting the way: toward a sustainable energy future**]. Amsterdam: IAC, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Special report on carbon dioxide capture and storage**. [B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer (eds.)]. New York: Cambridge University Press, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Nuclear technology review 2004**. Vienna: IAEA, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2006**. Paris: WEA, 2006. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/2006.asp>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2004**. Paris: WEA, 2004. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/2004.asp>>.

JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. P. C. A global experience curve for wind energy. In: EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (Ed.). European Wind Energy Conference & Exhibition, Madrid, 16-19 June 2003. **Proceedings**. [(NWS-E-2003-37)].

KELLY, H.; WEINBERG, C.J. Utility strategies for using renewables. In: JOHANSSON, T. B.; KELLY, H.; REDDY, A.K.N; WILLIAMS, R.H. (Eds.). **Renewable energy: sources for fuels and electricity**. Washington, D.C.: Island Press, 1993.

LONG, S. [Workshop presentation]. Urbana, Champaign: Department of Crop Sciences, University of Illinois, 2006. Disponível em: <<http://www.cropsci.illinois.edu/>>.

MACEDO, I.C. Biomass as a source of energy. [Unpublished paper commissioned for the Inter Academy Council study report, **Lighting the way: toward a sustainable energy future**]. Amsterdam: IAC, 2005.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil**. São Paulo State Environment Secretariat; Government of the State of São Paulo, 2004.

MCDONALD, A. Nuclear expansion: projections and obstacles in the far East and South Asia. In: WORLD NUCLEAR ASSOCIATION ANNUAL SYMPOSIUM, 8-10 September 2004. London, World Nuclear Association, 2004. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/sym/2004/pdf/mcdonald.pdf>>.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **The future of coal: options for a coal-constrained world**. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **The future of nuclear power: an interdisciplinary MIT study**. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. National Development and Reform Commission. 2006. **The outline of the eleventh five-year plan of China's national economic & social development of People's Republic of China**. Disponível em: <<http://en.ndrc.gov.cn/>>.

PERLACK, R. D.; WRIGHT, L. L.; TURHOLLOW, A. F.; GRAHAM, R. L.; STOKES, B. J.; ERBACH, D. C. **Biomass as feedstock for a bioenergy and bio-products industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply**. [Joint

study sponsored by USDOE and USDA]. Prepared by Oakridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2005.

PORRITT, J. **Is nuclear the answer?** A commentary by Chairman, Sustainable Development Commission. London, 2006. Disponível em: <[www.sd-commission.org.uk](http://www.sd-commission.org.uk)>.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY. **Renewables:** global status report, 2006 update. Paris: REN21 Secretariat; Washington, DC: Worldwatch Institute, 2006. Disponível em: <[www.ren21.net](http://www.ren21.net)>.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY. **Renewables:** 2005 global status report. Washington, DC: Worldwatch Institute, 2005. Disponível em: <[www.ren21.net](http://www.ren21.net)>.

SOMERVILLE, C. Energy from biomass. [Workshop presentation for the Inter Academy Council study report, **Lighting the way:** toward a sustainable energy future]. Amsterdam: IAC, 2005.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM; UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy assessment:** energy and the challenge of sustainability. New York: United Nations, 2000.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM; UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy assessment:** overview, 2004 update. New York: United Nations, 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a research roadmap resulting from the Biomass to Biofuels Workshop, 7–9 December 2005, Rockville, Maryland. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewal Energy, 2006.

WILLIAMS, R. H., LARSON, E. D.; JIN, H. Comparing climate-change mitigating potentials of alternative synthetic liquid fuel technologies using biomass and coal. In: ANNUAL CONFERENCE ON CARBON CAPTURE AND SEQUESTRATION, 5. **Proceedings.** Alexandria, Virginia: DOE/NETL, May 2006a.

WILLIAMS, R. H., LARSON, E. D.; JIN, H. Synthetic fuels in a world with high oil and carbon prices. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREENHOUSE GAS CONTROL TECHNOLOGIES, 8. **Proceedings.** Trondheim, Norway, June 2006.

WORLD ATLAS AND INDUSTRY GUIDE. Surrey, U. K.: Aqua-Media International, 1998.

WORLD COMMISSION ON DAMS. **Dams and development:** a new framework for decision-making. London: Earthscan/James & James, 2000.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **French nuclear power program.** London, 2007. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf40.htm>>.

\* As Referências bibliográficas nesta edição foram adequadas às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

# 4

## O papel dos governos e a contribuição da ciência e tecnologia





**A** estrutura atual de incentivos de mercado e de condições regulatórias em grande parte do mundo, por si só, não produzirá os resultados sustentáveis nem decisões de investimentos socialmente ótimas. Podem existir alternativas às tecnologias dominantes de hoje, mas não há certeza se serão implementadas na escala e no prazo necessários para evitar algumas das consequências mais inquietantes da atual trajetória energética mundial.

O quadro da energia com certeza irá mudar; no entanto, sem uma intervenção de políticas e de inovação tecnológicas, não necessariamente para melhor. Se o objetivo é, simultaneamente enfrentar os riscos de mudanças climáticas, melhorar a segurança energética e expandir o acesso a modernos serviços de energia para os pobres do mundo – ao mesmo tempo que se melhora a qualidade ambiental e se protege a saúde pública – os governos terão de agir já e a tecnologia terá de melhorar.

Este capítulo discute o papel dos governos e a contribuição da ciência e tecnologia (C&T) para iniciar e apoiar uma ampla transformação dos sistemas energéticos mundiais. Certamente, os governos – com sua capacidade para influenciar mercados, tecnologia, e comportamento através de políticas e de regulamentações – têm um papel fundamental a desempenhar. Intervenções de políticas criteriosas, longe de interferir no funcionamento adequado dos mercados, podem ser necessárias para tratar de falhas difundidas do mercado e garantir que incentivos privados se alinhem aos imperativos sociais para produzir resultados econômica e ambientalmente sustentáveis. A experiência já demonstrou que economias puramente de mercado raramente tratam de forma adequada dos problemas macroeconômicos ou internacionais (como a poluição das águas e do ar ou da pesca em alto-mar) que apresentam características da “tragédia



dos bens comuns”. Ao mesmo tempo, o processo de inovação tecnológica para desenvolver novas opções energéticas para a próxima geração e as futuras também tem de se acelerar. Investimentos do setor público e privado em pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) de energia têm sido inadequados para os desafios energéticos do mundo e isso terá de mudar o mais rápido possível. Ao mesmo tempo, uma implementação mais ampla das tecnologias existentes deve ser impulsionada pelos governos antes ainda.

Em sua melhor forma, políticas de governo e PD&D em tecnologia interagem de forma complementar e mutuamente se apoiam. Políticas e regulamentações bem estruturadas podem gerar um *impulso* de mercado para tecnologias que já estão desenvolvidas e prontas para a comercialização. Ao mesmo tempo, investimentos conjuntos, públicos e privados, em PD&D em energia podem *impulsionar* o processo de inovação, expandindo o leque de opções tecnológicas que estarão disponíveis no futuro. Políticas relacionadas – com respeito a educar o público, emitir patentes e desenvolver capital humano nutrindo uma nova geração de profissionais e cientistas especialistas em energia – também têm um papel fundamental a desempenhar. Vários relatórios recentes argumentam que a combinação de mecanismos de tração e impulsão pode ser mais efetiva do que cada abordagem sozinha (NCEP, 2004; CBO, 2006).

Este capítulo também analisa, em linhas gerais, algumas das alavancas de políticas disponíveis para os governos, bem como o papel da ciência e tecnologia e algumas prioridades de PD&D de curto prazo para promover objetivos de energia sustentável. De início, vale lembrar que, enquanto o interesse em reduzir as emissões de gases de efeito estufa em si ser relativamente novo, a história das políticas energéticas e de PD&D em energia em todo o mundo é rica em experiência. Muitas nações têm buscado, em diferentes momentos, promover fontes nacionais de combustíveis, reduzir as emissões convencionais de poluentes relativos à energia, desenvolver novas opções tecnológicas ou tornar a energia mais amplamente disponível. Uma ampla variedade de estratégias para promover estes ou outros objetivos ligados à energia tem sido empregada, com diferentes graus de sucesso. Por um lado, um planejamento

energético inadequado e controles de preços e subsídios mal formulados, a uma taxa de mais de US\$ 200 bilhões ao ano, têm distorcido os mercados, produzido consequências involuntárias e, em alguns casos, levado à escassez artificial (UNDP, Undesa e WEC, 2004). Da mesma forma, o fato de grandes somas de dinheiro público terem sido gastas em programas de tecnologia que produziram, no máximo, resultados insatisfatórios ressalta a necessidade de um melhor gerenciamento dos futuros esforços em pesquisa e desenvolvimento (P&D), que devem ser submetidos a análises contínuas de custo-benefício por parte de especialistas, e à importância de buscar o objetivo final de transmitir os investimentos em tecnologia para o setor privado.

Por outro lado, o nível de conquistas também é impressionante. Programas de eletrificação rural proporcionaram a mais de centenas de milhões de pessoas o acesso a modernos serviços de energia. Muitos países estimulam, com sucesso, novas indústrias de energia, e leis e padrões ambientais promovem o desenvolvimento de tecnologias radicalmente mais limpas e mais eficientes. Em todo o mundo, a quantidade de energia utilizada e a poluição gerada para produzir um dólar de riqueza vêm caindo paulatinamente, mesmo que a qualidade de vida e o acesso a amenidades de energia tenham melhorado para amplos segmentos (apesar de não para todos) da população mundial.

#### 4.1 Opções de políticas

Os governos têm muitas opções para promover uma agenda de energia sustentável. A Tabela 4.1 fornece uma taxonomia básica de abordagens de políticas, juntamente com numerosos exemplos específicos: a intenção é sugerir a extensão e a variedade de estratégias disponíveis, mas de modo algum é exaustiva. Deve-se observar que a maioria de opções de políticas listadas na tabela pode ser aplicada para promover soluções, tanto pelo lado da oferta quanto pelo lado do uso final da equação de energia. Dentro da ampla categoria de “cenouras” estão as políticas

**Tabela 4.1** Opções de políticas para promover a transição para um futuro de energia sustentável

Incentivos: "cenouras"			
<b>Incentivos financeiros</b>		<b>Incentivos não financeiros</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créditos fiscais</li> <li>• Subsídios</li> <li>• Subvenções, outros financiamentos diretos</li> <li>• Garantias de empréstimo</li> <li>• Políticas de aquisição</li> <li>• Tarifas de alimentação</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• PD&amp;D com financiamento público</li> <li>• Investimentos em infraestrutura</li> <li>• Educação/ informação/ etiquetagem</li> <li>• Assistência técnica</li> <li>• Programas de prêmios/ reconhecimento</li> <li>• Acesso à rede elétrica</li> </ul>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencialmente úteis para promover tecnologias "de ponta".</li> <li>• Em geral politicamente populares.</li> <li>• Podem ser dirigidos para superar obstáculos específicos de mercado ou para promover tecnologias específicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exigem que o governo gaste verbas.</li> <li>• O gasto pode ser politicamente influenciado e nem sempre tem custo-efetivo (exemplo, os subsídios continuam, mesmo quando não mais necessários)</li> <li>• Resultados difíceis de prever.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecem meios para enfrentar outras falhas/ barreiras de mercado.</li> <li>• Normalmente politicamente populares.</li> <li>• Podem ter uma série de benefícios excedentes.</li> <li>• Podem ajudar a enfrentar preocupações com competitividade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificilmente visam PD&amp;D, investimentos em infraestrutura.</li> <li>• Capacidade institucional e técnica necessária para desenvolver e entregar programas.</li> <li>• Benefícios/ impactos podem ser limitados, especialmente sem incentivos financeiros complementares.</li> </ul>
Dissuasores: "galhos"			
<b>Políticas com base no mercado</b>		<b>Regulamentações prescritivas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impostos sobre energia ou emissões</li> <li>• Programas <i>cap-and-trade</i> (topo e comércio) de emissões</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Padrões de emissões</li> <li>• Padrões de eficiência</li> <li>• Padrões de portfólio</li> </ul>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem ser aplicados em toda a economia</li> <li>• Os mercados entregam reduções menos custosas.</li> <li>• Empresas e consumidores individuais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem gerar forte oposição política, pois elevam preços.</li> <li>• Preocupação causada pelo impacto do preço da energia sobre os</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efetivas onde sinalizações de preços sozinhas não produziram todas as respostas custo-efetivas (ex.: mercado de carros, construção e</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalmente não estimulam nem premiam mais do que a conformidade mínima.</li> <li>• Exigem capacidade técnica e institucional</li> </ul>

<p>detêm escolha, flexibilidade. Gera rendas que podem ser utilizadas para outros fins.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinalizações consistentes de preço, produzem resultados economicamente racionais em todos os setores cobertos.</li> <li>• Podem ser projetados para alcançar objetivos em termos de custo, reduções de emissões etc.</li> </ul>	<p>domicílios pobres (deve-se notar, porém, que a renda gerada pela política pode ser usada para tratar este problema).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem causar preocupação quanto a impactos sobre a indústria nacional em termos de emprego e competitividade em mercados mundiais.</li> <li>• Sinalizações de preços podem ser inadequadas para superar outras falhas de mercado ou para estimular novas tecnologias.</li> </ul>	<p>eletrodomésticos).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados de políticas são relativamente certos (apesar de os custos talvez não serem).</li> <li>• Muitas fábricas e indústrias já estão sujeitas a algum tipo de regulamentação.</li> <li>• Custos são menos evidentes, potencialmente reduzindo a oposição política.</li> <li>• Não são necessárias ações por parte do consumidor.</li> </ul>	<p>para desenvolver e fazer vigorar normas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessárias diferentes políticas para diferentes setores.</li> <li>• A definição de custo-efetividade é incerta e normalmente contenciosa, especialmente se os reguladores têm de projetar futuros desenvolvimentos tecnológicos.</li> <li>• Menos flexíveis e (potencialmente) mais custosas do que as abordagens com base no mercado.</li> <li>• As políticas têm de ser revistas com o tempo.</li> </ul>
--	---	---	--

---

que se apoiam sobre incentivos positivos para estimular as atividades ou tecnologias desejadas; os exemplos incluem subvenções, garantias de empréstimos, subsídios ou informações e programas de assistência técnica. Esforços para conscientização pública fornecem treinamento (especialmente para profissionais de energia) e educam quem projeta edifícios; arquitetos também podem ajudar a promover uma agenda de energia sustentável. Investimentos em infraestrutura pública, apesar de não constituírem exatamente um incentivo, são incluídos aqui porque esses investimentos podem ajudar a superar obstáculos econômicos ou tecnológicos que, de outra forma, poderiam impedir a adoção de novas tecnologias. Por exemplo, sistemas eficientes de transmissão de eletricidade de longa distância podem abrir novos mercados para recursos de energia renovável, ao mesmo tempo que sofisticadas redes de medição podem auxiliar domicílios e empresas a gerenciar seu consumo de energia de forma mais eficiente.

As políticas que criam incentivos positivos tendem a ser politicamente

te populares (ou, pelo menos, relativamente não controversas), mas normalmente exigem que os governos gastem seus rendimentos, frequentemente com resultados incertos. Como quase todas as opções de políticas, impõem custos de oportunidades sobre a sociedade (no sentido de que o dinheiro gasto poderia ser destinado a outros usos). Porém, como esses recursos são difusos e arcados pelos contribuintes, costumam, em um sentido político, ser ocultos. A efetividade de programas voluntários, com base em incentivos ou em informação depende da escala de recursos que lhes são destinados e de quão eficientemente esses recursos são aplicados: direcionar o gasto social de forma que alcance os máximos benefícios públicos ao menor custo é sempre um considerável desafio. Subsídios, por exemplo, podem ser bastante eficazes para acelerar a adoção de certas tecnologias. Mas os subsídios também podem ser ineficientes (na medida em que beneficiam domicílios ou indústrias que não precisam deles) e difíceis de remover, a menos que uma retirada gradual seja parte da política desde o princípio. Além disso, subsídios que são muito grandes não incentivam a inovação a baixar custos e podem congelar o desenvolvimento.

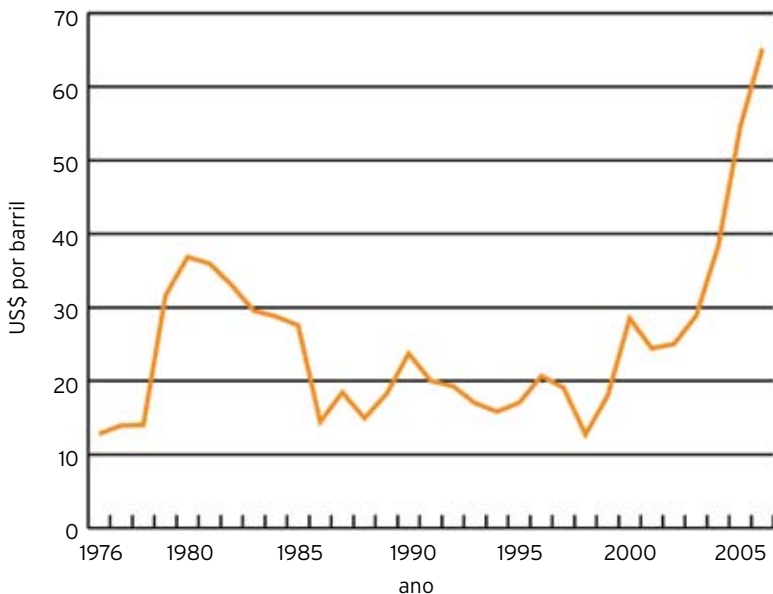
Uma questão que ainda não foi resolvida é como melhor combinar investimentos de capital em orçamentos de edifícios comerciais e residenciais energo-eficientes com economias que podem ser obtidas em custos de operação e de manutenção. Em países industrializados, investimentos adicionais raramente são feitos a menos que o tempo de retorno de capital seja menor do que dois anos; e em países em desenvolvimento, o custo inicial domina virtualmente todas as decisões de investimento. Se o tempo de retorno de capital de investimentos em eficiência energética fosse estendido para de 6 a 10 anos, a indústria da construção se transformaria. Regulamentações como códigos de edifícios energo-eficientes são uma solução parcial; o acesso a capital de baixo custo dirigido a investimentos em eficiência energética, tanto em construções novas quanto em modernização de edifícios, também é necessário.

Os governos também têm a opção de implementar “galhos” de políticas para impor mudanças de tecnologia e de comportamento. Essa categoria de abordagens pode atingir os resultados desejados mais rápida

e eficientemente (isto é, com custos sociais líquidos mais baixos), e normalmente não envolve grandes dispêndios do tesouro público. Algumas opções, como impostos sobre combustíveis, na verdade geram renda. Remover os subsídios de fontes convencionais de energia ou garantir que os preços de energia reflitam os custos externos e benefícios também pode produzir resultados efetivos alternando os incentivos de mercado para diferentes tecnologias. (Deixar de incluir externalidades nos preços de mercado, por si só, normalmente já se constitui em uma forma de subsídios para tecnologias bem estabelecidas.) Não é de surpreender, no entanto, que a percepção de políticas que elevam os preços têm mais possibilidade de enfrentar resistência política organizada por parte dos interesses afetados, de fazer surgir receios sobre o potencial para impactos regressivos sobre domicílios de baixa renda e sobre efeitos adversos sobre a competitividade da indústria. Muitos desses receios podem ser amenizados com um projeto cuidadoso de política, mas também é de fundamental importância educar o público e fomentar uma maior conscientização sobre o desafio da sustentabilidade energética de forma a construir apoio político para as difíceis escolhas de políticas.

Elaboradores de políticas também devem reconhecer que os mercados de energia são extremamente voláteis, e assim bastante sensíveis a interrupções de fornecimento e/ou manipulação. Um número significativo de investimentos em tecnologia de energia iniciado durante o pico do preço do petróleo que começou em meados da década de 1970 foi varrido quando o custo do petróleo caiu para US\$ 20 por barril na década de 1980 e permaneceu nesse nível por quase toda a década de 1990 (Figura 4.1). É menos provável que o setor privado faça investimentos de longo prazo em novas tecnologias de energia se houver uma possibilidade real de que o preço do petróleo volte a cair dos níveis atuais de US\$ 60-70 por barril para menos de US\$ 30 por barril. Na verdade, os *stakeholders* de uma dada indústria às vezes preferem proteger seus interesses econômicos contra a ameaça de uma nova tecnologia baixando o preço de seu produto antes que o competidor em ascensão possa avançar muito na curva de aprendizado.

**Figura 4.1** Desenvolvimento dos preços do petróleo cru nas últimas três décadas



Obs.: Preços nominais (sem ajuste de inflação) de compra do tipo Brent cru.

Fonte: Platts, 2007.

Políticas de ciência e tecnologia não são identificadas individualmente como opções distintas na Tabela 4.1, apesar de quase todos os exemplos listados poderem ser usados para, direta ou indiretamente, estimular o desenvolvimento e implementação de mais tecnologias sustentáveis de energia. É claro que o apoio público para pesquisa e desenvolvimento (incluído na política de “cenouras” na Tabela 4.1) está entre as ferramentas mais importantes disponíveis para que os governos influenciem os futuros desenvolvimentos de energia. Por causa de sua importância e complementaridade com outras opções de políticas, no entanto, pesquisa e desenvolvimento (P&D) com financiamento público estão incluídos em uma discussão mais ampla sobre o papel da ciência e tecnologia na segunda metade deste capítulo.

## 4.2 Opções de políticas em contexto

O melhor conjunto de estratégias para promover objetivos de energia sustentável variam dependendo das prioridades de políticas de um dado país; de sua capacidade financeira, institucional e tecnológica; de suas tradições de políticas e de regulamentações e de sua estrutura de mercado; além de outros fatores. Para muitos países ricos e industrializados, o principal objetivo será maximizar avanços de eficiência energética custo-efetivos; acelerar a adoção de tecnologias de baixa ou nenhuma emissão de carbono; e enfrentar os receios relativos à segurança energética (especialmente no tocante à dependência de petróleo e de gás natural, além da não proliferação nuclear). Políticas bem adequadas para promover esses objetivos podem incluir programas de normas, regulamentações ambientais e com base no mercado (como imposto sobre carbono ou programa de comércio de emissões).

A situação para países em desenvolvimento, em contraste, pode se complicar com imperativos e restrições adicionais. Na medida em que alguns setores da economia e segmentos da população consomem energia de forma semelhante à dos países industrializados, os países em desenvolvimento podem compartilhar objetivos semelhantes – e confrontar oportunidades similares – em termos de tratar de externalidades ambientais relacionadas à energia e problemas de segurança energética. Por isso, políticas que visem a promover combustíveis alternativos, tecnologias de baixa emissão de carbono ou avanços em eficiência são tão urgentemente necessárias em países em desenvolvimento quanto em países industrializados.

Nessas situações, preços e outras políticas podem ser utilizados para promover investimentos em eficiência energética e em tecnologias alternativas. Onde sinalizações de preços são utilizadas para desestimular o consumo e/ou produzir mais alternativas tecnologicamente sustentáveis, pode ser necessário amenizar os impactos potencialmente regressivos sobre domicílios de renda mais baixa; isso normalmente pode ser feito utilizando-se uma variedade de mecanismos de políticas. Ao mesmo tempo, outras políticas – como normas para eletrodomésticos e equipamentos – podem ajudar a assegurar que, à medida que as economias em desenvol-



vimento se industrializem, possam “saltar” para tecnologias mais limpas e mais eficientes. Países que estão rapidamente expandindo o número de prédios, infraestrutura e bens de capital têm uma oportunidade única para “embutir” melhor desempenho energético a um custo mais baixo e com maiores benefícios de longo prazo do que seria possível se os passivos ambientais e de energia só fossem tratados como reflexão tardia.

A lista de opções de políticas disponíveis é longa e se presta para variações virtualmente sem fim, conforme indicado na Tabela 4.1. A maioria dessas opções tem pontos fortes e desvantagens. É improvável que uma única política alcance todos os objetivos desejáveis. Uma política destinada a criar sinalizações de preço consistentes para toda a economia, para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (como o imposto de carbono ou o programa *cap-and-trade*) podem não ser suficientes para assegurar que todas as oportunidades de eficiência custo-efetiva sejam capturadas ou consigam vencer barreiras para a entrada de novas tecnologias. Políticas complementares (com padrões de eficiência veicular e de eletrodomésticos) podem ser adequadas. Pode-se lançar mão de subsídios ou créditos fiscais utilizados para estimular a inovação com cláusulas de “crepúsculo” embutidas.

Com frequência, um projeto de política criterioso pode superar algumas das dificuldades de uma abordagem específica, produzindo estratégias híbridas que combinam as melhores características das múltiplas opções. Um padrão de portfólio pode ser utilizado para fazer com que uma porcentagem específica da produção de eletricidade provenha de recursos renováveis ou sem emissão de carbono, ao mesmo tempo que permite que o mercado selecione que conjunto desses recursos atende à exigência da forma mais custo-efetiva. Da mesma forma, mecanismos inovadores como “leilão reverso” – em que fornecedores de energia limpa dão lances por uma parcela de um conjunto disponível de incentivos de tempo limitado com base no mínimo subsídio necessário para competir com sucesso no mercado – podem ajudar a maximizar os benefícios atingidos usando os poucos recursos públicos. Além disso, comércio ou rateio pode ser utilizado para implementar um padrão de eficiência, ao mesmo tempo que se incorpora parte dos benefícios de flexibilidade e redução de custo associados aos programas com base no mercado.

Países, individualmente, com certeza terão de avaliar suas opções e prioridades para decidir sobre o conjunto de abordagens adequado às suas circunstâncias específicas. Mesmo que diferentes países busquem abordagens diferentes, no entanto, é provável que benefícios significativos possam ser alcançados maximizando-se a coordenação e o compartilhamento de informações, sempre que viável. Por exemplo, fabricantes que vendem seus produtos em todo o mundo podem se beneficiar da eficiência ou de padrões de emissões consensuais, enquanto certos setores econômicos, como frete marítimo e aviação, podem ser regulamentados mais efetivamente em nível internacional. De forma semelhante, a capacidade de comercializar créditos bem definidos e confiavelmente documentados de reduções de emissões além das fronteiras nacionais pode permitir reduções significativas de custo na redução global de emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo que fornece um importante mecanismo para facilitar a transferência de tecnologia para nações mais pobres.

Uma importante e pertinente pergunta surge: *como se pode estimular as empresas em países ricos a compartilhar tecnologias avançadas – tanto tecnologias de uso final quanto de fornecimento – com países em desenvolvimento?* Empresas não são instituições de caridade e exigir que compartilhem propriedade intelectual abaixo do “valor de mercado” desestimulará o investimento no desenvolvimento de novas tecnologias. Por outro lado, sem subsidiar o custo, alternativas de tecnologia superior podem deixar de ser usadas em países como a China e a Índia. Seria útil, portanto, explorar opções para fornecer acesso de baixo custo à propriedade intelectual relativa a tecnologias e práticas de energia sustentável. Por exemplo, pode ser possível criar um mecanismo para compensar os detentores da propriedade intelectual a partir de um fundo internacional estabelecido por países mais ricos.

### 4.3 A importância de sinais de mercado

Apesar de se poder arriscar poucas recomendações de políticas específicas em nível internacional, certas políticas podem ter ampla aplicabilidade. Padrões de eficiência e códigos de obras foram implementados

de forma custo-efetiva em muitos países industrializados. O conhecimento adquirido pode ser ampliado e aprofundado para ajudar a moderar o crescimento de demanda de energia em economias que se industrializam rapidamente. Subsídios que distorcem os mercados de energia, particularmente quando o fazem de forma a favorecer maior consumo de combustíveis fósseis, devem ser reduzidos e reformados; em vez disso, os preços de energia devem refletir ao máximo grau possível externalidades ambientais e outras.

A questão é fundamental: sem incentivos de mercado para promover mudança de comportamento e decisões de investimento, políticas que se concentram somente ou principalmente sobre reduções voluntárias de emissões de gases de efeito estufa e P&D em tecnologia têm menos possibilidade de promover mudanças em uma escala compatível com o desafio ambiental à frente. As opiniões variam quanto ao nível de sinalizações de preços que se pode garantir, mas muitos especialistas acreditam que um preço da ordem de US\$ 100 a US\$ 150 por tonelada de emissões de carbono equivalente (em outras unidades amplamente utilizadas, US\$ 27 a US\$ 41 por tonelada de emissões de dióxido de carbono equivalente) pode ser necessário para superar os diferenciais atuais de custo para muitas tecnologias de baixa ou nenhuma emissão de carbono e para estimular mudanças de ampla escala que serão necessárias para estabilizar as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. As duas opções de políticas mais frequentemente propostas para tratar de problemas do clima são os impostos sobre energia ou carbono e programas *cap-and-trade*; características importantes de cada abordagem são discutidas no Quadro 4.1.

É importante enfatizar, no entanto, que estabelecer em todos os mercados que haverá um preço sobre as emissões – na faixa de US\$ 100 a US\$ 150 por tonelada métrica de carbono equivalente (de US\$ 27 a US\$ 41 por tonelada de dióxido de carbono equivalente) evitadas – é mais importante do que estabelecer exatamente o número de anos em que essa transição ocorrerá. Para muitos países, considerações pragmáticas podem defender uma abordagem com fases e com várias frentes, em que uma sinalização inicial de preço de carbono seja gradualmente elevada ao longo do tempo e complementada por outras políticas para enfrentar as barreiras de

mercado remanescentes e acelerar a comercialização de mais tecnologias mais eficientes e com baixas emissões de carbono. Políticas complementares, tais como padrões de eletrodomésticos e de construção e requisitos de controle de poluição atmosférica, podem, da mesma forma, ser introduzidas lentamente, mas inexoravelmente. Ao fazer com que a resistência de *stakeholders* bem estabelecidos comece a parecer inútil, essa abordagem pode efetivamente estimular a inovação e reduzir os custos de transição. Em suma, uma vez que a infraestrutura mundial de energia inclui muitos bens capital-intensivos e de longa duração, seria extremamente caro e provavelmente inviável transformar essa infraestrutura da noite para o dia. Exatamente pelo mesmo motivo, porém, políticas que permitam a expansão contínua de sistemas energéticos carbono-intensivos também são insensatos e, à medida que políticas relativas ao clima são introduzidas, também provam ter um alto custo. Sendo assim deve-se iniciar logo o processo de mudança.

#### Quadro 4.1 Redução de emissões: Impostos *versus* programas *cap-and-trade*

Impostos sobre carbono e programas *cap-and-trade* são duas opções regulatórias com base no mercado mais frequentemente apresentadas para limitar emissões de gases de efeito estufa. Ambas são bem adequadas para situações em que há um grande número e variedade de fontes de emissões que têm de ser regulamentadas e onde as oportunidades para mitigação, similarmente, são diferentes e caracterizadas por uma ampla gama de custos. Na verdade, o argumento evidente em favor de cada uma das abordagens é exatamente o de se apoiarem sobre forças do mercado para produzir reduções de emissões ao mais baixo custo marginal e sem depender de elaboradores de políticas para identificar um conjunto ótimo de caminhos tecnológicos.

O imposto sobre carbono recomendado pela teoria neoclássica é o que precisamente reflete o dano ambiental ou “externalidade” associado com cada tonelada de emissões e que, portanto, produz um nível socialmente ótimo de emissões. Em outras palavras, para reduzir emissões, a sociedade como um todo gastará apenas o que valem essas emissões em termos de danos evitados. O imposto sobre o carbono teria o efeito de elevar os preços de combustíveis fósseis na proporção de seu

conteúdo de carbono e - supondo-se que os mercados funcionem adequadamente - estimularia os usuários de combustíveis fósseis a reduzir seu consumo sempre que for mais barato fazê-lo do que pagar impostos.<sup>a</sup> O custo de uma política de impostos é transparente e conhecido previamente. O que não se sabe de antemão é quanto de abatimento de emissões ocorrerá em resposta, uma vez que isso depende do custo e da magnitude das oportunidades de mitigação disponíveis em toda a economia. Outra característica relevante de um imposto sobre o carbono é que gera renda para os governos que pode ser utilizada para outros fins socialmente produtivos.

Monetizar os danos ambientais associados a emissões de carbono é um primeiro passo necessário, apesar de difícil. Mesmo onde isso é feito, no entanto, há numerosas evidências que sugerem que os mercados respondem de forma deficiente à sinalização de preço de carbono. Pelos motivos discutidos no Capítulo 3, oportunidades de eficiência energética custo-efetivas normalmente são igualmente negligenciadas por grandes corporações e por consumidores, e novas tecnologias costumam enfrentar barreiras de entrada que não são estritamente uma função de custo. Impostos sobre carbono ou energia provaram ser politicamente impalatáveis em alguns países - notadamente os Estados Unidos - apesar de terem sido prontamente aceitos em outros lugares.

De muitas formas, um sistema *cap-and-trade* funciona como um imposto. A recente experiência da União Europeia, que criou um mercado de carbono com valores na casa dos US\$ 100 por tonelada através de um programa do tipo *cap-and-trade* para grandes emissores industriais de dióxido de carbono, fornece um exemplo útil e real de como essa abordagem pode funcionar na prática. Em princípio, o mecanismo é simples: o governo determina que cada tonelada de emissão seja acompanhada de uma licença e depois restringe a quantidade de licenças disponíveis para emissores. Assim como no caso do imposto, essa abordagem efetivamente eleva o preço dos combustíveis fósseis e - desde que as licenças possam ser livremente comercializadas - estimula as reduções de emissões de mais baixo custo. Adicionalmente, alguns programas *cap-and-trade* oferecem "créditos de compensação" para estimular atividades de mitigação em setores não cobertos pelo limite máximo. As empresas usam as licenças somente quando o custo de usá-las é mais baixo do que o custo de evitar emissões. Como um imposto, um programa *cap-and-trade* pode gerar renda se o governo optar por leiloar licenças, apesar de programas anteriores desse tipo normalmente concederem a maioria das licenças gratuitamente a entidades regularizadas.<sup>b</sup>

A diferença fundamental entre as duas abordagens é que, com o imposto, os custos são conhecidos, mas as emissões finais não são. Por outro lado, sob um programa *cap-and-trade*, as emissões finais são conhecidas (supondo-se que as exigências

entrem em vigor, são determinadas pelo topo) e os custos são incertos. Em teoria, um imposto pode ser ajustado para atingir uma meta desejada de emissões. Da mesma forma, é possível projetar um sistema *cap-and-trade* que melhore a certeza de preço construindo uma “válvula de segurança” - essencialmente uma promessa de que o governo venderá licenças adicionais e permitirá que as emissões aumentem acima do máximo se o preço de mercado das licenças exceder um certo patamar. Esta última abordagem pode ser atraente em situações em que considerações políticas favoreçam uma abordagem *cap-and-trade*, mas também há problemas significativos sobre custo e competitividade.

- a. Cláusulas adicionais podem ser necessárias sob um sistema com base em impostos para reconhecer as emissões evitadas pela captura e sequestro de carbono. Um abatimento de impostos, por exemplo, pode ser utilizado para acomodar essa forma de mitigação.
- b. Conceder licenças gratuitas para entidades regularizadas pode parecer que se “mascaram” os impactos de custo de um programa *cap-and-trade*, mas na prática as duas políticas elevam os preços de energia e geram renda. Em um programa *cap-and-trade* com concessão gratuita, esta renda simplesmente vai para os detentores das licenças, em vez de reverterem para o tesouro público.

#### 4.4 O papel da ciência e tecnologia

Nos últimos 150 anos, progressos na ciência e tecnologia foram o principal motor do desenvolvimento humano e social, amplamente expandindo os horizontes do potencial humano e permitindo transformações radicais na qualidade de vida de milhões de pessoas. O controle de fontes modernas de energia está entre as maiores conquistas do progresso científico e tecnológico vivido. Aumentar o acesso a formas modernas de energia é essencial para criar condições para o progresso futuro. Todas as previsões disponíveis apontam para um crescimento rápido e contínuo da demanda global de energia para mover o crescimento econômico e atender às necessidades da população mundial que continua a crescer. Nesse contexto, poucas questões são mais prementes do que: como ciência e tecnologia podem se engajar para enfrentar o desafio de sustentabilidade energética de longo prazo?

Como ponto de partida para explorar essa questão, vale distinguir entre várias fases geralmente aceitas da evolução tecnológica, começan-

do pela pesquisa científica básica, seguida de desenvolvimento e demonstração, PD&D. Quando tudo estiver indo bem, a PD&D é acompanhada de mais uma letra – o i da fase de implementação – em que tecnologias demonstradas cruzam o patamar da viabilidade comercial e conquistam a aceitação do mercado. Em geral, o papel do governo é mais perceptível nas fases iniciais de *pesquisa e desenvolvimento* dessa progressão, ao passo que o setor privado tem um papel maior nas fases de *demonstração e de implementação*. Entretanto, o governo também pode prestar uma contribuição importante nas fases de demonstração e de implementação inicial, por exemplo, financiando projetos de demonstração, fornecendo incentivos financeiros para superar problemas iniciais de implementação e ajudando a criar mercado para novas tecnologias através de políticas de aquisição e de outras.

O restante desta seção se concentra sobre as fases pré-implementação, em que as questões ciência e tecnologia são mais importantes. No entanto, vale enfatizar que a fase de implementação/comercialização é crucial e gera muita informação e percepção que podem beneficiar a P&D focada sobre as fases iniciais, em um processo de refinamento e de adoção que é fundamentalmente iterativo. Muitas tecnologias demonstradas se defrontam com problemas significativos de mercado quando se aproximam da fase de implementação; para algumas – veículos híbridos, hidrogênio como combustível de transporte, energia solar, ciclo combinado de gasificação integrada (CCGI) com base em carvão mineral e células combustíveis – o custo, mais do que a viabilidade tecnológica, torna-se o problema central. Espera-se que *stakeholders* bem estabelecidos do setor privado resistam ou mesmo ativamente minem a implementação de novas tecnologias, o que vem a exigir intervenções de políticas adicionais.

A maioria das tecnologias de energia que agora se encontram em alguma fase do processo de PD&D tem algo em comum: ou por si mesmas ou combinadas umas às outras, constituem uma grande promessa para reduzir emissões de dióxido de carbono (Tabela 4.2). Uma nova tecnologia que promove eficiência de uso final (em edifícios, eletrodomésticos, veículos e processos) provavelmente oferece as oportunidades

mais custo-efetivas, relativas à tecnologia pelo lado do fornecimento. Dentro de um amplo conjunto de opções de fornecimento verificadas na Tabela 4.2, o uso de biocombustíveis no setor de transportes pode oferecer o maior impulso, pelo menos dentro dos próximos 10 a 20 anos, enquanto – em uma linha de tempo de certa forma mais longa – a captura e armazenagem de carbono podem ter um papel relevante. Essas mudanças, porém, só ocorrerão dentro das próximas décadas se uma ação inicial decisiva for tomada em nível global dentro dos próximos cinco a dez anos. PD&D adicionais em reatores nucleares de terceira ou quarta geração podem ajudar a diversificar o futuro portfólio de energia de baixa emissão de carbono do mundo, mas somente se acordos sólidos, que possam vigorar em todo o mundo forem feitos sobre a não proliferação de armas e sobre o descarte/armazenagem de combustível nuclear usado. Maior atenção de PD&D também deve ser dada para aumentar a eficiência e reduzir o custo de tecnologias de conversão e armazenagem de energia, incluindo células combustíveis, baterias convencionais e ar comprimido.








Deve-se enfatizar que a Tabela 4.2 lista somente algumas das oportunidades promissoras de PD&D que existem pelo lado do uso final da equação de energia. Com mais investimentos em tecnologia, avanços significativos podem ser alcançados na eficiência de dispositivos-chave no uso de energia, como veículos, eletrodomésticos e equipamentos, bem como em sistemas energéticos maiores, como cidades, sistemas de transporte, processos industriais e prédios inteiros. As tecnologias necessárias ainda estão em fase de pesquisa em algumas áreas promissoras, que incluem:



- extrair energia útil de forma eficiente da parte lignocelulósica da biomassa;
- elevar o rendimento da biomassa aumentando a água da fotossíntese e as eficiências nutricionais através da engenharia genética;
- aplicar nanotecnologia e/ou usar novos materiais para aumentar a eficiência de conversão de energia de equipamentos fotovoltaicos; e
- desenvolver opções de armazenagem em estado sólido para o hidrogênio;



**Tabela 4.2 Oportunidades de P&D em energia**

Tecnologias	P&D	Demonstração
<b>Setor de transportes</b>		
Veículo híbrido	Amarelo	
Veículo a célula combustível de hidrogênio	Amarelo	
Combustível - etanol (celulósico)	Café	
Combustível - hidrogênio	Café	
<b>Setor industrial</b>		
Processo de produção de materiais	Café	
Eficiência de materiais/produtos	Amarelo	Café
Substituição de matérias-primas	Café	
Captura e armazenagem de dióxido de carbono	Café	
<b>Setor predial e de equipamentos</b>		
Tecnologias de aquecimento e refrigeração	Amarelo	
Sistemas de gerenciamento de energia em edifícios	Amarelo	
Sistemas de iluminação	Amarelo	
Redução de perdas do modo de espera		Amarelo
Medidas de envelopagem de edifícios	Amarelo	
Aquecimento solar e refrigeração		Amarelo
<b>Setor de geração de energia</b>		
Biomassa	Amarelo	
Geotérmico	Amarelo	
Eólico (em terra e em alto-mar)		Amarelo
Solar fotovoltaico	Café	
Concentração de energia solar	Amarelo	Café
Energia oceânica	Café	
Ciclo avançado de vapor (carvão mineral)		Amarelo

Ciclo combinado de gasificação integrada (carvão mineral)	
Células combustíveis	
Captura e armazenagem de carbono + ciclo avançado de vapor com separação de gás de combustão (carvão mineral)	
Captura e armazenagem de carbono + ciclo avançado de vapor com <i>oxyfueling</i> [substituição do ar combustível por oxigênio] (carvão mineral)	
Captura e armazenagem de carbono + ciclo combinado de gaseificação integrada (carvão mineral)	
Captura e armazenagem de carbono + separação do gás de combustão por absorção química (gás natural)	
Nuclear - geração II e III	
Nuclear - geração IV	

 Indica oportunidades e necessidades significativas  
 Indica que a tecnologia sob escrutínio se beneficiaria com PD&D adicionais e/ ou demonstração

Fonte: IEA, 2006.

Outras tecnologias necessitam de mais pesquisa aplicada ou desenvolvimento adicional, inclusive a extrapolação de um modelo experimental de laboratório em funcionamento. A transição para a demonstração, que é pré-requisito para a implementação, é fundamental e normalmente recebe atenção insuficiente daqueles que estão ou estiveram engajados em financiar a fase de P&D.

Em suma, a comunidade mundial de C&T tem um papel central a desempenhar para possibilitar a transição para sistemas de energia sustentável. Pelo menos duas condições, no entanto, devem ser atendidas:

- O financiamento (público e privado) para PD&D em energia deve ser suficiente.
- Esforços de PD&D devem ser efetivamente direcionados e internacionalmente coordenados para tratar da equação de energia tanto pelo lado do fornecimento quanto da demanda.

Quanto à primeira condição, deve-se notar que os gastos globais médios, públicos e privados, em P&D em energia diminuiram nas duas últimas décadas, tendendo a estabilizar-se na última década, enquanto os gastos públicos médios totais em todas as formas de P&D aumentaram nesse mesmo período (Kammen e Nemet, 2005; *Nature*, 2006). A Figura 4.2 mostra os gastos públicos totais em P&D em energia pelos países-membros da IEA e os compara ao preço global do petróleo (em US\$ por barril) no período 1974 a 2004. Em 2005, os gastos totais com P&D (na mesma base de paridade de poder de compra e ajustada pela inflação ao valor do dólar no ano de 2000) chegaram a US\$ 726 bilhões para países OCDE e US\$ 155 bilhões para países não OCDE. As parcelas dos governos nesses gastos foram de 30% e 40%, respectivamente; assim os gastos públicos totais em P&D chegaram a US\$ 280 bilhões (OCDE, 2006a). Aproximadamente US\$ 9 bilhões,<sup>62</sup> a parcela desses gastos especificamente direcionados a tecnologias de energia, respondem por meros 3,2% de todo o financiamento público em P&D.

O desenvolvimento de um portfólio diversificado de tecnologias de energia sustentável exigirá um grande impulso – o dobro – de investimentos públicos em todo o mundo em P&D em energia. Tal aumento em financiamento de P&D em energia deve ocorrer nos próximos cinco anos e possivelmente terá de ser sustentado por várias décadas pelo menos, se não mais. Ao mesmo tempo, governos devem promover a expansão de investimentos do setor privado em P&D em energia de longo prazo. A indústria pode trazer uma experiência crucial e percepções ao processo de PD&D (especialmente uma vez que a implementação costuma ocorrer através do setor privado), bem como maiores recursos do que os existentes para os governos, uma vez que o estágio de implementação tenha sido alcançado. Políticas governamentais – como um programa *cap-and-trade* para limitar emissões ou imposto sobre carbono – seriam fundamentais para criar incentivos para o setor privado aumentar seus investimentos em PD&D. Assim, por exemplo, uma política para aumentar a contribuição de novas fontes renováveis, de energia neutra em carbono, forçarão as

---

62. Esse número exclui gastos para pesquisa básica, mas inclui financiamento de projetos de demonstração.

empresas “tradicionais” de energia a repensarem seu portfólio futuro de produto e estratégias de mercado.

A incerteza política contínua dificulta o desenvolvimento de estratégias de negócio de médio e longo prazo pelas empresas de energia. Durante o período normalmente prolongado necessário para formular uma nova política abrangente, os governos podem reduzir essa incerteza adotando uma legislação que recompense a ação antecipada na direção certa, ao mesmo tempo que penaliza atividades adicionais contraproducentes para alcançar objetivos de sustentabilidade.

Maior financiamento público em PD&D em energia pode advir de várias fontes. Em muitos países industrializados e grandes países em desenvolvimento, muito poderia se conseguir pela mudança de foco ou redirecionamento de fundos que já estão no orçamento nacional.<sup>63</sup> Fundos adicionais podem ser obtidos com a racionalização dos programas de subsídios existentes e/ou levantando novos rendimentos através de impostos sobre consumo de energia ou sobre poluição (do tipo de impostos sobre produtos comercializados) ou através de leilões de licenças a emitir sob um programa de comércio de emissões.

Naturalmente, o sucesso depende não apenas de financiamento, mas de programas bem gerenciados. Uma vez que a escala do desafio tende a continuar a exceder os recursos públicos disponíveis para enfrentá-lo, esforços de PD&D em energia em todo o mundo devem ser cuidadosamente focalizados, dirigidos a responder perguntas concretas e a resolver problemas definidos. PD&D em energia também deve ser coordenado internacionalmente e realizado em um quadro de colaboração – tanto entre países quanto entre os setores público e privado – para evitar duplicação desnecessária e uso ineficiente de fundos. Esforços internacionais para promover coordenação e colaboração devem envolver profundamente os países em desenvolvimento, ao menos para ajudá-los a “saltar” para tecnologias e sistemas de energia mais avançados. Implicitamente, isso exige esforços con-

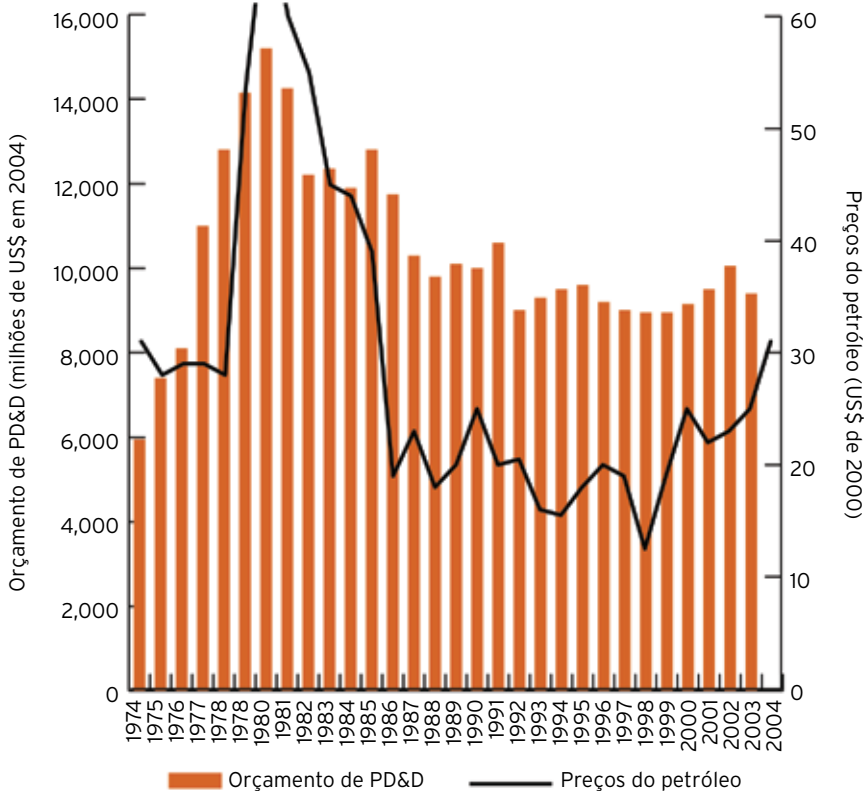
---

63. Um investimento público de US\$ 20 bilhões ao ano em PD&D em energia chegaria a uma contribuição anual de cerca de US\$ 27 por pessoa nos Estados Unidos e União Europeia, em conjunto.

juntos para facilitar a transferência de tecnologia. A comunidade científica pode desempenhar um papel moderador no debate sempre difícil sobre a melhor forma de realizá-la; países em desenvolvimento, por sua vez, devem criar as condições necessárias para a transferência de tecnologia.

Os riscos são muitos altos. Fazer valer as energias combinadas e *expertise* da comunidade de C&T mundial para encontrar soluções é essencial e pode demandar novas instituições ou mecanismos internacionais para melhor impulsionar e harmonizar os esforços globais.

**Figura 4.2** Gasto público em P&D em energia nos países da IEA e preços reais do petróleo entre 1974 e 2004



Obs.: O orçamento total de P&D inclui pesquisa em conservação, combustíveis fósseis, fusão nuclear, fissão nuclear, energia renovável, tecnologias de energia

Fontes: IEA, 2005; e OCDE, 2006b.

## 4.5 O papel da política e da tecnologia no contexto de um país em desenvolvimento

Mais de 2 bilhões de pessoas em países em desenvolvimento não têm acesso a um cozinhar limpo, a combustíveis para aquecimento e/ou à eletricidade. Estima-se que cerca de 1,5 milhão de pessoas morram a cada ano devido a doenças respiratórias e à intoxicação por monóxido de carbono causada pela poluição interna associada ao uso de combustíveis sólidos como gravetos, esterco e lignita para cozinhar. O acesso a modernos serviços de energia também teria um profundo impacto sobre outros aspectos críticos do desenvolvimento humano e da qualidade de vida dos cidadãos mais pobres do mundo, incluindo acesso a água potável, irrigação, iluminação interna não poluente, educação e comunicações.

Poucas prioridades, portanto, são mais importantes – tanto para os governos dos países em desenvolvimento e em termos de cumprir os compromissos internacionais para metas de desenvolvimentos amplamente aceitas – do que expandir o acesso a modernos serviços de energia, assegurar que as nações em desenvolvimento tenham a infraestrutura de energia necessária para sustentar o crescimento econômico e elevar os padrões de vida para seus cidadãos mais pobres. Nesse caso, políticas e tecnologia claramente têm papéis fundamentais a desempenhar, especialmente em ajudar a transição das nações em desenvolvimento diretamente para opções de energia mais limpas e mais eficientes. Assim como tem sido possível para muitos países ir direto aos telefones celulares sem ter de instalar cabos telefônicos, está se tornando possível para muitas áreas rurais ter eletricidade a partir de minirredes ou sistemas integralmente distribuídos sem ter de esperar pelas dispendiosas extensões da rede. A inovação tecnológica também pode produzir sinergias promissoras para aplicações em países em desenvolvimento.

Por exemplo, esforços para desenvolver combustíveis líquidos para transporte a partir de biomassa lignocelulósica levaram a pesquisas sobre enzimas e novas abordagens microbiais autossustentáveis que podem vir a melhorar o desempenho de digestores de biogás de baixo custo, úteis em áreas rurais de países tropicais em desenvolvimento. Além disso, o

desenvolvimento de tais enzimas pode ser buscado não apenas em países industrializados, mas nos principais laboratórios dos países em desenvolvimento também.

A transferência de inovações tecnológicas bem-sucedidas dos prósperos para os pobres apresenta seus próprios desafios, por vezes assustadores. As áreas rurais de muitos países em desenvolvimento sofrem com o lixo dos restos de projetos de demonstração de energia que não deram certo – criando verdadeiros cemitérios tecnológicos. Aqui não é o lugar para lançar culpa ou listar as causas para esses malogros. Basta dizer que os pesquisadores que trabalham no desenvolvimento de tecnologias de energia sustentável devem evitar a tendência de minimizar custos, ou menosprezar potenciais problemas práticos com as tecnologias que promovem. Em vez disso, é preciso construir sobre o que deu certo e aprender com a experiência de projetos passados de desenvolvimento. Isso, por sua vez, exige avaliação independente ou acompanhamento do desempenho do projeto com a subsequente divulgação dos resultados. Os próprios países em desenvolvimento não devem ser vistos como espectadores do processo. Apesar de a assistência dos países industrializados – especialmente em forma de recursos financeiros, mas também para facilitar o compartilhamento da propriedade intelectual e *expertise* tecnológica – ser fundamental, países em desenvolvimento devem assumir a responsabilidade pela efetiva transferência de tecnologia e pelo alívio da pobreza se for para atender às necessidades dos pobres.

A capacidade humana e institucional de construir também é uma questão fundamental em muitos contextos de países em desenvolvimento. As pesquisas mostram que a transferência de tecnologia é mais bem-sucedida e que a inovação tem mais chance de ocorrer quando as instituições de origem possuem as habilidades tecnológicas e gerenciais necessárias para administrar os novos sistemas de energia. Sem essas habilidades, novas tecnologias normalmente deixam de oferecer os serviços esperados. É necessário desenvolver capacidades dentro das empresas que produzem, comercializam, instalam e fazem a manutenção de tecnologias de energia sustentável, como também dentro das comunidades que irão gerenciar e operar essas tecnologias. Esta última necessidade pode ser

atendida estabelecendo-se institutos regionais para oferecer treinamento de habilidades básicas de gerenciamento de tecnologia. Esses institutos também podem ajudar a oferecer avaliações independentes das tecnologias alternativas e escolhas de políticas, além de explorar estratégias para superar barreiras que inibem a implementação em grande escala das tecnologias de energia sustentável.

Outro problema, ainda, é o financiamento. Num passado recente, os governos costumavam se apoiar em subsídios cruzados (cobrar preços mais para um setor de consumidores para reduzir os custos de outro) para levar os serviços de eletricidade ou de telecomunicações para áreas remotas. Mais recentemente, os subsídios cruzados perderam aprovação, em parte porque há um limite para quanto se possa cobrar a mais de uma classe de consumidores para levar o serviço de uma outra (especialmente quando alguns consumidores de alto uso têm a opção de migrar para outras fontes de energia ou para geradores fora da rede). Muitos governos, no entanto, continuam a subsidiar diretamente a venda de eletricidade para agricultores, normalmente porque é mais fácil do que fornecer apoio de renda direta. Com frequência, os encargos de eletricidade são achatados, não aferidos e dissociados do consumo real. Isso pode produzir uma série de resultados indesejáveis: quando os custos de bombeamento são baixos, por exemplo, agricultores tendem a abusar do uso da água ou a usá-la de forma ineficiente. Por causa dos limites dos subsídios cruzados entre classes consumidoras e o crescente peso financeiro dos subsídios diretos, novas abordagens serão necessárias para maiores expansões da rede para áreas rurais em uma série de países em desenvolvimento.

De forma mais ampla, os subsídios podem ser um mecanismo efetivo para superar as dificuldades de implementação de novas tecnologias ou para promover metas sociais. Quando os subsídios são usados para apoiar tecnologias já bem estabelecidas ou insustentáveis, no entanto, causam uma série de efeitos indesejáveis. Alguns dos problemas genéricos com subsídios convencionais para energia – que continuam em grande uso em todo o mundo – são discutidos mais detalhadamente no Quadro 4.2.



## Quadro 4.2 Subsídios para energia

Apesar de os subsídios para combustíveis fósseis terem diminuído na última década, estão bastante difundidos e permanecem amplamente usados em todo o mundo. Em uma base global, subsídios para combustíveis fósseis ainda somam várias centenas de bilhões de dólares em países industrializados e (em menor grau) em países em desenvolvimento (Tabela 4.3).

Enquanto os fundos cumulativos gastos em subsídios para energia costumam ser menores do que a renda coletada através de impostos para outros combustíveis fósseis, como o petróleo (gasolina), os subsídios para fontes de energia estabelecidas levam, pelo menos, aos dois seguintes problemas:

- a característica comum a todos os subsídios é que distorcem os sinais de mercado e influenciam o comportamento do consumidor e do produtor;
- subsídios para combustíveis convencionais frequentemente têm o efeito de forçar o jogo contra a eficiência energética e fontes mais limpas.

Subsídios causam dependência, e aqueles que se beneficiam deles não aceitam facilmente sua eliminação sem algum outro favorecimento. Compromissos para eliminar ou reduzir subsídios podem ser adotados, mas notoriamente são difíceis de implementar para políticos que têm de renovar seus mandatos periodicamente. Além disso, conforme se observou anteriormente neste capítulo, deixar de incluir externalidades ambientais, de segurança de energia e outras nos preços de mercado por si só constitui-se em um tipo de subsídio que é comum para combustíveis convencionais em muitos países. (Um outro exemplo desta forma de subsídio é a Lei Price-Anderson nos Estados Unidos, que indeniza a indústria nuclear contra ações de responsabilidade que surgem de acidentes em usinas nucleares civis.)

Subsídios diretos para combustíveis raramente chegam aos mais necessitados, como no caso de muitos subsídios atuais para o diesel e o querosene. Os governos devem eliminar de vez ou gradualmente os subsídios que já não atendem ao interesse público. Fontes convencionais de energia, especialmente, devem ser vendidas pelo menos ao custo de produção e idealmente a um custo que também reflita as externalidades ambientais associadas e outras. Onde preços não subsidiados podem impor uma carga muito pesada sobre os pobres essas cargas devem ser aliviadas com apoios de renda indireta. Essas recomendações são fáceis de fazer, mas mais difíceis de implementar. Uma vez que lhes faltam mecanismos confiáveis de implementação para transferir recursos para os realmente necessitados, muitos governos preferem mascarar os pagamentos de transferência usando subsídios sobre os quais têm algum controle. Há uma necessidade urgente de experimentação nesses mecanismos de transferência. Esse é um desafio para a comunidade científica e para a comunidade de ONGs.

Na maioria dos países, subsídios sobre alguns combustíveis, impostos sobre outros e algum apoio público para os renováveis coexistem em vários graus. Sabe-se bem que são necessários “incentivos” para motivar o setor privado a investir na oferta de serviços para áreas remotas e não desenvolvidas onde habitam os pobres. Onde quer que prevaleça a pobreza absoluta, há uma longa história de aplicação de subsídios inteligentemente planejados, que são direcionados, simples, competitivos e com tempo limitado. Isso pode ser conseguido, ao menos parcialmente, substituindo-se os atuais subsídios para o uso de combustível fóssil para sistemas de energia sustentável.

**Tabela 4.3** Custo de subsídios de energia por fonte, 1995-1998  
(US\$ bilhões/ano)

	US\$ bilhões por ano		
	Países OCDE	Países não OCDE	Total
Carvão mineral	30	23	53
Petróleo	19	33	52
Gás	8	38	46
Todos os combustíveis fósseis	57	94	151
Eletricidade	(a)	48	48
Nuclear	16	desconhecido	16
Renováveis e de uso final	9	desconhecido	9
Não pagamentos e auxílio financeiro (b)	0	20	20
Total	82	162	244
<i>Per capita</i> (US\$)	88	35	44

(a) Subsídios para eletricidade em países OCDE estão incluídos nos subsídios para combustíveis fósseis, por fonte de energia.

(b) Subsídios de não-pagamentos e operações de auxílio financeiro não estão incluídos nos dados por fonte de energia.

Fonte: UNDP, Undesa, e WEC, 2004.

Dadas as limitações de recursos enfrentadas por muitos países em desenvolvimento, há uma necessidade urgente de maior apoio internacional para projetos de energia sustentável. Conforme concluído no Relatório de Políticas da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, “a escala e a magnitude das tarefas envolvidas para alcançar os objetivos e metas de energia para o desenvolvimento sustentável são tão enormes que, além dos esforços nacionais, a cooperação internacional, regional e sub-regional é de importância fundamental” (CMDS, 2002). Também há uma necessidade urgente de se assegurar que esforços futuros nessa direção sejam bem planejados, criteriosamente implementados e focados sobre tecnologias apropriadas para a situação em que estão sendo implementadas.<sup>64</sup>

De forma realista, os países industrializados terão de fornecer grande parte do investimento necessário para levar as tecnologias de energia a subir na curva de aprendizado e reduzir seus custos marginais, paralelamente à sua implementação em fases, antes que essas tecnologias possam ser usadas em países em desenvolvimento. Enquanto isso, existem oportunidades substanciais para facilitar a transferência de tecnologias sustentáveis que já são custo-efetivas, especialmente em áreas mais remotas e atualmente mal servidas, utilizando planos de programas inovadores e mecanismos de financiamento. Um exemplo de programa bem-sucedido dessa natureza, envolvendo a disseminação de pequenos sistemas domésticos de energia fotovoltaica solar em Bangladesh, é descrito no Quadro 4.3.

#### 4.6 Pontos principais

Os governos de todo o mundo devem agir já para iniciar a transição para sistemas de energia sustentável.

- **Apesar de escolhas de políticas específicas deverem levar em con-**

---

64. Muitas opções de políticas são potencialmente relevantes em contextos de países em desenvolvimento: a Rede Mundial de Energia para o Desenvolvimento Sustentável, por exemplo, publicou análises sobre estratégias para reformar o setor de energia elétrica e para melhorar o acesso a serviços de energia ([www.gnesd.org](http://www.gnesd.org))

#### Quadro 4.3 A experiência de Grameen com sistemas fotovoltaicos

O Grameen Bank de Bangladesh (Grameen Shakti), uma agência de microempréstimos, estabeleceu uma subsidiária sem fins lucrativos em 1996 para administrar empréstimos para sistemas domésticos de energia solar fotovoltaica para atingir os que não tinham acesso à eletricidade. Inicialmente, o Grameen Shakti encontrou muitos obstáculos – longas distâncias, parca infraestrutura de transportes, estradas periodicamente alagadas e intransponíveis, baixos índices de alfabetização, falta de habilidades técnicas, transações com base em escambo que contribuía para altos custos de transação e dificuldade em ganhar a confiança dos consumidores para seu produto.

Em 1998, uma ajuda financeira da Global Environment Facility através do Programa de Pequenas e Médias Empresas da International Finance Corporation permitiu que o Grameen Shakti oferecesse prazos de crédito mais atraentes para seus consumidores e instalasse milhares de sistemas. Também descobriram que, depois de uma massa crítica de instalações em uma área (cerca de 100 sistemas), ficou mais rápido ganhar a confiança e a demanda do consumidor.

O Grameen Shakti agora espera ser capaz de conseguir financiamento adicional para atividades de expansão advindo de bancos comerciais. Para mais informações sobre o Grameen Bank, consultar <[www.gshakti.org](http://www.gshakti.org)>.

**ta as circunstâncias particulares de cada país, esforços para introduzir uma sinalização de mercado para a redução de emissões de carbono, promover investimentos em eficiência energética avançada e reduzir ou eliminar subsídios distorsivos (especialmente para o consumo de combustíveis fósseis) devem ser amplamente envidados.**

- **Ciência e tecnologia têm um papel indispensável a desempenhar no aprimoramento de opções de energia sustentável disponíveis hoje e no desenvolvimento de novas opções para o amanhã.** Dada a escala e a urgência do desafio à frente, investimentos dos setores público e privado em PD&D em tecnologia de energia devem ser substancialmente elevados (para pelo menos o dobro dos níveis atuais, se não mais) e mantidos consistentemente pelas próximas várias décadas. Envidar os esforços necessários de P&D não é motivo aceitável

para adiar uma ação decisiva agora para fazer uso das tecnologias já existentes e corrigir as distorções no mercado de energia.

- **É necessário estender o acesso a modernas formas de energia para bilhões dos cidadãos mais pobres do mundo para atender às necessidades humanas básicas (combustíveis limpos de cocção e água limpa) e atingir metas mais amplas de desenvolvimento (luz noturna, comunicação, oportunidades econômicas).** De forma mais geral, promover objetivos de sustentabilidade em países em desenvolvimento exige políticas e tecnologias que refletem as necessidades e oportunidades específicas desses países, juntamente com um maior comprometimento por parte da comunidade de C&T para desenvolver e ajudar a implementar tecnologias eficazes para os pobres da área rural e urbana.
- **Preocupações com a viabilidade econômica, especialmente em países em desenvolvimento, devem ser enfrentadas pelos mecanismos de desenvolvimento que subsidiam o consumo apenas num patamar adequado para atender às necessidades básicas.**

### Referências bibliográficas\*

CONGRESS OF THE UNITED STATES. Congressional Budget Office. **Evaluating the role of prices and R&D in reducing carbon dioxide emissions.** Washington, D.C., 2006. (A CBO Paper). Disponível em: <<http://www.cbo.gov/ftpdocs/75xx/doc7567/09-18-CarbonEmissions.pdf>>

EDITORIAL. Energy shame. **Nature**, v. 443, n. 7107, 7 Sept. 2006. Disponível em: <<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7107/full/443001a.html>>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives: scenarios and strategies to 2050.** Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable energy: RD&D priorities: insights from IEA technology programmes.** Paris: Organisation for Economic

Co-operation and Development, 2006. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/renewenergy.pdf>>

KAMMEN, D. H., NEMET, G. F. Reversing the incredible shrinking energy R&D budget. **Issues in Science and Technology**, p. 84-88, Fall 2005. Disponível em: <<http://rael.berkeley.edu/sites/default/files/old-site-files/2005/Kammen-Nemet-ShrinkingRD-2005.pdf>>

NATIONAL COMMISSION ON ENERGY POLICY. **Ending the energy stalemate**: a bipartisan strategy to meet America's energy challenges. Washington, D.C., 2004.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC AND CO-OPERATION DEVELOPMENT. **Main science and technology indicators (MSTI)**: 2006. Paris, 2006a.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC AND CO-OPERATION DEVELOPMENT. **R&D priorities and energy technologies of the future**: round table on sustainable development. 14-15 June 2006. Paris, 2006b.

PLATT'S. **Crude oil marketwire**, 2007.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM; United Nations Department of Economic and Social Affairs; World Energy Council. **World energy assessment**: overview 2004 update. New York, 2004. 85 p.

WORLD SUMMIT ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **A framework for action on energy**: world summit on sustainable development. Johannesburg, 2002.

\* As Referências bibliográficas nesta edição foram adequadas às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).



# 5

## O caso para ação imediata







**H**á evidências científicas avassaladoras de que as atuais tendências energéticas são insustentáveis. É necessária ação imediata para efetuar a mudança no período de tempo necessário para enfrentar importantes necessidades ecológicas, de saúde humana, de desenvolvimento e de segurança energética. Mudanças agressivas de política são, portanto, necessárias para acelerar a implementação de tecnologias superiores. Com uma combinação de tais políticas em nível local, nacional e internacional, pode ser possível – técnica e economicamente – elevar as condições de vida para a maior parte da humanidade, ao mesmo tempo que se enfrentam os riscos envolvidos pelas mudanças climáticas e por outras formas de degradação ambiental relativas à energia, se reduzem as tensões geopolíticas e as vulnerabilidades econômicas geradas pelos padrões existentes de dependência de recursos de combustíveis fósseis, predominantemente.

Este capítulo apresenta as nove conclusões principais a que chegou o Painel de Estudos, juntamente com recomendações de ações. Estas conclusões e recomendações foram formuladas dentro de uma abordagem holística para a transição em direção a um futuro energético sustentável. Isso implica que nenhum deles pode ser buscado com sucesso sem a devida atenção aos outros. A priorização das recomendações é, portanto, intrinsecamente difícil. No entanto, o Painel de Estudos acredita que, dado o sombrio prospecto das mudanças climáticas, deve-se agir sobre as três recomendações a seguir *sem demora e simultaneamente*:

- Esforços conjuntos devem ser potencializados para aumentar a eficiência energética e reduzir a intensidade de carbono da economia mundial, incluindo a introdução mundial de sinalização de preços

para as emissões de carbono, com análises sobre os diferentes sistemas econômicos e energéticos em diferentes países.

- Tecnologias devem ser desenvolvidas e implementadas para a captura e sequestro de carbono de combustíveis fósseis, particularmente de carvão mineral.
- Desenvolvimento e implementação de tecnologias de energia renovável devem ser acelerados de forma ambientalmente responsável.
- Levando-se em conta as três recomendações urgentes acima, outra recomendação se destaca como imperativo moral e social que deve ser perseguido com todos os meios disponíveis:
- Deve-se fornecer modernos serviços de energia básica para as pessoas mais pobres do planeta.
- Atingir um futuro de energia sustentável exige a participação de todos. Porém há uma divisão de trabalho para implementar as várias recomendações deste relatório. O Painel de Estudos identificou os seguintes “atores” principais que devem assumir a responsabilidade por atingir os resultados:
- Organizações multinacionais (exemplo, Organização das Nações Unidas, Banco Mundial, bancos regionais de Desenvolvimento etc.)
- Governos (nacionais, regionais e locais)
- Comunidade de ciência e tecnologia (C&T - academia)
- Setor privado (empresas, indústria, fundações)
- Organizações não governamentais (ONGs)
- Mídia
- Público em geral

## Conclusões, recomendações, ações

Com base nos pontos-chave desenvolvidos neste relatório, o Painel de Estudos oferece as seguintes conclusões com recomendações e as respectivas ações pelos principais atores.

## Conclusão 1

**Atender às necessidades de energia básica das pessoas mais pobres deste planeta é um imperativo moral e social que pode e deve ser buscado juntamente com objetivos de sustentabilidade.**

Estima-se que hoje 2,4 bilhões de pessoas utilizem carvão mineral, carvão vegetal, lenha, resíduos agrícolas ou esterco como combustível primário de cocção. Cerca de 1,6 bilhão de pessoas em todo o mundo vivem sem eletricidade. Um vasto número de pessoas, especialmente mulheres e meninas, são privadas de oportunidades econômicas e educacionais, sem acesso a aparelhos básicos, economicamente viáveis, e que economizam trabalho ou a iluminação adequada, sem contar o tempo perdido a cada dia na busca por combustível e água. A poluição interna do ar causada por combustíveis de cocção tradicionais expõe milhões de famílias a riscos substanciais à saúde. Fornecer formas modernas de energia aos pobres do mundo poderia gerar múltiplos benefícios, facilitando a luta diária para garantir os meios básicos de sobrevivência; reduzindo os consideráveis riscos à saúde relativos à poluição; liberando o parco capital e recursos humanos; facilitando o fornecimento de serviços essenciais, incluindo serviço médico básico; e mitigando a degradação ambiental local. Recebendo crescente atenção internacional, essas interligações foram o principal foco da Cúpula Mundial para o Desenvolvimento Sustentável de 2002 em Joanesburgo, que reconheceu a importância de maior acesso a serviços de energia confiáveis e economicamente viáveis como pré-requisito para se atingir as Metas de Desenvolvimento do Milênio das Nações Unidas.

## Recomendações

- Dar prioridade a atingir rapidamente um acesso muito maior dos pobres do mundo a eletricidade e combustíveis limpos, economicamente acessíveis e de alta qualidade. O desafio de expandir o acesso a modernas formas de energia gira basicamente em torno de questões de equidade social e distribuição – o problema fundamental não

é de recursos globais inadequados, de danos ambientais inaceitáveis ou de tecnologias não disponíveis. Tratar das necessidades básicas de energia para os pobres do mundo é evidentemente fundamental para a meta maior de desenvolvimento sustentável e tem de ser uma das principais prioridades para a comunidade internacional se for necessário fazer alguma pressão para reduzir as desigualdades atuais.

- Formular políticas em todos os níveis, da escala global à do vilarejo, com maior consciência das desigualdades substanciais no acesso a serviços de energia existentes no momento, não apenas entre países, mas também entre populações dentro de um mesmo país e mesmo entre domicílios da mesma cidade ou vilarejo. Em muitos países em desenvolvimento, uma pequena elite usa energia de forma bastante semelhante à do mundo industrializado, enquanto a maioria do restante da população depende de formas de energia tradicionais, normalmente de baixa qualidade e altamente poluentes. Em outros países em desenvolvimento, o consumo de energia por uma classe média crescente está contribuindo significativamente para o aumento global da demanda de energia e elevando substancialmente os índices nacionais de consumo *per capita*, apesar da pouca mudança nos padrões de consumo dos muito pobres. A realidade de que bilhões de pessoas sofrem com o acesso limitado à eletricidade e a combustíveis limpos de cocção não deve se perder nas estatísticas *per capita*.

### Ações necessárias

- Dada a dimensão internacional do problema, organizações multinacionais como a Organização das Nações Unidas e o Banco Mundial devem tomar a iniciativa de traçar um plano para eliminar a pobreza energética dos pobres do mundo. Como primeiro passo, governos e ONGs podem auxiliar fornecendo dados sobre a extensão do problema em seus países.
- O setor privado e a comunidade de C&T podem ajudar a promover a transferência das tecnologias apropriadas. O setor privado pode aju-

dar, adicionalmente, fazendo os investimentos adequados.

- A mídia deve conscientizar o público em geral sobre a enormidade do problema.

## Conclusão 2

### **Deve-se fazer esforços conjuntos para aumentar a eficiência energética e reduzir a intensidade energética da economia mundial.**

Competitividade econômica, segurança energética e considerações ambientais são todos argumentos a favor da busca por oportunidades de eficiência de uso final custo-efetivas. Tais oportunidades podem ser encontradas em toda a indústria, transportes, e ambiente construído. Para maximizar os ganhos em eficiência e minimizar custos, avanços devem ser incorporados de forma holística e de baixo para cima, sempre que possível, especialmente onde infraestrutura duradoura estiver envolvida. Ao mesmo tempo, será importante não subestimar a dificuldade de atingir ganhos de eficiência energética nominal, como frequentemente acontece quando análises supõem que o uso reduzido de energia use é um fim em si próprio, em vez de entender que é um objetivo regularmente negociado contra outros atributos desejados.

## Recomendações

- Promover uma melhor disseminação de avanços em tecnologia e inovação entre países industrializados e em desenvolvimento. Será especialmente importante para todas as nações trabalharem juntas para assegurar que países em desenvolvimento adotem tecnologias mais limpas e mais eficientes à medida que se industrializem.
- Alinhar incentivos econômicos – especialmente para investimentos de capital durável – com objetivos de sustentabilidade de longo prazo e considerações de custo. Incentivos para fornecedores de energia regulamentada devem ser estruturados para estimular investimentos

conjuntos em avanços de eficiência custo-efetiva; lucros devem ser desvinculados das vendas de energia.

- Adotar políticas voltadas a acelerar o índice mundial de redução de intensidade de carbono da economia global, onde esta intensidade é medida em forma de emissões de dióxido de carbono equivalente e dividida pelo produto mundial bruto, uma medida bruta de bem-estar global. Especificamente, o Painel de Estudos recomenda uma ação política imediata para introduzir sinalizações de preços significativas para emissões de gases de efeito estufa evitadas. Menos importante do que o preço inicial é que expectativas claras sejam estabelecidas com relação a uma previsível escalada desses preços ao longo do tempo. Simplesmente manter as emissões de dióxido de carbono constantes nas próximas décadas implica que a intensidade de carbono da economia mundial precisa ser reduzida quase na mesma proporção em que cresce o produto mundial bruto. Para atingir as *reduções* absolutas em emissões globais necessárias para estabilizar as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, será necessário que os índices mundiais de redução da intensidade de carbono comecem a superar o crescimento econômico mundial.
- Recrutar as cidades como uma importante força motriz para a rápida implementação de passos práticos para aumentar a eficiência energética.
- Informar os consumidores sobre as características de uso de energia dos produtos através de etiquetagem e implementar padrões mínimos de eficiência obrigatórios para eletrodomésticos e equipamentos. Os padrões devem ser regularmente atualizados e devem entrar efetivamente em vigor.

### Ações necessárias

- Os governos, em diálogo com o setor privado e a comunidade de C&T, devem desenvolver e implementar políticas e regulamentações (adicionais) visando atingir maior eficiência energética e menor in-

tensidade energética para uma ampla variedade de processos, serviços e produtos.

- O público em geral deve ser conscientizado pelos governos, pela mídia e por ONGs sobre o significado e a necessidade de tais políticas e regulamentações.
- A comunidade de C&T deve elevar seus esforços de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de baixo consumo de energia.
- Governos, unidos em organizações intergovernamentais, devem concordar sobre sinalizações de preços realistas para emissões de carbono, reconhecendo que as economias e sistemas de energia de diferentes países resultarão em diferentes estratégias e trajetórias individuais, e fazer dessas sinalizações de preço componentes-chave de ações posteriores para reduzir as emissões de carbono.
- O setor privado e o público em geral devem insistir para que os governos emitam sinalizações claras sobre o preço do carbono.

### Conclusão 3

**Tecnologias para captura e sequestro de carbono de combustíveis fósseis, particularmente do carvão mineral, podem desempenhar um papel importante no gerenciamento custo-efetivo das emissões globais de dióxido de carbono.**

Como recurso de combustível fóssil mais abundante do mundo, o carvão mineral continuará a desempenhar um grande papel no *mix* mundial de energia. Também é o combustível convencional mais carbono-intensivo em uso atualmente, gerando quase duas vezes mais dióxido de carbono por unidade de energia fornecida do que o gás natural. Atualmente, novas usinas movidas a carvão mineral – a maioria das quais tem uma expectativa de duração de mais meio século – estão sendo construídas num ritmo sem precedentes. Além disso, a contribuição de carbono do carvão mineral pode aumentar ainda mais se as nações com grandes reservas de carvão mineral, como os Estados Unidos, China, e Índia se voltarem para esse combustível para enfrentar problemas de segurança energética e desenvolver alternativas para o petróleo.



## Recomendações

- Acelerar o desenvolvimento e a implementação de avançadas tecnologias para o carvão mineral. Sem intervenções de políticas, a ampla maioria das usinas movidas a carvão mineral construídas nas próximas duas décadas será de usinas “convencionais” de carvão pulverizado. As atuais tecnologias para capturar emissões de dióxido de carbono de usinas de carvão mineral pulverizado em uma base de modernização são caras e energo-intensivas. Onde for necessário construir novas plantas a carvão sem captura, as tecnologias mais eficientes devem ser utilizadas. Adicionalmente, deve-se dar prioridade a minimizar os custos de futuras modernizações para a captura de carbono, desenvolvendo-se pelo menos alguns elementos de tecnologia de captura de carbono em todas as novas usinas. Esforços ativos para desenvolver tais tecnologias para diferentes tipos de plantas básicas já estão em andamento hoje e devem ser estimuladas promovendo-se a construção de plantas de tamanho natural que utilizem os mais recentes avanços tecnológicos.
- Perseguir agressivamente esforços para comercializar a captura e armazenagem de carbono. Avançar com projetos de demonstração na escala total é fundamental, bem como com estudos e experimentações contínuas para reduzir custos, aumentar a confiabilidade e enfrentar problemas relativos a vazamento, segurança pública e outras questões. Para que a captura e sequestro sejam amplamente implementados, será necessário desenvolver regulamentações e introduzir sinalizações de preço para emissões de carbono. Com base nas estimativas de custo atuais, o Painel de Estudos acredita que sinalizações de preços da ordem de US\$ 100 a US\$ 150 por tonelada métrica evitada de carbono equivalente (US\$ 27 a US\$ 41 por tonelada de dióxido de carbono equivalente) serão necessárias para induzir a ampla adoção de captura e armazenagem de carbono. Sinalizações de preços nesse nível também impulsionariam a acelerada implementação de biomassa e outras tecnologias de energia renovável.

- Explorar potenciais tecnologias de modernização para captura de carbono pós-combustão adequada para o grande e rápido crescimento do número existente de plantas de carvão pulverizado. No curto prazo, melhorias de eficiência e tecnologias avançadas de controle da poluição devem ser aplicadas nas plantas a carvão, como forma de mitigar seus impactos imediatos sobre as mudanças climáticas e a saúde pública.
- Perseguir a captura e armazenagem de carbono com sistemas que utilizem uma combinação de carvão mineral e biomassa. Esta combinação de tecnologias oferece uma oportunidade para se atingir emissões negativas líquidas de gases de efeito estufa – removendo o dióxido de carbono da atmosfera efetivamente.

### Ações necessárias

- O setor privado e a comunidade de C&T devem unir forças para aprofundar as investigações sobre as possibilidades para captura e sequestro de carbono e desenvolver tecnologias adequadas para demonstração.
- Os governos devem facilitar o desenvolvimento dessas tecnologias disponibilizando fundos e oportunidades (como locais de teste).
- O público em geral precisa ser muito bem informado sobre as vantagens do sequestro de carbono e sobre a relativa possibilidade de se gerenciar os riscos associados. A mídia pode ajudar nesta tarefa.

### Conclusão 4

**A competição pelas reservas de petróleo e gás natural pode potencialmente se tornar uma fonte de crescente tensão geopolítica e vulnerabilidade econômica para muitas nações nas próximas décadas.**

Em muitos países em desenvolvimento, os gastos com importações de energia também desviam os poucos recursos de outras necessidades

urgentes de saúde pública, educação e infraestrutura de desenvolvimento. O setor de transportes responde por apenas 25% do consumo primário de energia em todo o mundo, mas a falta de diversidade de combustíveis neste setor torna os combustíveis de transporte especialmente valiosos.

## Recomendações

- Introduzir políticas e regulamentações que promovam um menor consumo de energia no setor de transportes (a) aumentando a eficiência energética dos automóveis e outros modos de transporte e (b) melhorando a eficiência dos sistemas de transporte (exemplo, através de investimentos em transporte de massa, melhor uso do solo e planejamento urbano etc.).
- Desenvolver alternativas para o petróleo para atender às necessidades de energia do setor de transportes, incluindo combustíveis de biomassa, híbridos *plug-in* e gás natural comprimido, bem como – num prazo mais longo – alternativas avançadas como células combustíveis de hidrogênio.
- Implementar políticas para garantir que o desenvolvimento de alternativas ao petróleo seja buscado de forma a ser compatível com outros objetivos de sustentabilidade. Os métodos atuais para liquefazer o carvão mineral e extrair petróleo de fontes não convencionais como areias betuminosas e óleo de xisto geram níveis substancialmente mais altos de dióxido de carbono e outras emissões poluentes se comparados ao consumo convencional do petróleo. Mesmo com captura e sequestro de carbono, um combustível líquido derivado do carvão mineral, na melhor das hipóteses, produzirá emissões de dióxido de carbono quase equivalentes às do petróleo convencional no ponto de combustão. Se as emissões de carbono do processo de conversão não forem capturadas e armazenadas, as emissões totais do ciclo de combustível para esta opção de energia dobram. A conversão do gás natural em líquido é menos carbono-intensiva do que de carvão para líquidos, mas a biomassa permanece como a única

matéria-prima de curto prazo com potencial para ser realmente neutra em carbono e sustentável em uma base de longo prazo. Em todos os casos, os impactos do ciclo total de combustível dependem criticamente da matéria-prima utilizada e dos métodos específicos de extração ou conversão empregados.

### Ações necessárias

- Os governos devem introduzir políticas e regulamentações (adicionais) com o objetivo de reduzir o consumo de energia e desenvolver alternativas para o petróleo a serem usadas no setor de transporte.
- O setor privado e a comunidade de C&T devem continuar a desenvolver tecnologias adequadas para esse fim.
- Deve-se aumentar significativamente a conscientização do público em geral sobre questões de sustentabilidade relativas ao uso de energia em transportes. A mídia também pode desempenhar um importante papel nesse esforço.

### Conclusão 5

**Como um recurso de baixo conteúdo de carbono, a energia nuclear pode continuar a oferecer uma contribuição significativa ao portfólio mundial de energia no futuro, mas apenas se questões importantes relativas a custo de capital, segurança e proliferação de armas forem tratadas.**

Usinas de energia nuclear não geram emissões de dióxido de carbono nem poluentes convencionais do ar durante sua operação, usam uma matéria-prima de combustível relativamente abundante e envolvem fluxos de massa menores em ordem de grandeza, em relação a combustíveis fósseis. O potencial nuclear, no entanto, atualmente está limitado por questões relativas a custo, gerenciamento de resíduos, riscos de proliferação e segurança da usina (inclusive problemas com vulnerabilidade a atos de terro-

rismo e temores sobre o impacto dos danos de nêutron sobre os materiais da usina, no caso de extensão de vida útil). Um papel sustentável para a energia nuclear exige que se trate desses obstáculos.

## Recomendações

- Substituir o conjunto atual de reatores antigos por plantas que incorporem atributos de segurança intrínsecos (passivos) avançados.
- Tratar dos problemas de custo buscando o desenvolvimento de modelos de reatores padronizados.
- Compreender o impacto da idade avançada sobre os sistemas de reatores nucleares (exemplos, danos do nêutron aos materiais) e proporcionar o descomissionamento seguro e econômico das plantas existentes.
- Desenvolver soluções seguras e recuperáveis de gerenciamento de resíduos com base em armazenagem em recipientes blindados, enquanto opções de descarte de mais longo prazo são exploradas. Ao mesmo tempo que o descarte de longo prazo em repositórios geologicamente estáveis é tecnicamente viável, encontrar caminhos socialmente aceitáveis para implementar essa solução ainda é um grande desafio.
- Abordar o risco de que materiais e conhecimento nucleares civis podem ser desviados para aplicações em armamentos (a) através de pesquisa contínua sobre enriquecimento de urânio à prova de proliferação, capacidade de reciclagem de combustível e sobre reatores de nêutron rápido que possam incinerar o resíduo gerado por reator térmico de nêutrons e (b) através de esforços para remediar falhas nos quadros internacionais existentes e mecanismos de governança.
- Conduzir um reexame transparente e objetivo dos problemas que envolvem a energia nuclear e suas potenciais soluções. Os resultados desse reexame podem ser utilizados para educar o público e elaboradores de política.

## Ações necessárias

- Dada a controvérsia sobre o futuro da energia nuclear em todo o mundo, a Organização das Nações Unidas deve organizar – assim que possível – um reexame transparente e objetivo dos problemas que envolvem a energia nuclear e suas potenciais soluções. É essencial que o público em geral seja informado sobre o resultado desse reexame.
- O setor privado e a comunidade de C&T devem continuar os esforços de pesquisa e desenvolvimento voltados para melhorar a segurança de reatores e desenvolver soluções seguras de gerenciamento de resíduos.
- Os governos devem facilitar a substituição do conjunto atual de reatores antigos por usinas modernas e mais seguras. Governos e organizações intergovernamentais devem aumentar seus esforços para remediar falhas nos quadros internacionais existentes e mecanismos de governança.

## Conclusão 6

### **A energia renovável, em suas muitas formas, oferece imensas oportunidades para progresso tecnológico e inovação**

Durante os próximos 30 a 60 anos, deve-se dirigir esforços sustentados para que essas oportunidades se tornem realidade, como parte de uma estratégia abrangente para apoiar uma diversidade de opções de recursos durante o próximo século. O desafio fundamental para a maioria das opções renováveis envolve utilizar, de forma custo-efetiva, recursos inerentemente difusos e intermitentes, em alguns casos. Apoio de longo prazo e sustentado – de várias formas – é necessário para superar essas dificuldades. O desenvolvimento de energia renovável pode oferecer benefícios importantes em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento porque o petróleo, gás e outros combustíveis são *commodities* em dinheiro vivo.

## Recomendações

- Implementar políticas – inclusive políticas que gerem sinalizações de preços para as emissões de carbono evitadas – para garantir que os benefícios ambientais dos recursos renováveis em relação a recursos não renováveis sejam sistematicamente reconhecidos no mercado.
- Fornecer subsídios e outras formas de apoio público para o início da implementação de novas tecnologias renováveis. Deve-se dirigir subsídios para tecnologias promissoras, mas ainda não comerciais, e retirá-los gradualmente ao longo do tempo.
- Explorar mecanismos de políticas rotativas para desenvolver tecnologias de energia renovável, como padrões de portfólio renovável (que estabelece metas específicas para a implementação de energia renovável) e “leilões reversos” (nos quais os criadores de energia renovável dão lances por uma parcela limitada de fundos públicos com base no subsídio *mínimo* de que necessitam sobre uma base de quilowatt-hora).
- Investir em pesquisa e desenvolvimento de mais tecnologias transformacionais, como as novas classes de células solares que podem ser feitas a partir de filmes finos, processos de fabricação contínua. (Ver também recomendações para biocombustíveis na conclusão 7)
- Realizar pesquisas de longo prazo para avaliar e mitigar quaisquer impactos ambientais negativos associados à implementação em larga escala de tecnologias de energia renovável. Apesar de essas tecnologias oferecerem muitos benefícios ambientais, também podem representar novos riscos, como resultado de sua baixa densidade energética e a necessidade de uma área conseqüentemente grande para a implementação de grande escala.

## Ações necessárias

- Os governos devem facilitar substancialmente o uso – de forma ambientalmente sustentável – de recursos de energia renovável através

de políticas adequadas e subsídios. Um passo importante de política nessa direção incluiria a implementação de sinalizações de preços claras para emissões evitadas de gases de efeito estufa.

- Os governos também devem promover pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de energia renovável fornecendo financiamento público significativamente maior.
- O setor privado, auxiliado por subsídios do governo, deve buscar oportunidades de empreendimento no crescente mercado de energia renovável.
- A comunidade de C&T deve dar mais atenção para superar o custo e barreiras tecnológicas que atualmente limitam a contribuição das fontes de energia renovável.
- As ONGs podem auxiliar a promover o uso de fontes de energia renovável em países em desenvolvimento.
- A mídia pode desempenhar um papel essencial para aumentar a consciência do público em geral sobre as questões relativas a energia renovável.

## Conclusão 7

**Os biocombustíveis representam uma grande promessa para enfrentar, simultaneamente, as questões de mudanças climáticas e de segurança energética.**

Avanços na agricultura permitirão uma produção de alimentos adequada para sustentar o pico previsto da população mundial, da ordem de 9 bilhões de pessoas, com capacidade excedente para o cultivo de safra de energia. Maximizar a contribuição potencial dos biocombustíveis exige métodos de comercialização para produzir combustíveis de materiais lignocelulósicos (incluindo resíduos e rejeitos agrícolas), que tenham potencial para gerar de cinco a dez vezes mais combustível do que os processos que utilizam amidos de materiais como a cana-de-açúcar e o milho. Recentes avanços em biologia molecular e sistemas mostram-se bastante promissores para desenvolver materiais avançados e meios muito menos



energo-intensivos de converter material vegetal em combustível líquido. Além disso, conversão intrinsecamente mais eficiente de luz solar, água e nutrientes em energia química pode ser possível com micróbios.

## Recomendações

- Realizar pesquisa intensiva sobre a produção de biocombustíveis com base na conversão lignocelulósica.
- Investir em pesquisa e desenvolvimento sobre a produção microbial direta de butanol ou de outras formas de biocombustíveis que possam ser superiores ao etanol.
- Implementar regulamentações para assegurar que o cultivo de matérias primas para biocombustíveis esteja de acordo com práticas agrícolas sustentáveis e que promovam a biodiversidade, proteção do *habitat* e outros objetivos de manejo do solo.
- Desenvolver biorrefinarias avançadas que utilizem matéria-prima de biomassa para autogerar energia e extrair coprodutos de valor mais elevado. Essas refinarias têm potencial para maximizar ganhos econômicos e ambientais com o uso de recursos de biomassa.
- Desenvolver matérias-primas avançadas para biocombustíveis através de seleção genética e/ou engenharia molecular, incluindo plantas resistentes a secas e auto-fertilizantes que necessitem o mínimo de aragem, fertilizantes ou insumos químicos.
- Organizar esforços conjuntos para a coleta e análise de dados sobre os usos atuais da biomassa por tipo e tecnologia (tanto diretos quanto para conversão em outros combustíveis), incluindo usos tradicionais da biomassa.
- Conduzir pesquisas de longo prazo para avaliar e mitigar quaisquer impactos adversos ao ambiente ou ao ecossistema associados ao cultivo em grande escala de matéria-prima de energia de biomassa, incluindo impactos relativos à competição com outros usos do solo (inclusive usos para a preservação do *habitat* e produção de alimentos), necessidade de água etc.

## Ações necessárias

- A comunidade de C&T e o setor privado devem aumentar consideravelmente os esforços de pesquisa e desenvolvimento (e implementação) voltados para tecnologias e processos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis para a produção de biocombustíveis modernos.
- Os governos podem ajudar elevando o financiamento público para pesquisa e desenvolvimento, adaptando os subsídios e políticas fiscais existentes de modo a favorecer o uso de biocombustíveis sobre o uso de combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes.
- Os governos devem dar a devida atenção à promoção de meios sustentáveis de produção de biocombustíveis e evitar conflitos entre a produção de biocombustível e a de alimentos.

## Conclusão 8

**O desenvolvimento de tecnologias custo-efetivas de armazenagem de energia, novos vetores energéticos e infraestrutura de transmissão avançada podem substancialmente reduzir os custos e expandir a contribuição de uma variedade de opções de fornecimento de energia.**

Tais avanços tecnológicos e investimentos de infraestrutura são particularmente importantes para aproveitar o potencial pleno de recursos renováveis intermitentes, especialmente em casos em que algumas das oportunidades mais abundantes e custo-efetivas estão longe dos centros de carga. Tecnologias avançadas de armazenagem, novos vetores energéticos e melhor infraestrutura de transmissão e distribuição também facilitam o fornecimento de modernos serviços de energia aos pobres do mundo – especialmente em áreas rurais.

## Recomendações

- Continuar a pesquisa e desenvolvimento de longo prazo em novos vetores energéticos potenciais para o futuro, como o hidrogênio. Este pode ser diretamente queimado ou utilizado para fornecer energia a uma célula combustível e oferece uma variedade de aplicações potenciais, inclusive como fonte de energia para gerar eletricidade ou em outras aplicações estacionárias e como alternativa aos combustíveis de petróleo para aviação e para o transporte rodoviário. Restrições de custo e infraestrutura, no entanto, podem atrasar a ampla viabilidade comercial até a metade do século ou mais tarde.
- Desenvolver tecnologias avançadas de armazenagem de energia, físicas (exemplo, ar comprimido ou armazenagem elevada de água) ou químicas (exemplo, baterias, hidrogênio ou combustível de hidrocarboneto produzido a partir da redução de dióxido de carbono) que possam melhorar significativamente os prospectos de mercado para recursos renováveis intermitentes como energia eólica e solar.
- Buscar avanços contínuos e reduções de custo em tecnologias para transmissão de eletricidade em longas distâncias. Linhas de transmissão de alta voltagem, linhas de transmissão de corrente contínua, particularmente, podem ser decisivas para que áreas remotas tenham acesso ao desenvolvimento de energia renovável, melhorando a confiabilidade da rede e maximizando a contribuição de uma variedade de fontes de eletricidade de baixa intensidade de carbono. Além disso, será importante melhorar o gerenciamento e o desempenho geral da rede através de desenvolvimento e aplicação de tecnologias de rede avançadas ou “inteligentes” que podem melhorar consideravelmente a receptividade e a confiabilidade das redes de transmissão e distribuição de eletricidade.

## Ações necessárias

- A comunidade de C&T, juntamente com o setor privado, deve dar ênfase a pesquisa e desenvolvimento nesta área.

- Os governos podem ajudar aumentando o financiamento público para pesquisa e desenvolvimento e facilitando os investimentos necessários para infraestrutura.

## Conclusão 9

**A comunidade de C&T – juntamente com o público em geral – tem um papel fundamental a desempenhar promovendo soluções de energia sustentável e deve se engajar efetivamente.**

Conforme repetidamente verificado nas recomendações anteriores, os desafios de energia deste século e dos próximos exigem o progresso contínuo para desenvolver, demonstrar e implementar tecnologias de energia novas e avançadas. Esses avanços terão de advir da comunidade de C&T, motivada e apoiada por políticas apropriadas, incentivos e orientadores de mercado.

## Recomendações

- Fornecer maior financiamento para investimentos públicos em pesquisa e desenvolvimento de energia sustentável, juntamente com incentivos e sinalizações de mercado para promover maiores investimentos do setor privado.
- Produzir maior coordenação de esforços de tecnologia internacionalmente, juntamente com esforços para que universidades e instituições de pesquisa enfoquem o desafio da sustentabilidade.
- Realizar uma análise rigorosa e desenvolvimento de cenário para identificar possíveis combinações de recursos de energia e tecnologias de uso final e de fornecimento que tenham o potencial de to simultaneamente enfrentar os múltiplos desafios de sustentabilidade ligados à energia.
- Estimular esforços para identificar e avaliar mudanças específicas em

instituições, regulamentações, incentivos de mercado e políticas que mais eficazmente promovam soluções de energia sustentável.

- Criar um maior enfoque sobre a conscientização, educação e treinamento especificamente relevantes sobre a energia em todos os campos profissionais que tenham um papel a desempenhar na transição para energia sustentável.
- Iniciar esforços conjuntos para informar e educar o público sobre aspectos importantes do desafio de energia sustentável, tais como a relação entre os padrões atuais de produção e o uso de energia e os riscos críticos para o ambiente e para a segurança.
- Iniciar esforços intensivos de coleta de dados para melhor apoiar a tomada de decisões em áreas de políticas importantes que atualmente se caracterizam pela falta de informação confiável (grandes cidades em muitos países em desenvolvimento, por exemplo, não contam com os dados básicos necessários para planejar eficientemente o atendimento às necessidades de transporte).

### Ações necessárias

- A comunidade de C&T deve empenhar-se em obter melhor coordenação internacional dos esforços de pesquisa e desenvolvimento em energia, parcialmente em colaboração com o setor privado. Deve procurar articular uma agenda focada e colaborativa voltada a enfrentar os obstáculos-chave a um futuro de energia sustentável.
- Os governos (e organizações intergovernamentais) devem proporcionar maior financiamento público não apenas para aumentar a contribuição existente de uma comunidade de C&T, mas também para atrair mais cientistas e engenheiros para enfrentar os problemas da energia sustentável.
- O por quê e o como da pesquisa e desenvolvimento em energia devem ser apresentados de forma transparente para o público em geral para construir apoio para os investimentos significativos e duradou-

ros que serão necessários para enfrentar as necessidades de sustentabilidade de longo prazo.

- A própria comunidade de C&T, organizações intergovernamentais, governos, ONGs, a mídia e – em menor grau – o setor privado devem se engajar ativamente na educação do público sobre a necessidade desses investimentos.

## Iluminando o caminho

Apesar de o panorama atual da energia ser bastante sombrio, o Painel de Estudos acredita que há soluções sustentáveis para o problema da energia. O apoio agressivo da ciência e tecnologia de energia deve ser combinado a incentivos que acelerem o desenvolvimento e a implementação simultâneos de soluções inovadoras que possam transformar todo o cenário de demanda e fornecimento de energia. Existem oportunidades para substituir tecnologias superiores pelo lado do fornecimento e de uso final nos sistemas de energia em todo o mundo, mas os fluxos atuais de investimentos geralmente não refletem essas oportunidades.

A ciência e a engenharia fornecem os princípios orientadores para a agenda de sustentabilidade. A ciência fornece a base para um discurso racional sobre compensações e riscos, para selecionar as prioridades de pesquisa e desenvolvimento e para identificar novas oportunidades – a abertura é um de seus valores dominantes. A engenharia, através da incansável otimização das tecnologias mais promissoras, pode oferecer soluções – aprender fazendo está entre seus valores dominantes. Melhores resultados serão obtidos se muitos caminhos forem explorados paralelamente, se os resultados forem avaliados com medidas reais de desempenho, se os resultados forem ampla e integralmente relatados e se as estratégias estiverem abertas a revisão e adaptação.

Pesquisa e desenvolvimento de longo prazo em energia é, portanto, um componente essencial da busca pela sustentabilidade. Progresso significativo pode ser obtido com a tecnologia existente, mas a escala do desafio de longo prazo exigirá novas soluções. A comunidade de pesquisa deve

ter os meios para buscar caminhos tecnológicos mais promissores que já estiverem à vista e outros que ainda podem estar além do horizonte.

A transição para sistemas de energia sustentável também exige que incentivos de mercado estejam alinhados com os objetivos de sustentabilidade. Em particular, sinalizações robustas de preços para emissões evitadas de carbono são fundamentais para impulsionar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de energia de baixa intensidade de carbono. Tais sinalizações de preços podem ser gradualmente eliminadas, mas expectativas de como serão modificadas ao longo do tempo devem ser estabelecidas de antemão e comunicadas claramente para que as empresas possam planejar com confiança e otimizar seus investimentos de capital de longo prazo.

Fundamentais para o sucesso de todas as tarefas à frente são as habilidades de indivíduos e de instituições para realizar as mudanças nos recursos e uso da energia. A formação de capacidade, tanto em termos de especialização individual quanto em eficácia institucional, deve se tornar uma prioridade urgente de todos os atores principais: organizações multinacionais, governos, corporações, instituições educacionais, organizações sem fins lucrativos e mídia. Acima de tudo, o público em geral deve receber informações confiáveis sobre as escolhas à frente e sobre as ações necessárias para se obter um futuro de energia sustentável.

# Anexos





## Anexo A. Biografias do Painel de Estudos

### Copresidentes

**Steven CHU** é diretor do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, professor de Física, Biologia Molecular e Celular, da Universidade da Califórnia, Berkeley. Anteriormente trabalhou nos Laboratórios Stanford & Bell. Sua pesquisa inclui testes de física fundamental, desenvolvimento de métodos para resfriamento a laser e aprisionamento de átomos, física de polímeros e biologia molecular simples. Recebeu numerosos prêmios, inclusive o Prêmio Nobel de Física de 1997. É membro da Academia Nacional de Ciências, da Sociedade Filosófica Americana, da Academia Americana de Artes e Ciências, da Academia Sinica, membro estrangeiro da Academia Chinesa de Ciências e da Academia Coreana de Ciência e Engenharia. Em Stanford, auxiliou a iniciar o Bio-X, uma iniciativa multidisciplinar ligando as ciências físicas e biológicas com a engenharia e a medicina. Presta serviços para as diretorias da Fundação Hewlett Foundation, da Universidade de Rochester, da NVIDIA e da diretoria Científica da Fundação Moore, Helicos e NABsys. Participou de uma série de outros comitês, inclusive do Comitê Augustine que produziu *Rising Above the Gathering Storm* (Subindo Acima da Tempestade que se Forma), do Comitê Consultivo para os diretores da NIH e da Agência Nacional de Segurança Nuclear, do Comitê Executivo da diretoria do NAS sobre Física e Astronomia. Graduou-se em Matemática e Física pela Universidade de Rochester, possui Ph.D. em física pela UC Berkeley e dez graus honorários.

**José GOLDEMBERG** recebeu seu Ph.D. em Ciências Físicas em 1954 da Universidade de São Paulo, da qual se tornou professor titular e reitor. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi presidente da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência e presidente da Companhia de Energia de São Paulo (Cesp). Entre 1990 e 1992, foi secretário de Estado da Ciência e Tecnologia e ministro da Educação da República Federativa do Brasil. Ao longo dos anos, desenvolveu pesquisas e lecionou na Universidade de Illinois, Universidade de Stanford em Paris (Orsay) e na Universidade de Princeton. De 1998-2000, foi presidente do World Energy Assessment [Avaliação Mundial de Energia]. Mais recentemente, entre 2002 e 2006, foi secretário do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. É autor de muitos artigos técnicos e livros sobre física nuclear, desenvolvimento sustentável e energia.

### Membros

**Shem ARUNGU OLENDE** possui formação em engenharia elétrica. De 1968 a 1971, na Universidade de Nairóbi, conduziu pesquisas em sistemas de energia

(elétrica), sua análise (matemática), planejamento, projeto e operação. Durante os anos de 1969 e 1970, foi acadêmico visitante no Departamento de Economia, MIT, envolveu-se em pesquisa sobre a aplicação de técnicas de programação matemática para grandes sistemas; também fez pesquisas na LTV Aerospace Corporation sobre sistemas de orientação de aeronaves. De 1971 a 2000, foi especialista na Organização das Nações Unidas, Nova York, onde deu consultoria sobre desenvolvimento e uso de recursos energéticos (combustíveis fósseis, renováveis e nucleares). Supervisionou a preparação de importantes estudos sobre energia, incluindo fontes renováveis, eletricidade e meio ambiente. Também auxiliou na organização de importantes reuniões e conferências sobre energia e meio ambiente na ONU. Adicionalmente, forneceu insumos técnicos para comitês intergovernamentais, comissões e conselhos da ONU. Atualmente, é o secretário-geral da Academia Africana de Ciências. Também é presidente e CEO da QUECONSULT Ltda., que fornece serviços de consultoria profissional em engenharia, energia e desenvolvimento sustentável, meio ambiente, desenvolvimento econômico, ciência e tecnologia e desenvolvimento de software para a ONU, PNUD, para o Banco Africano de Desenvolvimento, Unesco e para o Banco Mundial.

**Ged DAVIS** tem formação em economia e engenharia das universidades de Londres e Stanford. Juntou-se à Royal Dutch/Shell em 1972 e permaneceu na empresa durante 30 anos. Durante seu trabalho na Shell, ocupou postos principalmente em planejamento de cenários, estratégia e finanças, inclusive chefe de Planejamento (Europa), chefe de Energia (Planejamento de Grupo), chefe de Relações do Grupo com Investidores, chefe de Processos e Aplicações de Cenários, Chefe do Grupo de Sociopolítica e Tecnologia (Planejamento de Grupo) e por fim como vice-presidente da empresa para Ambiente de Negócios Globais e chefe do Grupo de Cenários. Nos últimos três anos, trabalha como diretor do Fórum Econômico Mundial, é responsável por pesquisa global, projetos de cenários e pelo projeto da reunião anual do Fórum em Davos. No final da década de 1990, foi diretor do Conselho Mundial de Negócios para Cenários Globais de Desenvolvimento Sustentável e facilitador e principal autor dos Cenários de Emissões do IPCC. Atualmente atua como copresidente da Global Energia Assessment [Avaliação Global de Energia] com o Instituto Internacional para Análise de Sistemas Aplicados (Iiasa); diretor da Low Carbon Accelerator Limited; presidente do Centro Internacional de Pesquisa em Desenvolvimento em Ottawa; e membro do júri do Index Design Awards.

**Mohamed EL-ASHRY** formou-se e trabalhou como geólogo. Seguiu uma carreira científica de sucesso durante muitos anos. Durante a década de 1990, trabalhou como consultor chefe sobre Meio Ambiente para o presidente e como diretor do Departamento de Meio Ambiente no Banco Mundial, como vice-presidente sênior do Instituto de Recursos Mundiais (WRI), como consultor ambiental sênior para o PNUD, como consultor Especial para o secretário-geral da Conferência sobre

Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU (UNCED) 1992 e como membro da Comissão Mundial da Água e da Força Tarefa internacional sobre Bens Públicos Globais. Juntou-se ao Fundo para o Meio Ambiente Global (GEF) em sua fase-piloto em 1991 como presidente e comandou o GEF como CEO e presidente de 1994 a 2003. É membro da Academia de Ciências para o Mundo em Desenvolvimento (TWAS) e da Academia Africana de Ciências.

**Thomas B. JOHANSSON** é físico nuclear por formação. É professor de Análise de Sistemas Energéticos e diretor do Instituto Internacional de Economia Ambiental Industrial (IIIEE) na Universidade de Lund, Lund, Suécia. Anteriormente foi diretor do Programa de Energia e Atmosfera do PNUD e membro do Corpo Editorial da Avaliação Mundial de Energia [World Energy Assessment]. Tem muitas publicações na área de energia para o desenvolvimento sustentável. Atualmente, é copresidente do Comitê Diretor da Rede Global de Energia para o Desenvolvimento Sustentável (GNESD), copresidente do Comitê Executivo da Avaliação Global de Energia [WEA] e presidente do Corpo Diretor da Iniciativa Internacional de Energia (IEI).

**David KEITH** (Canadá) ocupa a cátedra de Pesquisa Canadá em Energia e Meio Ambiente na Universidade de Calgary. É professor do Departamento de Engenharia Química e Petróleo e do Departamento de Economia da Universidade de Calgary e professor adjunto do Departamento de Engenharia e Políticas Públicas, Carnegie Mellon Universidade. É diretor do Grupo de Energia e Sistemas Ambientais do ISEEE. Seu trabalho tecnológico e de políticas trata da captura e armazenagem de dióxido de carbono, impactos econômicos e climáticos de energia eólica de grande escala, uso de hidrogênio como combustível para transporte e tecnologia e implicações da geoengenharia. Trabalha com a Força Tarefa para Captura e Armazenagem do Canadá. Foi membro do Painel de Tecnologia de Energia Sustentável do Canadá e dos Comitês da Academia Nacional de Ciências dos EUA. Como aluno de graduação, recebeu o primeiro lugar no exame para o prêmio nacional de Física do Canadá. Como pós-graduando, venceu o prêmio bienal Departamental do MIT por excelência em Física Experimental e foi aclamado cientista ambiental do ano pela Canadian Geographic em 2006.

**LI Jinghai** graduou-se em Engenharia Química. De 1987 a 1990, realizou pesquisas na Universidade da Cidade de Nova York e no Instituto Federal Suíço de Tecnologia. De 1990 em diante, deu seguimento à sua carreira científica no Instituto de Engenharia de Processos (IPE) da Academia Chinesa de Ciências como professor; a partir de meados da década de 1990, assumiu a liderança, primeiramente como vice-diretor e depois como diretor do IPE. Em 2004, foi indicado vice-presidente da Academia Chinesa de Ciências. Foi presidente do Comitê de Especialistas em Energia sob o Programa 863 na China, de 2001 a

2006 e presidente da Sociedade Chinesa do Estudo de Partículas de 2002 até o presente. Trabalha em vários periódicos internacionais como editor ou membro do conselho.

**Nebosja NAKICENOVIC** é professor de Economia da Energia na Universidade de Tecnologia de Viena (TU Wien), líder dos Programas de Energia e Tecnologia do Instituto Internacional para Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) e diretor da Avaliação Global de Energia (GEA). É editor associado do *International Journal on Technological Forecasting e Social Change*; editor do *International Journal on Climate Policy*; membro do corpo editorial do *International Journal of Energy Sector Management*; e autor principal e coordenador do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), Quarto Relatório de Avaliação; autor principal e coordenador da Avaliação do Ecossistema do Milênio; e diretor da Avaliação Global de Energia. Possui graduação e mestrado em economia e ciências da computação pela Universidade de Princeton e pela Universidade de Viena, onde também obteve seu Ph.D.. Também detém o grau de Ph.D. *Honoris Causa* em engenharia da Academia Russa de Ciências.

**R.K. PACHAURI** é superintendente do Instituto de Energia e Recursos (TERI) desde 1981, designado inicialmente como diretor e, desde abril de 2001, como diretor geral. Em abril de 2002, foi eleito presidente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que foi instituído pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas em 1988. Detém um Ph.D. em engenharia industrial e um Ph.D. em economia. Fez parte do corpo docente da Universidade de Yale, Universidade da Virgínia Ocidental, Universidade Estadual da Carolina do Norte e do Escola Superior de Pessoal Administrativo da Índia em Hyderabad. Tem participado ativamente em vários fóruns internacionais envolvendo mudanças climáticas e suas dimensões de políticas. Foi agraciado com o *Padma Bhushan* em 2001 pelo presidente da Índia e também com o *Officier De La Légion D'Honneur* pelo governo da França em 2006.

**Majid SHAFIE-POUR** formou-se em engenharia mecânica no Reino Unido, com especializações em aplicação de fontes alternativas de energia para motores de transporte pesado, e em engenharia ambiental e de poluição do ar. Passou o início de sua carreira acadêmica em vários postos de docência em universidades do Reino Unido (Bath e Brunel) e da Universidade de Teerã. É membro da Diretoria da Faculdade de Meio Ambiente da Universidade de Teerã. É membro do Conselho Diretor do Departamento de Meio Ambiente Iraniano desde 1998. Trabalhou como diretor executivo em vários projetos patrocinados pelo Banco Mundial para questões ambientais no Irã, e assessorou ou chefou vários projetos nacionais, regionais, e municipais envolvendo poluição do ar, mudanças climáticas, reciclagem de resíduos e compostagem, e gerenciamento ambiental geral. Representou

seu país como chefe da Delegação Iraniana para o UNFCCC (COP8) em 2002 e foi consultor nacional do PNUD/PANU/Departamento do Meio Ambiente do Projeto Internacional do Irã sobre mudanças climáticas no Irã. É membro do Comitê Nacional para o Desenvolvimento Sustentável do Irã e atualmente é professor de Engenharia Ambiental (energia, poluição do ar e mudanças climáticas) na Faculdade de Meio Ambiente da Universidade de Teerã.

**Evald SHPILRAIN** formou-se em engenharia térmica e de energia e como físico térmico. Seguiu uma longa carreira como professor em algumas das mais proeminentes universidades e institutos de pesquisa da Rússia, publicou mais de 350 artigos em periódicos científicos e 12 monografias. Ultimamente, é chefe do Departamento de Energia e Tecnologia da Energia no Instituto para Altas Temperaturas (IVTAN) da Academia Russa de Ciências, presidente do Conselho Científico para Fontes de Energia Não-Tradicionais e Renováveis, Academia Russa de Ciências, diretor executivo do Clube Internacional de Energia de Moscou e representante da Rússia no Acordo de Implementação "SolarPACES" da IEA. Atualmente é presidente do Comitê Científico para Fontes de Energia Novas e Renováveis, Comitê Estatal de Ciência e Tecnologia, Academia Russa de Ciências (RAS); e consultor da RAS.

**Robert SOCOLOW**, professor de Engenharia Mecânica e Aeroespacial na Universidade de Princeton, leciona na Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas e também na Escola Woodrow Wilson de Assuntos Públicos e Internacionais. Com o ecologista Stephen Pacala, Socolow chefia a Iniciativa de Mitigação de Carbono da Universidade. Sua pesquisa concentra-se sobre tecnologia e políticas para combustíveis fósseis sob restrições climáticas. Em 2003, recebeu o Prêmio de Docência Leo Szilard pela Sociedade Física Americana "Pela liderança em estabelecer a energia e problemas ambientais como campos legítimos de pesquisa para físicos, e por demonstrar que estes problemas amplamente definidos podem ser tratados com os mais elevados padrões científicos". Formou-se em 1959 (*summa cum laude*) e recebeu seu Ph.D. em física teórica de alta energia em 1964 pela Universidade de Harvard.

**Kenji YAMAJI** é professor de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade de Tóquio. É membro do Conselho de Ciências do Japão, vice-presidente do Conselho do Instituto Internacional para Análise de Sistemas Aplicados (Iiasa), e presidente do Conselho de Certificação de Energia Verde do Japão. Durante o início de sua carreira, envolveu-se extensivamente em pesquisa e análise de sistemas de energia, principalmente no Instituto Central de Pesquisa da Indústria de Energia Elétrica (Criepi) no Japão. Faz parte de muitos corpos consultores sobre energia e políticas ambientais para o governo japonês. Em meados da década de 1990, foi diretor do Comitê do Programa Tecnológico do Congresso de Tóquio para o Conselho Mundial de Energia (WEC).

**Luguang YAN** formou-se em engenharia elétrica no Instituto de Energia de Moscou (Rússia). Sua pesquisa envolve o desenvolvimento de equipamentos elétricos especiais e o desenvolvimento de novas tecnologias em engenharia elétrica. As principais áreas de pesquisa incluem alto pulso de energia, engenharia de fusão elétrica, engenharia de supercondução elétrica, energia magneto-hidrodinâmica, energias renováveis, e trem de levitação magnética. É professor pesquisador e presidente do Comitê Científico do Instituto de Engenharia Elétrica da Academia Chinesa de Ciências, reitor honorário da Universidade de Ningbo, vice-chefe de Ciências Tecnológicas e vice-presidente do Conselho de Pesquisa em Energia da Academia Chinesa de Ciências, presidente da Sociedade Chinesa de Energia Solar, vice-presidente da Sociedade Eletrotécnica da China e da Sociedade de Pesquisa em Energia da China.

## Anexo B: Siglas e abreviações

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
Avac	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
BTU	British thermal unit (unidade térmica britânica)
CCGI	Ciclo combinado de gaseificação integrada
C&T	Ciência e Tecnologia
EJ	Exajoule
FV	Fotovoltaico
GIF	Fórum Internacional da Quarta Geração
GJ	Gigajoule
IAC	InterAcademy Council (Conselho Inter-Academias)
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA/AIE	Agência Internacional de Energia
IPCC/PIMC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
kWh	quilowatt-hora
Mtep	Milhões de tonelada de equivalente de petróleo
MWe	Megawatt elétrico
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONG	Organização Não Governamental
PD&D	Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração
PIB	Produto Interno Bruto
PJ	Petajoule
PPC	Paridade de poder de compra
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
TGCC	Turbina a gás de ciclo combinado
TPES	Fornecimento Total de Energia Primária
TWh	Terawatt-hora
UE	União Europeia



## Anexo C: Fatores comuns de conversão de unidade de energia e símbolos das unidades

### Fatores comuns de conversão de unidade de energia

Para:	<b>Terajoule (TJ)</b>	<b>Gigacaloria (Gcal)</b>	<b>Megaton de petróleo (equiv.) (Mtep)</b>	<b>Milhões de unidades térmicas britânicas (Mbtu)</b>	<b>Gigawatt-hora (GWh)</b>
De:	Multiplicar por:				
TJ	1	238,8	$2,388 \times 10^{-5}$	947,8	0,2778
Mtep	$4,1868 \times 10^4$	$10^7$	1	$3,968 \times 10^7$	11.630
Mbtu	$1,0551 \times 10^{-3}$	0,252	$2,52 \times 10^{-8}$	1	$2,931 \times 10^{-4}$
GWh	3,6	860	$8,6 \times 10^{-5}$	3,412	1

Fonte: Números da IEA. Mais números de conversão em <http://www.iea.org/stat.htm>

#### Símbolos

k	kilo (10 <sup>3</sup> )
M	mega (10 <sup>6</sup> )
G	giga (10 <sup>9</sup> )
T	tera (10 <sup>12</sup> )
P	peta (10 <sup>15</sup> )
E	exa (10 <sup>18</sup> )

## Anexo D: Lista de quadros, figuras e tabelas

### Quadros

- Quadro 1.1 Metas do milênio para energia e desenvolvimento
- Quadro 1.2 Focalizando o ato de cozinhar no mundo em desenvolvimento
- Quadro 2.1 Programa *Top Runner* do Japão
- Quadro 3.1 Quatro gerações de reatores nucleares
- Quadro 3.2 Fronteiras na produção de biocombustíveis
- Quadro 4.1 Redução de emissões: Impostos *versus* programas *cap-and-trade*
- Quadro 4.2 Subsídios para energia
- Quadro 4.3 A experiência de Grameen com sistemas fotovoltaicos

### Figuras

- Figura 1.1 Intensidade do uso de energia *versus* tempo, 1985-2005
- Figura 1.2 Participações regionais na demanda por energia primária, incluindo as projeções de “negócios como de costume”
- Figura 1.3 Consumo de energia primária por combustível, 2004
- Figura 1.4 Produção mundial de eletricidade por fonte de energia, 2004
- Figura 1.5 A escada da energia: emissão relativa de poluentes por refeição
- Figura 1.6 Relação entre índice de desenvolvimento humano (IDH) e consumo de eletricidade *per capita*, 2003-2004
- Figura 2.1 A cadeia energética
- Figura 2.2 Inovação tecnológica e função de produção
- Figura 2.3 Uso de energia por refrigeradores nos Estados Unidos ao longo do tempo
- Figura 2.4 Parcelas de uso de energia primária em edifícios comerciais nos Estados Unidos
- Figura 2.5 Consumo de energia por tipo de transportes nos Estados Unidos, por meio, 2005
- Figura 2.6 Comparação entre padrões de eficiência de combustível automotor por economia de combustível automotor entre países, normalizados a procedimento de teste nos Estados Unidos
- Figura 3.1 Eficiência da produção de energia com queima de carvão
- Figura 3.2 Do carvão para a eletricidade e outros produtos úteis
- Figura 3.3 Ilustração esquematizada de uma bacia sedimentar com um certo número de opções geológicas de sequestro
- Figura 3.4 Reatores nucleares existentes e previstos/propostos no mundo

- Figura 3.5 Geração incremental de eletricidade projetada por tipo de combustível
- Figura 3.6 Distribuição regional da capacidade nuclear global na projeção alta da AIEA
- Figura 3.7 Projeções para energias renováveis modernas para 2010 e 2020
- Figura 3.8 Caminhos potenciais para a produção de biocombustíveis
- Figura 4.1 Desenvolvimento dos preços do petróleo cru nas últimas três décadas
- Figura 4.2 Gasto público em P&D em energia nos países da IEA e preços reais do petróleo entre 1974 e 2004

## Tabelas

- Tabela 1.1 Demanda global de energia primária por combustível
- Tabela 3.1 Consumo, recursos e reservas de combustíveis fósseis
- Tabela 3.2 Estimativas da capacidade geológica global de sequestro de CO<sub>2</sub>
- Tabela 3.3 Custos comparativos de energia
- Tabela 3.4 Modernas energias renováveis: produção e crescimento
- Tabela 3.5 Políticas para a promoção de energias renováveis e metas em países selecionados
- Tabela 3.6 Percursos de pesquisas para a produção dos biocombustíveis celulósicos avançados
- Tabela 4.1 Opções de políticas para promover a transição para um futuro de energia sustentável
- Tabela 4.2 Oportunidades de P&D em energia
- Tabela 4.3 Custo de subsídios de energia por fonte, 1995-1998 (US\$ bilhões/ano)



**PRODUÇÃO EDITORIAL**

Coordenação

**Gerência de Comunicação da FAPESP**

Editora executiva

**Maria da Graça Mascarenhas**

Projeto gráfico, capa e arte final

**Tânia Maria**

Revisão

**Margô Negro**

Fotografias

**Delfim Martins / Pulsar Imagens, capa**

**Eduardo Cesar, capa, páginas 55, 83, 229 e 263**

**Mauricio Simonetti / Pulsar Imagens, capa**

**Rubens Chaves / Pulsar Imagens, capa**

**Palê Zuppani / Pulsar Imagens, página 135**

**Pulsar Imagens, página 3**

Colaboração

**Rosaly Favero Krzyzanowski**

**Inês Maria de Morais Imperatriz**

**Thais Fernandes de Morais**

Impressão

**Fabracor**