

SÉRIE SUSTENTABILIDADE

JOSÉ GOLDEMBERG

COORDENADOR

10

# Energia Nuclear e Sustentabilidade

LEONAM DOS SANTOS GUIMARÃES  
JOÃO ROBERTO LOUREIRO DE MATTOS

Blucher



SÉRIE SUSTENTABILIDADE

# **Energia Nuclear e Sustentabilidade**

**Blucher**

SÉRIE SUSTENTABILIDADE

JOSÉ GOLDEMBERG

Coordenador

# Energia Nuclear e Sustentabilidade

VOLUME 10

LEONAM DOS SANTOS GUIMARÃES  
JOÃO ROBERTO LOUREIRO DE MATTOS

*Energia Nuclear*

© 2010 Leonam dos Santos Guimarães  
João Roberto Loureiro de Mattos  
Editora Edgard Blucher Ltda.



## Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1.245, 4º andar  
04531-012 – São Paulo – SP – Brasil  
Tel.: 55 (11) 3078-5366  
editora@blucher.com.br  
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer  
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela  
Editora Edgard Blücher Ltda.

### Ficha Catalográfica

Guimarães, Leonam dos Santos  
Energia nuclear e sustentabilidade / Leonam  
dos Santos Guimarães; João Roberto Loureiro  
de Mattos. -- São Paulo: Blucher, 2010. --  
(Série sustentabilidade; v. 10 / José  
Goldemberg, coordenador)

ISBN 978-85-212-0571-5

1. Desenvolvimento sustentável 2. Energia  
nuclear 3. Física nuclear 4. Política nuclear  
5. Poluição radioativa I. Mattos, João Roberto  
Loureiro. II. Goldemberg, José. III. Título.  
IV. Série.

10-12157

CDD-333.7924

Índices para catálogo sistemático:

1. Energia nuclear e sustentabilidade:  
Economia

333.7924

# Apresentação

Prof. José Goldemberg  
Coordenador

O conceito de desenvolvimento sustentável formulado pela Comissão Brundtland tem origem na década de 1970, no século passado, que se caracterizou por um grande pessimismo sobre o futuro da civilização como a conhecemos. Nessa época, o Clube de Roma – principalmente por meio do livro *The limits to growth* [*Os limites do crescimento*] – analisou as consequências do rápido crescimento da população mundial sobre os recursos naturais finitos, como havia sido feito em 1798, por Thomas Malthus, em relação à produção de alimentos. O argumento é o de que a população mundial, a industrialização, a poluição e o esgotamento dos recursos naturais aumentavam exponencialmente, enquanto a disponibilidade dos recursos aumentaria linearmente. As previsões do Clube de Roma pareciam ser confirmadas com a “crise do petróleo de 1973”, em que o custo do produto aumentou cinco vezes, lançando o mundo em uma enorme crise financeira. Só mudanças drásticas no estilo de vida da população permitiriam evitar um colapso da civilização, segundo essas previsões.

A reação a essa visão pessimista veio da Organização das Nações Unidas que, em 1983, criou uma Comissão presidida pela Primeira Ministra da Noruega, Gro Brundtland, para analisar o problema. A solução proposta por essa Comissão em seu relatório final, datado de 1987, foi a de recomendar um padrão de uso de recursos naturais que atendessem às atuais necessidades da humanidade, preservando o meio ambien-

te, de modo que as futuras gerações poderiam também atender suas necessidades. Essa é uma visão mais otimista que a visão do Clube de Roma e foi entusiasticamente recebida.

Como consequência, a Convenção do Clima, a Convenção da Biodiversidade e a Agenda 21 foram adotadas no Rio de Janeiro, em 1992, com recomendações abrangentes sobre o novo tipo de desenvolvimento sustentável. A Agenda 21, em particular, teve uma enorme influência no mundo em todas as áreas, reforçando o movimento ambientalista.

Nesse panorama histórico e em ressonância com o momento que atravessamos, a Editora Blucher, em 2009, convidou pesquisadores nacionais para preparar análises do impacto do conceito de desenvolvimento sustentável no Brasil, e idealizou a *Série Sustentabilidade*, assim distribuída:

1. **População e Ambiente: desafios à sustentabilidade**  
*Daniel Joseph Hogan/Eduardo Marandola Jr./Ricardo Ojima*
2. **Segurança e Alimento**  
*Bernadette D. G. M. Franco/Silvia M. Franciscato Cozzolino*
3. **Espécies e Ecossistemas**  
*Fábio Olmos*
4. **Energia e Desenvolvimento Sustentável**  
*José Goldemberg*
5. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**  
*Vahan Agopyan/Vanderley Moacyr John*
6. **Metrópoles e o Desafio Urbano Frente ao Meio Ambiente**  
*Marcelo de Andrade Roméro/Gilda Collet Bruna*
7. **Sustentabilidade dos Oceanos**  
*Sônia Maria Flores Giancesella/Flávia Marisa Prado Saldanha-Corrêa*
8. **Espaço**  
*José Carlos Neves Epiphanyo/Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo/Luiz Augusto Toledo Machado*
9. **Antártica e as Mudanças Globais: um desafio para a humanidade**  
*Jefferson Cardia Simões/Carlos Alberto Eiras Garcia/Heitor Evangelista/Lúcia de Siqueira Campos/Maurício Magalhães Mata/Ulisses Franz Bremer*
10. **Energia Nuclear e Sustentabilidade**  
*Leonam dos Santos Guimarães/João Roberto Loureiro de Mattos*

O objetivo da *Série Sustentabilidade* é analisar o que está sendo feito para evitar um crescimento populacional sem controle e uma industrialização predatória, em que a ênfase seja apenas o crescimento econômico, bem como o que pode ser feito para reduzir a poluição e os impactos ambientais em geral, aumentar a produção de alimentos sem destruir as florestas e evitar a exaustão dos recursos naturais por meio do uso de fontes de energia de outros produtos renováveis.

Este é um dos volumes da *Série Sustentabilidade*, resultado de esforços de uma equipe de renomados pesquisadores professores.

### ***Referências bibliográficas***

MATTHEWS, Donella H. et al. *The limits to growth*. New York: Universe Books, 1972.

WCED. *Our common future*. Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987.



# Prefácio

*Leonam dos Santos Guimarães  
João Roberto Loureiro de Mattos*

A indústria mundial de geração elétrica nuclear já acumulou mais de 14.000 reatores/ano de experiência operacional do final da década de 1950 até hoje. São 436 usinas nucleares distribuídas por 34 países, porém concentrada naqueles mais desenvolvidos, que respondem atualmente por 16% de toda geração elétrica mundial.

Dezesseis países dependem da energia nuclear para produzir mais de um quarto de suas necessidades de eletricidade. França e Lituânia obtêm cerca de três quartos de sua energia elétrica da fonte nuclear, enquanto Bélgica, Bulgária, Hungria, Eslováquia, Coreia do Sul, Suécia, Suíça, Eslovênia e Ucrânia mais de um terço. Japão, Alemanha e Finlândia geram mais de um quarto, enquanto os Estados Unidos cerca de um quinto.

Apesar de poucas unidades terem sido construídas nos últimos 15 anos, as usinas nucleares existentes estão produzindo mais eletricidade. O aumento na geração nos últimos sete anos equivale a 30 novas usinas e foi obtido pela repotencialização e melhoria do desempenho das unidades existentes.

Hoje, entretanto, existem renovadas perspectivas para novas usinas tanto em países com um parque nuclear estabelecido como em alguns novos países. Os países BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) são particularmente importantes nesse contexto.

Encontram-se em construção no mundo 53 usinas (Angra 3 é uma delas), às quais se somam encomendas firmes para outras 135. Além destas, mais 295 estão sendo consideradas até 2030 pelo planejamento energético de diversos países (dentre os quais o Brasil que planeja de 4 a 8 usinas adicionais nesse horizonte de tempo).

A geração elétrica nuclear deve ser colocada no contexto mais amplo do desenvolvimento energético mundial. Esse tema retornou ao debate público após ter ficado muitos anos à margem depois das crises do petróleo dos anos 1970. Isso se deve a preocupações renovadas sobre a segurança do fornecimento de óleo e gás em longo prazo, indicada pela significativa escalada de preços, mas também pelas preocupações com as consequências ambientais da contínua exploração em massa dos recursos em combustíveis fósseis.

Baseado nos princípios do desenvolvimento sustentável, as mais recentes análises de ciclo de vida das várias opções de geração elétrica não conseguem elaborar um cenário para os próximos 50 anos no qual não haja uma significativa participação da fonte nuclear para atender às demandas de geração de energia concentrada, juntamente com as renováveis, para atender às necessidades dispersas.

A alternativa a isto seria exaurir os combustíveis fósseis, aumentando brutalmente a emissão de gases de efeito estufa, ou negar as aspirações de melhoria de qualidade de vida para bilhões de pessoas da geração de nossos netos.

# Conteúdo

## Introdução, 13

### *1* A contribuição da opção nuclear numa economia menos dependente do carbono, 17

- 1.1* O desenvolvimento econômico e a demanda mundial por energia elétrica, 17
- 1.2* A matriz elétrica mundial e o seu impacto ambiental, 28
- 1.3* A contribuição da opção nuclear para mitigar os efeitos ambientais, 42
- 1.4* O papel da geração nuclear na matriz elétrica brasileira, 52

### *2* Combustíveis nucleares e sustentabilidade, 63

- 2.1* Exploração, 66
- 2.2* Processo de conversão de  $U_3O_8$  em  $UF_6$ , 68
- 2.3* Enriquecimento, 69
- 2.4* Os combustíveis nucleares e suas reservas conhecidas, 74
- 2.5* Horizonte para 2030 considerando as tecnologias atuais, 76
- 2.6* O Brasil e o seu capital energético nuclear, 80
- 2.7* Evolução tecnológica e sustentabilidade, 84

- 3 Aspectos de segurança e confiabilidade, 89
  - 3.1 Acidentes nucleares, 89
  - 3.2 Experiência operacional acumulada, 95
  - 3.3 Reatores atuais e de Geração IV, 97
- 4 Competitividade e custo, 107
  - 4.1 Preços dos combustíveis para gerar eletricidade, 107
  - 4.2 Evolução de preços considerando aumento de demanda e incorporação de custos ambientais, 110
- 5 Rejeitos radioativos, 113
  - 5.1 Gestão dos rejeitos de alta atividade dos combustíveis usados: soluções atuais, 116
  - 5.2 Reciclagem de combustível usado, 118
  - 5.3 Disposição de combustíveis usados e outros rejeitos de alta atividade, 119
  - 5.4 Novas tecnologias, 122
- 6 Resistência à proliferação, 125
  - 6.1 Desenvolvimento da tecnologia nuclear e proliferação, 125
  - 6.2 Desarmamento e esforços contra a proliferação nuclear, 127
- 7 Aceitação pública, 131
  - 7.1 Situação e tendências atuais, 131
  - 7.2 Perspectivas futuras, 132
- 8 Considerações finais, 137
- 9 Anexo, 143

# Introdução

A humanidade não pode andar para trás. Uma população mundial cada vez maior e mais urbana vai exigir uma vasta quantidade de energia para o fornecimento de água doce para fábricas, casas e transporte, bem como para suporte a infraestrutura para nutrição, educação e saúde.

Atender a essas necessidades vai exigir que se lance mão de todas as fontes disponíveis. Paralelamente, entretanto, a matriz energética mundial deve evoluir com velocidade, limitando o uso indiscriminado de combustíveis fósseis. A redução do seu consumo irá preservar o meio ambiente – e esses mesmos recursos não renováveis – para as gerações futuras.

A estabilização do acúmulo de gases atmosféricos causadores do efeito estufa exige que as emissões mundiais sejam cortadas pela metade. Esse desafio torna-se ainda maior em face da necessidade de aumentar o padrão de vida em países mais pobres. Mesmo que os países desenvolvidos abracem tecnologias de conservação e energia limpa, as enormes populações desses países logo irão emitir mais gases do que são hoje produzidos no mundo industrial. Brasil, Índia e China, que juntos constituem 50% da humanidade, estão avançando economicamente de forma muito rápida. Nenhuma questão é mais importante na agenda mundial do que refletir sobre como essas nações e outros paí-

ses em desenvolvimento atenderão às suas necessidades energéticas, intensificadas rapidamente pelo desenvolvimento econômico e social. Encontra-se em jogo o futuro da biosfera.

De forma a fazer frente a esse inevitável aumento das emissões, mas garantindo a redução no total global, os países industrializados deverão cortar suas emissões em pelo menos 75%. Para estabilizar emissões e ao mesmo tempo expandir o suprimento de energia, o mundo necessita urgentemente da introdução maciça de tecnologias de geração de energia com baixas emissões.

As megacidades do futuro poderão funcionar com poucas emissões diretas pelo uso intensivo da eletricidade, seja por baterias recarregáveis, seja por células de combustível usando hidrogênio produzido por hidrólise da água. Sendo a eletricidade a maneira mais efetiva de distribuir energia, o desafio será gerar grande suprimento de energia elétrica de forma limpa.

A energia nuclear continua a ser uma questão controversa para as políticas públicas sobre a energia e o ambiente em virtude de fatores ligados ao gerenciamento de rejeitos, às consequências de acidentes severos, à proliferação nuclear horizontal e à competitividade econômica. As questões referentes às mudanças climáticas e à segurança de abastecimento de energia elétrica têm trazido uma nova lógica para o seu ressurgimento na agenda política internacional.

Recentes orientações de política nacional em alguns países mostram que o renascimento da indústria nucleoeletrica não é apenas *wishful thinking* ou *lobbying* do setor. As tecnologias de geração de energia elétrica devem ser analisadas conforme seu potencial de contribuição para os objetivos ligados à sustentabilidade, incluindo a prevenção de mudanças climáticas e a expansão e segurança de fornecimento. Isso requer uma avaliação equilibrada dos seus riscos ambientais, econômicos e sociais.

A geração elétrica nuclear tem sido até agora, em grande medida, evitada, basicamente por causa do fato de muitos cientistas e políticos excluírem essa opção *a priori*, por considerarem a questão nuclear fora de seu domínio de competência ou por se submeterem à influência da opinião pública.

O presente trabalho pretende contribuir para o preenchimento desse hiato, reestruturando a questão da sustentabilidade da energia nuclear

de forma dinâmica. A energia nuclear possui, é claro, características de risco que são muito distintas das características dos combustíveis fósseis e muito maior potencial de sensibilização da opinião pública no que se refere à maioria das energias renováveis. Deve-se entretanto lembrar que uma das razões para essa última constatação decorre do fato de as energias renováveis ainda não terem sido aplicadas em grande escala global.

Ainda que a geração elétrica nuclear *per se* possa ser avaliada como um meio que não atende a alguns requisitos essenciais para estabelecer os caminhos da energia sustentável numa perspectiva multimilenar (fato que também pode ocorrer numa avaliação das energias renováveis nessa mesma perspectiva, em especial quando se consideram as incertezas quanto aos reais efeitos em longo prazo das mudanças climáticas), ela pode desempenhar um papel transitório no sentido de estabelecer sistemas energéticos sustentáveis de forma perene. Durante essa fase transitória, alguns de seus aspectos mais problemáticos podem ser aprimorados significativamente no sentido de uma maior sustentabilidade, conferindo-lhe, então, um papel potencial para além desse período de transição.

Esse potencial de contribuição significativa para o desenvolvimento sustentável da humanidade se prende, objetivamente, a fatos concretos e verificáveis: seu combustível estará disponível por muitos séculos, seus resultados em termos de desempenho e segurança operacional são excelentes e com tendências a melhoria contínua, seu impacto ambiental é muito limitado, seu uso preserva os recursos fósseis de grande valor para as gerações futuras, seus custos são competitivos e declinantes com o avanço tecnológico e seus rejeitos são gerados em volume muito pequeno, permitindo um gerenciamento seguro, isto é, podem ser isolados do público e do ambiente a longo termo.



# 1 A contribuição da opção nuclear numa economia menos dependente do carbono

## 1.1 O desenvolvimento econômico e a demanda mundial por energia elétrica

A energia elétrica é um insumo fundamental para o desenvolvimento econômico e para a melhoria da qualidade de vida das populações. Os serviços de eletricidade habilitam o atendimento das necessidades humanas básicas, como alimentação e abrigo, e contribuem para o desenvolvimento social, melhorando a educação, a saúde e a segurança pública. O acesso à eletricidade e o consumo por habitante são fatores essenciais para o desenvolvimento humano.

Estimativas do ano de 2002<sup>1</sup> indicavam que 1,6 bilhão de pessoas nos países em desenvolvimento não tinham acesso à eletricidade em suas casas, representando um pouco mais de um quarto da população do mundo. A maioria das populações privadas de acesso à eletricidade encontra-se no sul da Ásia e na África subsaariana.

---

<sup>1</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2004*. Paris. capítulo 10. pp. 329-355. Disponível em: <<http://lysander.sourceoecd.org/vl=4592997/cl=37/nw=1/rpsv/cgi-bin/fulltextew.pl?prpsv=/ij/oecdthemes/99980053/v2004n22/s1/p11.idx>> Acesso em: 10 set. 2009.

As projeções atuais para o ano de 2030<sup>2</sup> indicam um aumento na utilização da eletricidade em todas as regiões do mundo. Os países do Oriente Médio e da América Latina atingirão o mesmo estágio de desenvolvimento em energia que os países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE)<sup>3</sup> tinham no início deste século XXI. A maior parte da África subsaariana e do sul da Ásia continuará, entretanto, muito atrasada. No cenário de referência do World Nuclear Energy 2009 (*WEO2009*), o número de pessoas sem eletricidade em 2030 deverá reduzir-se em 400 milhões em relação ao ano de 2002<sup>4</sup>, conforme mostrado na Figura 1.1.

Estudos realizados pela Agência Internacional de Energia (AIE) procuraram explicitar a participação da variável energia na produção, de modo a estimar sua contribuição para o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) em vários países que tiveram um rápido crescimento, entre os anos 1980 e 1990<sup>5</sup>. Os Estados Unidos da América (EUA) foram incluídos na amostra para efeito de comparação. Os resultados estão resumidos na Tabela 1.1. Em todos os países estudados, exceto na China, a combinação de capital, trabalho e energia teve uma contribuição maior para o crescimento econômico do que o aumento da produtividade<sup>6</sup>. Esse estudo mostra que a energia contribuiu significativamente para o crescimento da economia em todos os países e foi o principal motor para o crescimento no Brasil,

---

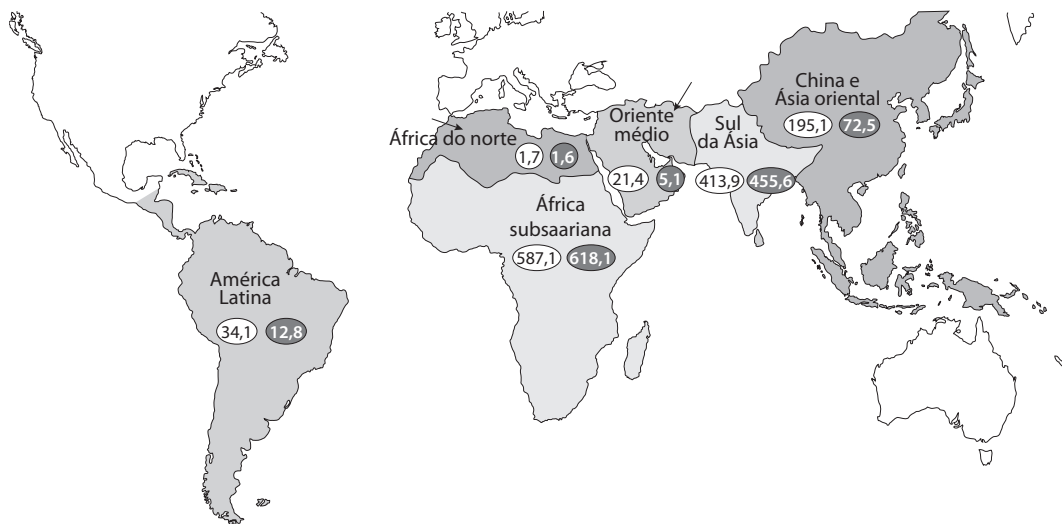
<sup>2</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *International Energy Outlook 2009*. Paris, 2009. 274p. Disponível em: <[http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2009\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2009).pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2009.

<sup>3</sup> A OCDE é uma organização internacional de países comprometidos com os princípios da democracia representativa e a economia de livre mercado. Compõe-se de 30 membros: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia, Suíça e Turquia.

<sup>4</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2004*, Paris, capítulo 10, p. 329-355. Disponível em: <<http://lysander.sourceoecd.org/vl=4592997/cl=37/nw=1/rpsv/cgi-bin/fulltextew.pl?prpsv=/ij/oecdthemes/99980053/v2004n22/s1/p11.idx>>. Acesso em: 10 set. 2009.

<sup>5</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2004*. Paris, capítulo 10, p. 329-355. Disponível em: <<http://lysander.sourceoecd.org/vl=4592997/cl=37/nw=1/rpsv/cgi-bin/fulltextew.pl?prpsv=/ij/oecdthemes/99980053/v2004n22/s1/p11.idx>>. Acesso em: 10 set. 2009.

<sup>6</sup> Há dúvidas sobre a exatidão dos dados oficiais do PIB da China. Muitos estudos têm concluído que as estatísticas oficiais exageram as taxas de crescimento de produtividade e subestimam o PIB. Isso poderia explicar por que o crescimento da produtividade da China é muito elevado em relação a outros países. (Fonte: *WEO2004*.)



**FIGURA 1.1 – Privação de eletricidade (milhões de pessoas).**

Fonte: Adaptado de *World Energy Outlook 2009*<sup>7</sup>.

na Turquia e na Coreia. Sua contribuição foi menor na Índia, na China e nos Estados Unidos. Os resultados sugerem que a energia desempenha um papel maior nos países em estágio intermediário de desenvolvimento econômico, pelo fato de a produção industrial ter, em geral, uma grande contribuição para o crescimento da economia nessa fase.

Para entender melhor a relação entre o uso de energia e o desenvolvimento humano, a AIE identificou três indicadores principais da utilização da energia no desenvolvimento dos países: o consumo *per capita*, a proporção dos serviços modernos de energia no consumo total de energia e a proporção da população com acesso à eletricidade nas suas casas<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2009 – Key Graphs*. Disponível em: <[http://www.iea.org/country/graphs/weo\\_2009/fig2-10.jpg](http://www.iea.org/country/graphs/weo_2009/fig2-10.jpg)>. Acesso em: 10 nov. 2009.

<sup>8</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2004*. Paris, capítulo 10, p. 329-355. Disponível em: <<http://lysander.sourceoecd.org/vl=4592997/cl=37/nw=1/rpsv/cgi-bin/fulltextew.pl?prpsv=/ij/oecdthemes/99980053/v2004n22/s1/p11.idx>>. Acesso em: 10 set. 2009.

| TABELA 1.1 – Contribuição de fatores de produção e produtividade para o crescimento do PIB |                                       |                           |          |         |                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------|---------|------------------------------|
| País                                                                                       | Média anual do crescimento do PIB (%) | (% do crescimento do PIB) |          |         |                              |
|                                                                                            |                                       | Energia                   | Trabalho | Capital | Fator total de produtividade |
| Brasil                                                                                     | 2,4                                   | 77                        | 20       | 11      | –8                           |
| China                                                                                      | 9,6                                   | 13                        | 7        | 26      | 54                           |
| Índia                                                                                      | 5,6                                   | 15                        | 22       | 19      | 43                           |
| Indonésia                                                                                  | 5,1                                   | 19                        | 34       | 12      | 35                           |
| Coreia                                                                                     | 7,2                                   | 50                        | 11       | 16      | 23                           |
| México                                                                                     | 2,2                                   | 30                        | 60       | 6       | 4                            |
| Turquia                                                                                    | 3,7                                   | 71                        | 17       | 15      | –3                           |
| EUA                                                                                        | 3,2                                   | 11                        | 24       | 18      | 47                           |

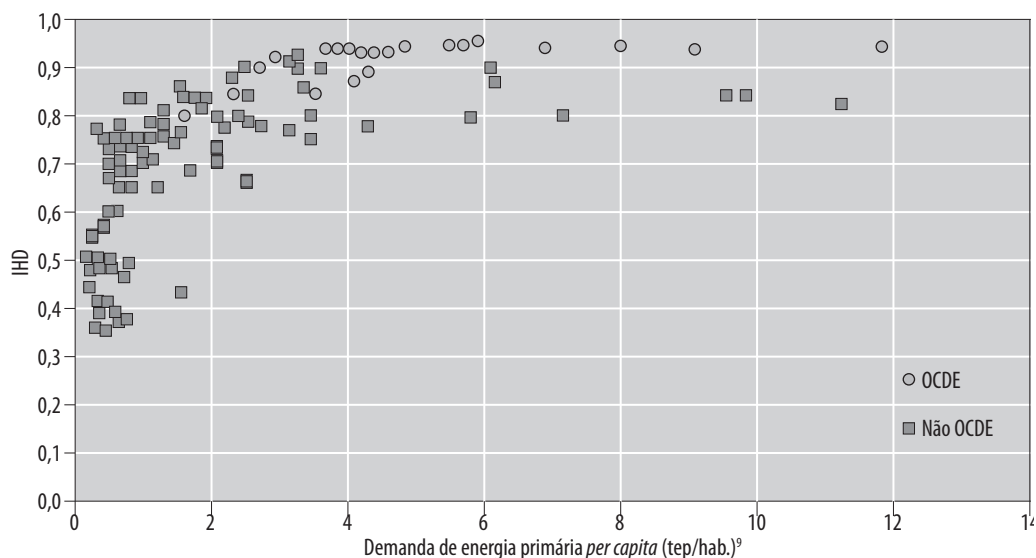
Fonte: Análise da AIE baseada em bancos de dados do Banco Mundial (2004).

1. 1.1 Consumo *per capita* de energia

A quantidade absoluta de energia utilizada, em média, para cada indivíduo tem sido historicamente um fator-chave no desenvolvimento humano durante os primeiros estágios desse processo. Há uma ligação muito forte entre o consumo *per capita* de energia (comercial e não comercial) e o Índice de Desenvolvimento Humano das Nações Unidas (IDH) de todos os países (Figura 1.2). A ligação é particularmente forte entre os países não pertencentes à OCDE com IDH inferior a 0,8. Poucos países com uso *per capita* de energia de menos de 2 toneladas equivalentes de petróleo têm um IDH maior que 0,7. Uma vez que um país tenha atingido um nível razoavelmente alto de IDH, variações no seu uso *per capita* de energia devem-se, em grande parte, a fatores estruturais, geográficos e climáticos. Para os países em desenvolvimento mais pobres, no entanto, a situação é clara: IDHs maiores seguem juntos com o aumento do uso *per capita* de energia.

1.1.2 Transição para os serviços modernos de energia

Acesso aos serviços modernos de energia é um elemento indispensável do desenvolvimento humano sustentável. O acesso contribui para o crescimento econômico e a renda familiar e, também, para a melhoria

**FIGURA 1.2 – IDH e demanda de energia *per capita*, 2002.**

Fonte: Adaptado de análise da AIE relativa ao PNUD (2004)<sup>10</sup>.

da qualidade de vida, que vem com uma melhor educação e melhores serviços de saúde e segurança pública. Sem acesso adequado à moderna energia comercial, os países pobres podem ficar presos em um círculo vicioso de pobreza, de instabilidade social e de subdesenvolvimento. O aumento da utilização dos serviços modernos de energia pelas famílias é um elemento-chave no processo mais amplo do desenvolvimento humano, em geral envolvendo a industrialização, a urbanização e o aumento da mobilidade social. Os fatos confirmam esta afirmação: a participação de serviços modernos na utilização global de energia está fortemente correlacionada com indicadores de desenvolvimento humano (Tabela 1.2)<sup>11</sup>.

O *World Energy Outlook 2002* enfatiza que o uso intensivo e ineficiente da biomassa tradicional e dos resíduos para fins energéticos é uma característica da pobreza e uma das causas da sua persistência. Combustíveis tradicionais incluem carvão, madeira, palha, resíduos

<sup>9</sup> 1 tep é igual a 41,868 gigajoules (GJ) ou 11,630 MWh. Fonte: AIE.

<sup>10</sup> Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (2004), *Relatório do Desenvolvimento Humano 2004*. PNUD, Lisboa. Disponível em: <HTTP://www.pnud.org.br/rdh/>. Acesso em: 28 out. 2009.

<sup>11</sup> *WEO2004*.

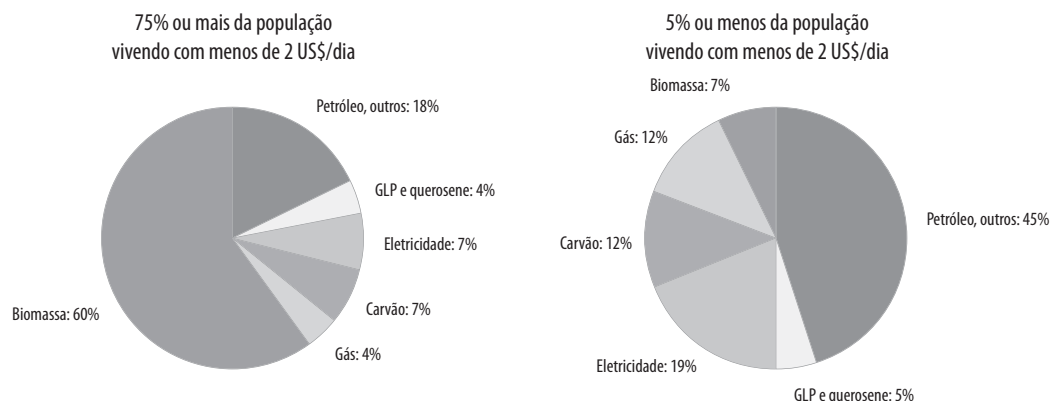
| TABELA 1.2 – Utilização de energia comercial e os indicadores de desenvolvimento humano, 2002 |                                                                  |          |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------|-----------|
| Condições                                                                                     | Participação da energia comercial no total do consumo de energia |          |           |
|                                                                                               | Indicadores                                                      |          |           |
|                                                                                               | 0 – 20%                                                          | 21 – 40% | 41 – 100% |
| Esperança média de vida ao nascer (anos)                                                      | 59,8                                                             | 69       | 69,5      |
| Probabilidade de 40 (%) de não sobreviver ao nascer                                           | 21,7                                                             | 9,4      | 9,1       |
| Taxa bruta de matrícula escolar                                                               | 52,4                                                             | 65,4     | 76,9      |
| Crianças com baixo peso (% da população)                                                      | 40,9                                                             | 15,1     | 11,9      |
| População sem acesso a água tratada (%)                                                       | 20,9                                                             | 22,9     |           |
| Número de países na amostra                                                                   | 30                                                               | 7        | 27        |
| Porcentagem da população total da amostra                                                     | 42%                                                              | 39%      | 17%       |

Nota: Os indicadores são médias ponderadas da população com base nos 64 países em desenvolvimento para os quais existem dados disponíveis.  
Fonte: Adaptado da análise da AIE relativa ao PNUD (2004).

agrícolas e esterco. A maioria desses combustíveis não é comercializada. As pessoas pobres nas zonas rurais, sobretudo mulheres e crianças, empregam muito do seu tempo na tarefa de recolher lenha. Essa prática conduz em geral à escassez e a danos ecológicos em áreas de alta densidade populacional. O uso de energia da biomassa pode reduzir a produtividade agrícola, uma vez que os resíduos agrícolas e o esterco que são queimados em fornos poderiam ser utilizados como fertilizantes. A biomassa, quando queimada de forma ineficiente, pode ser uma das principais causas da poluição por fumaça nos ambientes domésticos. A Organização Mundial de Saúde estima que nos países em desenvolvimento morram, a cada ano, 2,5 milhões de mulheres e crianças pela fumaça de fogões que utilizam a biomassa tradicional como combustível. Mais da metade está na China e na Índia<sup>12</sup>.

Conforme aumenta a renda, as famílias nos países em desenvolvimento mudam para os serviços modernos de energia aplicados à cocção de alimentos, ao aquecimento, à iluminação e para utilização de

<sup>12</sup> Agência Internacional de Energia (AIE). *World Energy Outlook 2002*. Paris, capítulo 13, p. 368. Disponível em: <<http://titania.sourceoecd.org/vl=2224027/cl=66/nw=1/rpsv/cgi-bin/fulltextew.pl?prpsv=ij/oecdthemes/99980053/v2002n16/s1/p11.idx>>. Acesso em: 20 ago. 2009.



**FIGURA 1.3** – Consumo final de energia *per capita* por tipo de combustível e proporção de pessoas na pobreza nos países em desenvolvimento, 2002.

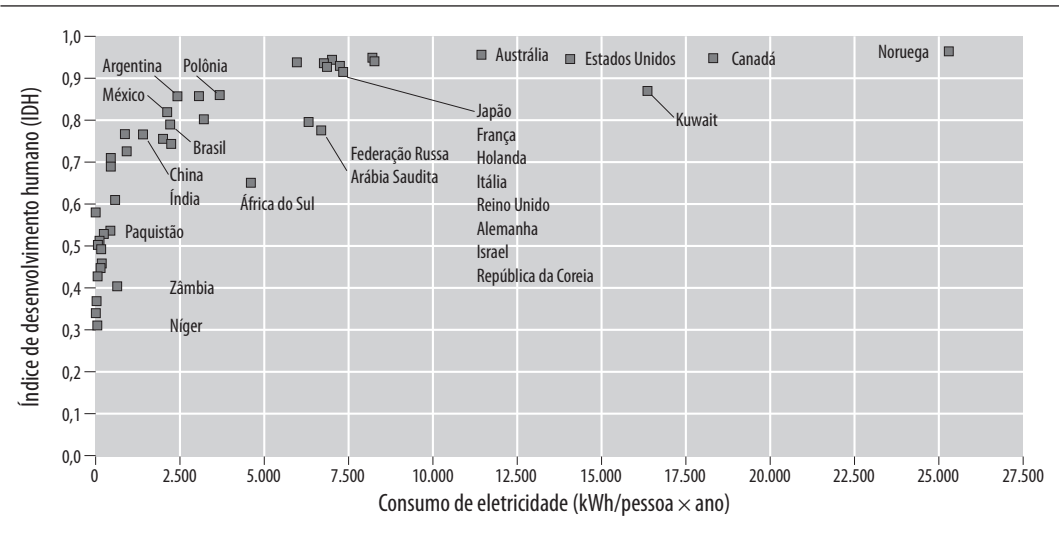
Fonte: Adaptado da análise da AIE relativa ao PNUD (2004).

eletrodomésticos. A rapidez com que isso ocorre depende da modicidade do custo dos serviços modernos de energia, bem como da sua disponibilidade e das preferências culturais. Na maioria dos casos esse processo é gradual. De forma geral, as pessoas inicialmente substituem os combustíveis tradicionais por combustíveis modernos intermediários, tais como carvão e querosene e, finalmente, por combustíveis avançados, como o gás liquefeito de petróleo, o gás natural e a eletricidade (Figura 1.3).

### 1.1.3 Acesso à eletricidade

O acesso à eletricidade é vital para o desenvolvimento humano. Na Figura 1.4 estão mostradas as parcelas de consumo de eletricidade *per capita*, classificadas conforme o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) nos países da OCDE e nos países não pertencentes à OCDE. A correlação é fortemente não linear. A eletricidade é, do ponto de vista prático, indispensável para determinadas atividades, tais como iluminação, refrigeração e funcionamento de eletrodomésticos. Nesses casos, não pode ser facilmente substituída por outras formas de energia. Segundo a AIE, o IDH atinge um patamar quando o consumo *per capita* de eletricidade atinge um nível de cerca de 5.000 kWh por ano<sup>13</sup>. O

<sup>13</sup> WEO2004.



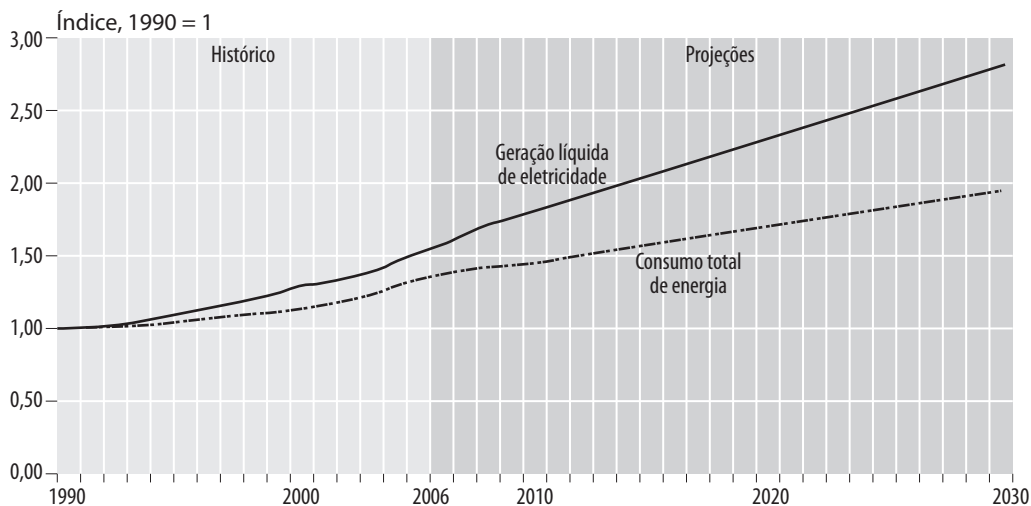
**FIGURA 1.4 –** Relação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo *per capita* de eletricidade, 2003 – 2004.  
Fonte: Adaptado da análise do PNUD (2006) pelo InterAcademy Council<sup>14</sup>.  
Nota: A média mundial do IDH é igual a 0,741. O consumo médio de eletricidade no mundo é de 2.490 kWh por pessoa/ano, que se traduz em cerca de 9 gigajoules (GJ)/pessoa/ano [10.000 quilowatts (kWh) = 36 GJ].

consumo acima desse limiar não está necessariamente ligado a um IDH mais elevado. Isso fica explícito pela comparação entre o consumo de eletricidade dos cidadãos dos Estados Unidos – com uma taxa de cerca de 14.000 kWh/por pessoa/ano – e o consumo dos cidadãos europeus, que gozam de padrões de vida semelhantes e utilizam, em média, apenas 7.000 kWh/por pessoa/ ano<sup>15/16</sup>.

1.1.4 Projeção da demanda por eletricidade em 2030

Segundo o *International Energy Outlook 2009 (IEO2009)*, a geração mundial de eletricidade terá um aumento médio anual de 2,4% ao ano entre 2006 e 2030, considerando o cenário de referência do *IEO2009*. As

<sup>15</sup> O consumo *per capita* de eletricidade em alguns países europeus, como Suécia e Noruega, é maior do que nos Estados Unidos (IAC, 2008).  
<sup>16</sup> InterAcademy Council (IAC). *Lighting the Way Toward Sustainable Energy Future*. Amsterdã, 2008, Capítulo 1, p. 14. Disponível em: <[http://www.interacademycouncil.net/Object.File/Master/12/060/1.%20The%20Sustainable %20Energy%20Challenge.pdf](http://www.interacademycouncil.net/Object.File/Master/12/060/1.%20The%20Sustainable%20Energy%20Challenge.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2009.  
<sup>14</sup> InterAcademy Council (IAC). *Lighting the Way Toward Sustainable Energy Future*. Amsterdã, 2008, Capítulo 1, p. 14. Disponível em: <<http://www.interacademycouncil.net/Object.File/Master/12/060/1.%20The%20Sustainable %20Energy%20Challenge.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2009.



**FIGURA 1.5** – Crescimento da geração de energia elétrica e do consumo total da energia mundial 1990-2030.

Fontes: IEO2009. Histórico: Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (jun.-dez. 2008). Disponível em: <[www.eia.doe.gov/iea](http://www.eia.doe.gov/iea)>. Acesso em: 6 out. 2009. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

projeções indicam que a eletricidade deverá aumentar sua participação no fornecimento da demanda total de energia no mundo e é a forma de uso final de energia com mais rápido crescimento em todo o mundo no médio prazo. Desde 1990 o crescimento da produção líquida da geração de eletricidade foi superior ao crescimento do consumo total de energia (2,9% ao ano e 1,9% ao ano, respectivamente), e o crescimento da demanda por eletricidade continua a superar o crescimento do consumo total de energia no período projetado (Figura 1.5).

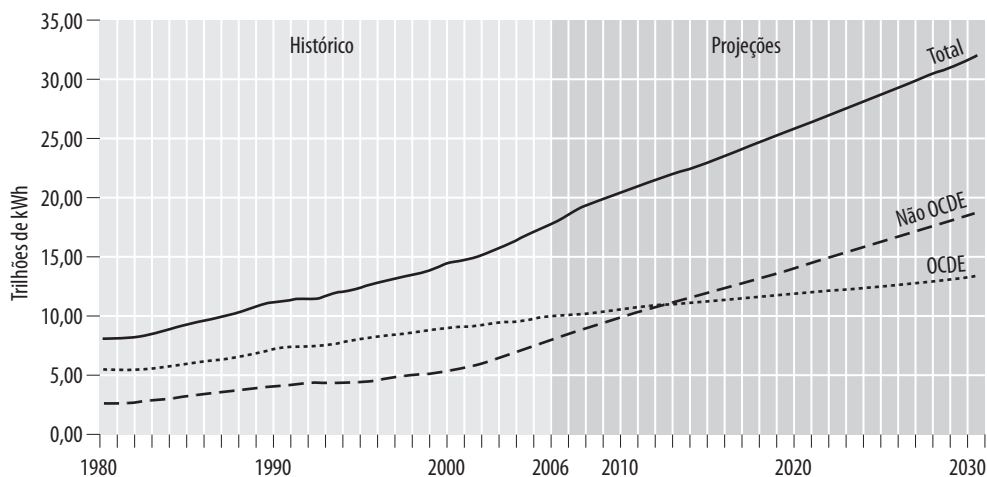
A geração de eletricidade no mundo aumenta em 77% no caso de referência, evoluindo de 18 trilhões de kWh em 2006 para 23,2 trilhões de kWh em 2015 e 31,8 trilhões de kWh em 2030 (Tabela 1.3). Embora seja esperado que a recessão mundial iniciada em 2008 amortecia a demanda por eletricidade no curto prazo, a projeção do caso referência do *IEO2009* antecipa que a recessão não será prolongada e espera uma tendência de retorno do crescimento na demanda por eletricidade após 2010. O impacto da recessão no consumo de eletricidade é susceptível de ser sentido mais fortemente no setor industrial como resultado da menor demanda por produtos manufaturados. A procura no setor de construção é menos sensível à evolução das condições econômicas do que no setor industrial porque as pessoas, em geral, continuam a consumir ele-

| TABELA 1.3 – Geração líquida de energia elétrica por fonte na OCDE e fora da OCDE, 2006-2030 (Trilhões de kWh) |                       |             |             |             |             |             |             |                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| Região                                                                                                         |                       | 2006        | 2010        | 2015        | 2020        | 2025        | 2030        | Mudança percentual média 2006-2030 |
| OCDE                                                                                                           | Líquidos              | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | 0,3         | −0,4                               |
|                                                                                                                | Gás natural           | 2,0         | 2,2         | 2,4         | 2,7         | 3,0         | 3,1         | 1,8                                |
|                                                                                                                | Carvão                | 3,9         | 3,9         | 4,0         | 4,0         | 4,0         | 4,3         | 0,6                                |
|                                                                                                                | Nuclear               | 2,2         | 2,3         | 2,4         | 2,4         | 2,5         | 2,6         | 0,6                                |
|                                                                                                                | Renováveis            | 1,6         | 1,9         | 2,2         | 2,5         | 2,8         | 2,9         | 2,5                                |
|                                                                                                                | <b>Total OCDE</b>     | <b>9,9</b>  | <b>10,6</b> | <b>11,3</b> | <b>11,9</b> | <b>12,6</b> | <b>13,2</b> | <b>1,2</b>                         |
| Não OCDE                                                                                                       | Líquidos              | 0,6         | 0,6         | 0,6         | 0,6         | 0,6         | 0,6         | 0,1                                |
|                                                                                                                | Gás natural           | 1,6         | 2,0         | 2,5         | 3,0         | 3,4         | 3,7         | 3,6                                |
|                                                                                                                | Carvão                | 3,7         | 4,8         | 5,5         | 6,4         | 7,8         | 9,2         | 3,9                                |
|                                                                                                                | Nuclear               | 0,4         | 0,5         | 0,7         | 0,9         | 1,2         | 1,3         | 4,8                                |
|                                                                                                                | Renováveis            | 1,8         | 2,2         | 2,7         | 3,2         | 3,4         | 3,8         | 3,2                                |
|                                                                                                                | <b>Total Não OCDE</b> | <b>8,0</b>  | <b>10,0</b> | <b>12,0</b> | <b>14,1</b> | <b>16,3</b> | <b>18,6</b> | <b>3,5</b>                         |
| Mundo                                                                                                          | Líquidos              | 0,9         | 0,9         | 0,9         | 0,9         | 0,9         | 0,9         | −0,1                               |
|                                                                                                                | Gás natural           | 3,6         | 4,2         | 4,9         | 5,7         | 6,4         | 6,8         | 2,7                                |
|                                                                                                                | Carvão                | 7,4         | 8,7         | 9,5         | 10,4        | 11,8        | 13,6        | 2,5                                |
|                                                                                                                | Nuclear               | 2,7         | 2,8         | 3,0         | 3,4         | 3,6         | 3,8         | 1,5                                |
|                                                                                                                | Renováveis            | 3,4         | 4,1         | 4,9         | 5,7         | 6,1         | 6,7         | 2,9                                |
|                                                                                                                | <b>Total Mundo</b>    | <b>18,0</b> | <b>20,6</b> | <b>23,2</b> | <b>26,0</b> | <b>28,9</b> | <b>31,8</b> | <b>2,4</b>                         |

Nota: Os totais podem não ser iguais à soma em virtude do arredondamento independente.  
Fontes: 2006: Derivado do Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (Jun.-dez. 2008). Disponível em: <www.eia.doe.gov/iea>. Acesso em: 6 out. 2009. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

tricidade para aquecimento e resfriamento de ambientes, para cozinhar, na refrigeração e no aquecimento de água, mesmo em uma recessão.

Em geral, o crescimento da eletricidade nos países da OCDE – onde os mercados estão bem estabelecidos e os padrões de consumo estão maduros – é mais lento do que nos países fora da OCDE, onde ainda existe uma grande demanda reprimida. As altas taxas de crescimento econômico projetadas para os países em desenvolvimento apoiam um forte crescimento no aumento da demanda por eletricidade nessas regiões do mundo até o final do período de projeção.

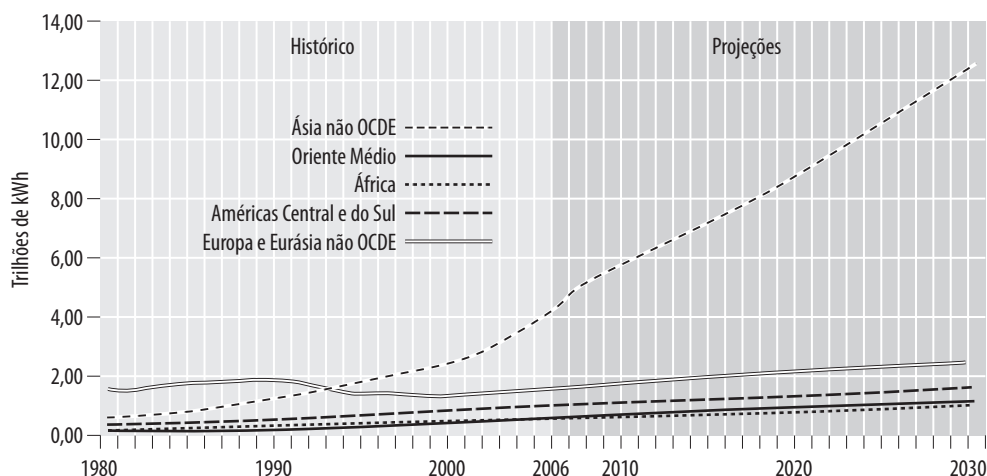


**FIGURA 1.6 – Geração líquida de energia elétrica no mundo 1980-2030.**

Fontes: Histórico: Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (jun.-dez. 2008). Disponível em: <[www.eia.doe.gov/iea](http://www.eia.doe.gov/iea)>. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

Os países não pertencentes à OCDE consumiram 45% do fornecimento total de eletricidade do mundo em 2006, e as suas participações no consumo mundial devem aumentar ao longo do período de projeção. Em 2030, os países não membros da OCDE serão responsáveis por 58% do consumo mundial de eletricidade, e as participações dos países da OCDE declinarão para 42% (Figura 1.6). Nos países em desenvolvimento, um forte crescimento econômico traduz-se em uma crescente procura por eletricidade. Aumentos na renda *per capita* levam a melhores padrões de vida e a um aumento na demanda por consumo para iluminação, equipamentos eletrodomésticos e crescentes requisitos de energia elétrica no setor industrial. Como resultado, a produção total de eletricidade nos países não membros da OCDE aumenta a uma média de 3,5% por ano no caso de referência, liderada por países da Ásia (incluindo China e Índia), com um aumento anual médio de 4,4% de 2006 a 2030 (Figura 1.7). Em contraste, a geração líquida<sup>17</sup> entre as nações da OCDE cresce a uma média de 1,2% ao ano 2006-2030.

<sup>17</sup> Geração líquida: O valor da produção bruta menos a energia elétrica consumida na estação geradora (s) na estação de serviço ou auxiliares. Obs.: A eletricidade necessária para o bombeamento nas plantas é considerada como a eletricidade para a estação de serviço e é deduzida da geração bruta.



**FIGURA 1.7 – Geração líquida de energia elétrica, por região, países não membros da OCDE 1980-2030.**

Fontes: Histórico: Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual 2006 (jun.-dez. 2008). Disponível em: <[www.eia.doe.gov/iea](http://www.eia.doe.gov/iea)>. Acesso em: 6 out. 2009. Projeções: EIA, World Energy Projections Plus (2009).

## 1.2 A matriz elétrica mundial e o seu impacto ambiental

### 1.2.1 A matriz elétrica mundial

A combinação de combustíveis primários utilizados para gerar eletricidade tem mudado muito ao longo das últimas quatro décadas. O carvão continua a ser o combustível mais utilizado para a geração de eletricidade, apesar de a geração nucleoeletrica ter aumentado rapidamente a partir da década de 1970 e ao longo da década de 1980, além de a geração de eletricidade com gás natural ter crescido também rapidamente nos anos 1980 e 1990. O uso do petróleo para a geração de eletricidade tem diminuído desde meados dos anos 1970, em virtude do embargo do fornecimento de petróleo por parte dos produtores árabes em 1973-1974 e pela Revolução Iraniana de 1979, que acarretaram um aumento nos preços do produto para níveis muito superiores aos dos outros combustíveis.

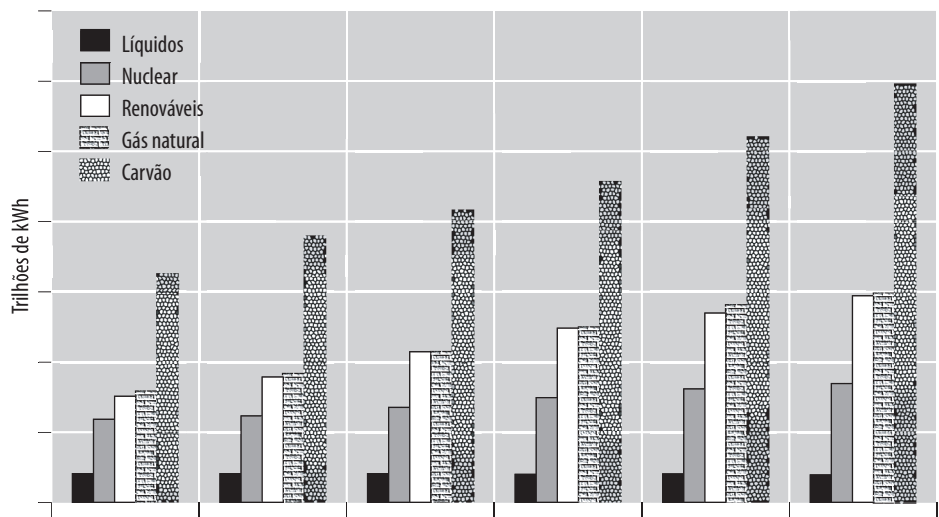
Embora os preços do petróleo no mundo tenham se contraído de modo bastante significativo no final de 2008 e em 2009, a alta dos preços verificada entre 2003 e 2008, combinada com as preocupações sobre as consequências das emissões de gases de efeito estufa no ambiente, renovaram o interesse no desenvolvimento de alternativas para

combustíveis fósseis, especificamente a energia nuclear e as fontes de energia renováveis. Segundo a avaliação da AIE para o caso de referência *IEO2009*, não é esperado que os preços do petróleo permaneçam nos níveis atuais. As economias começam a se recuperar da recessão global, bem como a demanda para produtos líquidos e outros tipos de energia. Como consequência, as perspectivas de longo prazo continuam a melhorar para a geração de eletricidade por energia nuclear e de fontes renováveis, apoiadas por incentivos governamentais e pela alta dos preços dos combustíveis fósseis. Na projeção da AIE, o gás natural e o carvão apresentam o segundo e o terceiro crescimento mais rápido entre as fontes de energia utilizadas para geração de eletricidade, embora as perspectivas para o carvão, em particular, possam ser alteradas substancialmente por qualquer legislação futura que vise reduzir ou limitar o crescimento das emissões de gases com efeito estufa.

## **Carvão**

No caso de referência do *IEO2009*, o carvão continua a responder pela maior participação na produção mundial de energia elétrica, por uma larga margem (Figura 1.8). Em 2006, a produção de carvão foi responsável por 41% do fornecimento de eletricidade no mundo; em 2030, sua participação está projetada para ser de 43%. Sustentada pelos preços elevados do petróleo e do gás natural, a geração por carvão torna-se economicamente cada vez mais interessante, em especial em nações que possuem grandes reservas desse mineral, tais como a China, a Índia e os Estados Unidos. A geração mundial líquida de eletricidade a partir do carvão quase duplica ao longo do período de projeção, passando de 7,4 trilhões de kWh em 2006 para 9,5 trilhões de kWh em 2015 e 13,6 trilhões de kWh em 2030.

As perspectivas para a geração a partir do carvão podem ser alteradas substancialmente por acordos internacionais para a redução de emissões de gases de efeito estufa. O carvão é a fonte de energia mais utilizada no mundo para geração de energia e também a fonte de energia mais intensiva na emissão de carbono. Caso os custos, implícitos ou explícitos, sejam aplicados às emissões de dióxido de carbono, existem várias alternativas tecnológicas não emissoras ou com baixas emissões que são hoje comercialmente comprovadas, ou que estão em desenvolvimento e que poderiam ser usadas para substituir usinas de geração



**FIGURA 1.8 – Geração de eletricidade por combustível.**  
Fontes: Histórico: Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (jun.-dez. 2008). Disponível em: <www.eia.doe.gov/iea>. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

a carvão. Aplicar essas tecnologias não exigiria mudanças caras e de grande escala na infraestrutura de distribuição de energia e nos equipamentos que utilizam a energia elétrica.

Entretanto, para outros setores pode ser difícil atingir resultados semelhantes. No setor de transportes, por exemplo, é provável que a redução em larga escala das emissões de dióxido de carbono exija profundas alterações na frota de veículos automotores, nos postos de abastecimento e nos sistemas de distribuição de combustível, o que demandaria custos muito elevados. No setor de energia elétrica, diferentemente, substituir os combustíveis fósseis pela energia nuclear e pelas energias renováveis e melhorar a eficiência dos aparelhos elétricos seria uma maneira comparativamente barata de reduzir as emissões.

**Gás natural**

Durante o período de projeção do *IEO2009 – 2006 a 2030* –, a geração de energia elétrica por usinas que utilizam o gás natural aumenta em 2,7% ao ano, tornando-a a fonte de mais rápido crescimento, depois

das energias renováveis. A geração mundial de energia elétrica por gás natural aumenta de 3,6 trilhões de kWh em 2006 para 6,8 trilhões de kWh em 2030, mas a quantidade total de eletricidade gerada a partir de gás natural continua a ser cerca da metade da energia elétrica total gerada pelo carvão em 2030. O ciclo combinado de gás natural é uma opção atraente para novas usinas em virtude de sua eficiência como combustível, da flexibilidade operacional (podendo ser colocado online em minutos em vez de horas, tal como acontece com as instalações de carvão e algumas outras fontes), dos prazos relativamente curtos para o planejamento e a construção (meses em vez de anos, como nas usinas nucleares) e dos custos de capital, que são inferiores aos de outras tecnologias.

### ***Combustíveis líquidos e outros derivados de petróleo***

Com os preços mundiais do petróleo projetados para retornar a níveis mais ou menos elevados, chegando a 130 dólares por barril (em dólares de 2007) em 2030, os combustíveis líquidos são a única fonte para a geração de energia elétrica que não cresce em escala mundial. Na maioria das nações, é esperada uma resposta aos altos preços do petróleo pela redução ou eliminação do uso de petróleo para geração de eletricidade, optando-se por fontes mais econômicas de geração, incluindo o carvão<sup>18</sup>.

### ***Energia nuclear***

Para o caso de referência do *IEO2009*, a produção de eletricidade a partir de energia nuclear está projetada para um aumento de cerca de 2,7 trilhões de kWh, em 2006, para 3,8 trilhões de kWh em 2030, tendo em vista a preocupação com os preços crescentes dos combustíveis fósseis, a segurança energética e as emissões de gases de efeito estufa. Os preços elevados dos combustíveis fósseis permitem que a energia nuclear se torne economicamente competitiva com a geração a partir do carvão, do gás natural e dos combustíveis líquidos, apesar dos custos relativamente elevados de capital associados às nucleoeletricas.

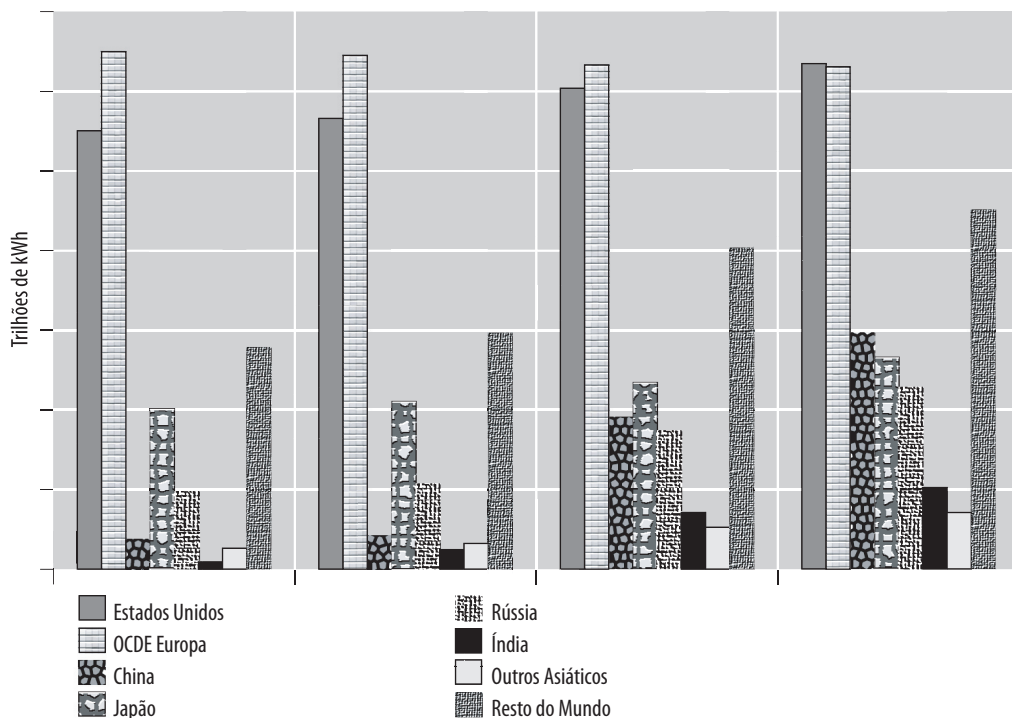
---

<sup>18</sup> Agência Internacional de Energia (AIE), *International Energy Outlook 2009*, Paris, 2009, Capítulo 5, p. 63-84. Disponível em: <[http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2009\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2009).pdf)>. Acesso em: 5 jun. 2009.

Além disso, as taxas de utilização da capacidade instalada das nucleoe-létricas existentes têm aumentado, e a AIE prevê que será concedida a prorrogação das suas vidas operacionais para a maioria das instalações nucleares mais antigas nos países da OCDE e fora da OCDE.

Em todo o mundo, a geração nuclear está atraindo novos países com interesse em aumentar a diversificação da sua matriz de geração elétrica, melhorar a segurança energética e fornecer uma alternativa de baixo carbono aos combustíveis fósseis. Ainda assim, há considerável grau de incerteza associado à energia nuclear. Problemas que poderiam retardar sua expansão no futuro incluem a segurança das instalações, o gerenciamento dos radioativos e as preocupações com o potencial de proliferação de armas nucleares, sobretudo a partir de centrífugas para enriquecer urânio e a implantação de instalações para reprocessamento de combustível usado dentro do escopo de programas nucleares civis. Essas questões continuam a levantar preocupações públicas em muitos países e podem prejudicar o desenvolvimento de novas usinas nucleares. É interessante salientar que o caso de referência do *IEO2009* incorpora as melhores perspectivas para a energia nuclear no mundo sem, no entanto, considerar possíveis acordos relativos à taxa de emissões de carbono que podem alterar esse panorama, que será discutido na Seção 1.3. Independentemente dos acordos que venham a ser assinados, o panorama da geração nucleoe elétrica sofreu profunda alteração em relação ao passado, considerando-se que a projeção *IEO2009* para a geração nucleoe elétrica em 2025 é 25% superior à projeção publicada há cinco anos, no *IEO2004*.

Em termos regionais, o caso de referência *IEO2009* projeta um maior crescimento na geração elétrica nuclear para os países da Ásia que não fazem parte da OCDE (Figura 1.9). A geração de energia nuclear nessa região está projetada para crescer a uma taxa média anual de 7,8% de 2006 a 2030, incluindo os aumentos previstos de 8,9% ao ano na China e 9,9% por ano na Índia. Fora da Ásia, o maior aumento da capacidade nuclear instalada nos países fora da OCDE está previsto para a Rússia, onde a geração de eletricidade por fonte nuclear aumenta a uma média de 3,5% ao ano. Em contrapartida, na Europa pertencente à OCDE, é esperado um pequeno declínio na geração de energia nuclear, considerando que alguns governos (incluindo a Alemanha e a Bélgica) ainda têm planos para encerrar completamente os seus programas nucleares.



**FIGURA 1.9** – Geração mundial líquida de eletricidade de fonte nuclear por região, 2006-2030.

Fontes: Histórico: Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (jun.-dez. 2008). Disponível em: <[www.eia.doe.gov/iea](http://www.eia.doe.gov/iea)>. Acesso em: 6 out. 2009. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

Para enfrentar a incerteza inerente às projeções de crescimento da energia nuclear no longo prazo, a AIE utiliza uma abordagem em duas etapas, a fim de formular as perspectivas para a energia nuclear. No curto prazo (até 2015), as projeções do *IEO2009* são baseadas nas atividades atuais da indústria de geração elétrica nuclear e nos planos confirmados dos governos dos diferentes países. Em decorrência dos prazos associados ao licenciamento e à construção de usinas nucleares, há um consenso geral entre os analistas sobre quais projetos nucleares têm probabilidade de estar operacionais no médio prazo. Depois de 2015, as projeções são baseadas em uma combinação de planos regionais ou objetivos anunciados por países, levando em consideração outros pontos que são inerentes à energia nuclear, como questões geopolíticas, avanços tecnológicos e políticas ambientais. A disponibilidade de urânio também é considerada na modelagem do *IEO2009*.

Neste trabalho, a disponibilidade de urânio para fazer frente aos diferentes cenários da utilização da energia nuclear será discutida em detalhes no Capítulo 2.

### ***Hidroeletricidade, eólica, geotérmica, e outras energias renováveis***

A energia renovável é a fonte de geração de eletricidade com o mais rápido crescimento no caso de referência *IEO2009*. O total da geração de eletricidade a partir de recursos renováveis cresce 2,9% ao ano, e, em algumas partes do mundo, a geração de eletricidade por fontes renováveis aumenta sua participação de 19% em 2006 para 21% em 2030. As energias hidrelétrica e eólica serão responsáveis pela maior parte desse aumento. A geração de eletricidade por energia eólica tem crescido rápido nas últimas décadas, passando de 11 GW de capacidade instalada líquida no início de 2000 para 121 GW no final de 2008 – uma tendência que deverá continuar no futuro<sup>19</sup>. Dos 3,3 trilhões de novos kWh adicionados à geração elétrica por fontes renováveis, no longo prazo, 1,8 trilhão de kWh (54%) é atribuído às hidrelétricas e 1,1 trilhão de kWh (33%) à energia eólica (Tabela 1.4)<sup>20</sup>.

Embora as fontes renováveis de energia tenham efeitos ambientais positivos e contribuam para a segurança energética, as tecnologias renováveis, exceto a da hidroeletricidade, não conseguem competir economicamente com os combustíveis fósseis durante o período de projeção, exceto em algumas regiões. A energia solar, por exemplo, é hoje um “nicho” nas fontes de energias renováveis, mas apenas pode ser econômica onde os preços da eletricidade sejam muito elevados ou onde estejam disponíveis fortes incentivos governamentais. Na verdade, as políticas ou incentivos do governo fornecem frequentemente a

---

<sup>19</sup> World Wind Energy Association, *World Wind Energy Report 2008* (fev. 2009), p. 4. Disponível em: <[www.wwindea.org](http://www.wwindea.org)>. Acesso em: 13 out. 2009.

<sup>20</sup> No caso de referência atualizado do *American Energy Outlook 2009* (*AEO2009*, abr. 2009), uma expansão significativa da utilização de combustíveis renováveis para a geração de eletricidade nos Estados Unidos está projetada no curto prazo. Uma extensão de créditos tributários federais e um programa de garantia de empréstimos na legislação dos Estados Unidos pretendem estimular o aumento da geração de fontes renováveis em relação à projeção do caso referência publicado *AEO2009* (mar. 2009). Como resultado, incorporando as projeções atualizadas para o caso de referência do *AEO2009* para os Estados Unidos, há um aumento na produção mundial total de energias renováveis de 3,4 trilhões de kWh sobre a projeção do período, dos quais 1,8 trilhão de kWh (53% do aumento total) é proveniente da energia hidrelétrica e 1,2 trilhão de kWh (35%) é proveniente da energia eólica.

**Tabela1.4 – Geração de eletricidade a partir de fontes renováveis na OCDE e fora da OCDE por fonte de energia , 2006-2030 (bilhões de kWh)**

|              | Região                    | 2006         | 2010         | 2015         | 2020         | 2025         | 2030         | Mudança percentual Média Anual |
|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------|
| OCDE         | Hidrelétrica              | 1.274        | 1.321        | 1.396        | 1.447        | 1.496        | 1.530        | 0,8                            |
|              | Eólica                    | 113          | 258          | 418          | 582          | 713          | 842          | 8,7                            |
|              | Geotérmica                | 35           | 45           | 54           | 57           | 59           | 62           | 2,4                            |
|              | Outras                    | 212          | 263          | 354          | 438          | 487          | 513          | 3,7                            |
|              | <b>Total OCDE</b>         | <b>1.635</b> | <b>1.888</b> | <b>2.222</b> | <b>2.515</b> | <b>2.756</b> | <b>2.948</b> | <b>2,5</b>                     |
| Fora da OCDE | Hidrelétrica              | 1.723        | 2.060        | 2.491        | 2.911        | 3.098        | 3.242        | 2,7                            |
|              | Eólica                    | 14           | 53           | 82           | 115          | 150          | 372          | 14,6                           |
|              | Geotérmica                | 19           | 29           | 40           | 42           | 45           | 47           | 3,8                            |
|              | Outras                    | 33           | 41           | 64           | 83           | 100          | 114          | 5,3                            |
|              | <b>Total Fora da OCDE</b> | <b>1.790</b> | <b>2.184</b> | <b>2.676</b> | <b>3.151</b> | <b>3.393</b> | <b>3.776</b> | <b>3,2</b>                     |
| Mundo        | Hidrelétrica              | 2.997        | 3.381        | 3.887        | 4.359        | 4.594        | 4.773        | 2,0                            |
|              | Eólica                    | 127          | 312          | 500          | 687          | 864          | 1.214        | 9,9                            |
|              | Geotérmica                | 55           | 75           | 93           | 99           | 104          | 109          | 2,9                            |
|              | Outras                    | 246          | 304          | 418          | 521          | 587          | 628          | 4,0                            |
|              | <b>Total Mundo</b>        | <b>3.424</b> | <b>4.072</b> | <b>4.898</b> | <b>5.666</b> | <b>6.149</b> | <b>6.724</b> | <b>2,9</b>                     |

Nota: Totais podem não ser iguais à soma em função de arredondamento independente.

Os números dos Estados Unidos nesta tabela são baseados no caso de referência da publicação *AEO2009* (Mar. 2009) e no caso de referência do *Updated AEO2009* (Abr. 2009), que incorpora as disposições da ARRA2009 que estimulam o aumento da geração renovável, uma expansão significativa no uso de combustíveis renováveis é projetada. Como resultado, nas projeções para 2030, a produção total de eletricidade hidrelétrica do mundo se eleva para de 4.771 bilhões de kWh, a geração total de energia eólica sobe para 1.291 bilhões de kWh, a geração total de energia geotérmica sobe para 111 bilhões de kWh, a geração total de outras energias renováveis sobe a 594 bilhões de kWh.

**Fontes:** 2006: Derivado do Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2006* (jun.-dez. 2008). Disponível em: <www.eia.doe.gov/iea>. Acesso em: 6 out. 2009. Projeções: EIA, *World Energy Projections Plus* (2009).

motivação primária para a construção de instalações de geração elétrica por energias renováveis.

No caso de referência *IEO2009*, estão projetadas mudanças diferentes no mix de combustíveis renováveis para a produção de eletricidade nos países da região da OCDE em relação aos países não pertencentes à OCDE. Nas nações da OCDE, a maioria dos recursos hidrelétricos economicamente exploráveis já foi aproveitada. Com exceção do Canadá e da Turquia, são poucos os projetos de grandes hidrelétricas planejadas para o futuro. Como resultado, o crescimento das energias renováveis na

maioria dos países da OCDE deve vir de fontes não hidrelétricas, sobretudo a eólica e a de biomassa. Muitos países da OCDE, sobretudo os da Europa, têm políticas de governo que incluem incentivos fiscais para tarifas de aquisição<sup>21</sup> e de quotas de mercado que incentivem a construção de novas instalações de geração de eletricidade por energia renovável. Nos países não pertencentes à OCDE, é esperado que a energia hidrelétrica seja a fonte predominante no crescimento da energia renovável. O forte crescimento na geração hidrelétrica resultará principalmente de usinas de médio e grande porte que serão construídas na China, na Índia, no Brasil e em algumas nações do Sudeste Asiático, como o Vietnã e o Laos. Taxas elevadas de crescimento de geração elétrica por energia eólica também são esperadas nos países não pertencentes à OCDE. Os acréscimos mais importantes de fornecimento de eletricidade gerada a partir de energia eólica devem ocorrer na China.

As projeções do *IEO2009* para fontes renováveis de energia incluem apenas energias renováveis comercializadas. Biocombustíveis não comerciais, a partir de recursos vegetais e animais, são, entretanto, uma importante fonte de energia, notadamente nos países em desenvolvimento fora da OCDE. A AIE estimou que cerca de 2,5 bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento dependem da biomassa tradicional como combustível principal para cozinhar<sup>22</sup>. Combustíveis e energias renováveis distribuídos e não comercializados (energia renovável consumida no local de produção, como a energia solar fora da rede, obtida com painéis fotovoltaicos) não estão incluídos nas projeções, no entanto, porque os dados globais sobre sua utilização não estão disponíveis. Além disso, o impacto total da crise econômica global atual e da crise de crédito sobre o potencial de crescimento no mercado das energias renováveis não é conhecido. O caso de referência pressupõe que esses problemas podem atrasar alguns projetos no curto prazo, mas não afetará o crescimento a longo prazo de eletricidade gerada a partir de recursos renováveis.

---

<sup>21</sup> O regime tarifário denominado *feed-in* é uma estrutura de incentivos para encorajar a adoção de energias renováveis por meio de legislação do governo. No âmbito dessa estrutura tarifária, empresas de serviços públicos regionais ou nacionais são obrigadas a comprar energia renovável a um ritmo superior ao crescimento do varejo, garantindo ao gerador de fonte renovável um retorno positivo de seu investimento e permitindo que as fontes renováveis de energia superem as desvantagens de preços.

<sup>22</sup> International Energy Agency, *World Energy Outlook 2008*, Paris, nov. 2008, p. 117.

## 1.2.2 Os impactos ambientais da geração de energia elétrica

Com a publicação do IV Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC)<sup>23</sup> em 2007, há o reconhecimento generalizado de que o aquecimento global é inequívoco e que a maior parte desse aquecimento, nos últimos 50 anos, é muito provavelmente consequência do aumento da emissão de gases de efeito estufa de origem antropogênica.

As tendências apresentadas pelo cenário mundial de referência do *IEO2009* e do *WEO2008* para a utilização de energia colocam o mundo em um curso que resulta na duplicação da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, evoluindo de 380 partes por milhão (ppm) em 2005 para cerca de 700 ppm no próximo século. Levando-se em conta todos os gases de efeito estufa em todos os setores, resultaria uma concentração de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) de cerca de 1.000 ppm, correspondendo a um aumento médio da temperatura global de até 6 °C em relação aos níveis pré-industriais.

Ainda não existe um consenso internacional com relação aos níveis de estabilização de CO<sub>2</sub>e no longo prazo nem sobre quais deveriam ser a trajetória e as metas de emissão para a sua realização. No entanto, as discussões internacionais estão cada vez mais centradas em um nível de estabilização que varia entre 450 e 550 ppm de CO<sub>2</sub>e. De acordo com o IV Relatório de Avaliação do IPCC, a estabilização num nível de 450 ppm de CO<sub>2</sub>e corresponde a 50% de probabilidade de limitar o aumento da temperatura média global em cerca de 2 °C, enquanto a estabilização em 550 ppm produziria um aumento em torno de 3 °C (em comparação com 1.000 ppm e até 6 °C no cenário de referência)<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> IPCC (Painel Intergovernamental de Mudança Climática) (2007), *Mudança de Clima 2007: Sumário para Formuladores de Políticas, Contribuições dos Grupos de Trabalho I, II e III ao IV Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima*, editores R. K. Pachauri, e A. Reisinger, IPCC, Genebra, tradução de Anexandra de Ávila Ribeiro. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50401.html>>. Acesso em: 2 nov. 2009.

<sup>24</sup> Níveis de estabilização entre 445 e 490 ppm de CO<sub>2</sub>e (entre 350 e 400 ppm de CO<sub>2</sub>) correspondem a aumentos de temperatura entre 2,0 °C e 2,4 °C. A 550 ppm de CO<sub>2</sub>e, haveria uma probabilidade de 24% de um aumento de temperatura superior a 4 °C. Essa ampla faixa reflete as incertezas associadas com os diferentes caminhos de emissão e à sensibilidade do clima às emissões (IPCC, 2007).

O IV Relatório de Avaliação do IPCC apresenta conclusões da análise do impacto no ambiente e na sociedade para diferentes níveis de estabilização do CO<sub>2</sub> na atmosfera e o correspondente aumento de temperatura (Figura 1.10). Os requisitos para uma meta de estabilização de CO<sub>2</sub>e em 450 ppm seriam extremamente exigentes, demandando que as emissões de gases de efeito estufa atingissem o pico dentro de alguns anos, seguido de reduções médias anuais *per capita* de 6% ou mais<sup>25</sup>. As emissões de CO<sub>2</sub>e *per capita* precisariam cair para cerca de duas toneladas em 2050, uma significativa queda em relação à média corrente de sete toneladas (IPCC, 2007).

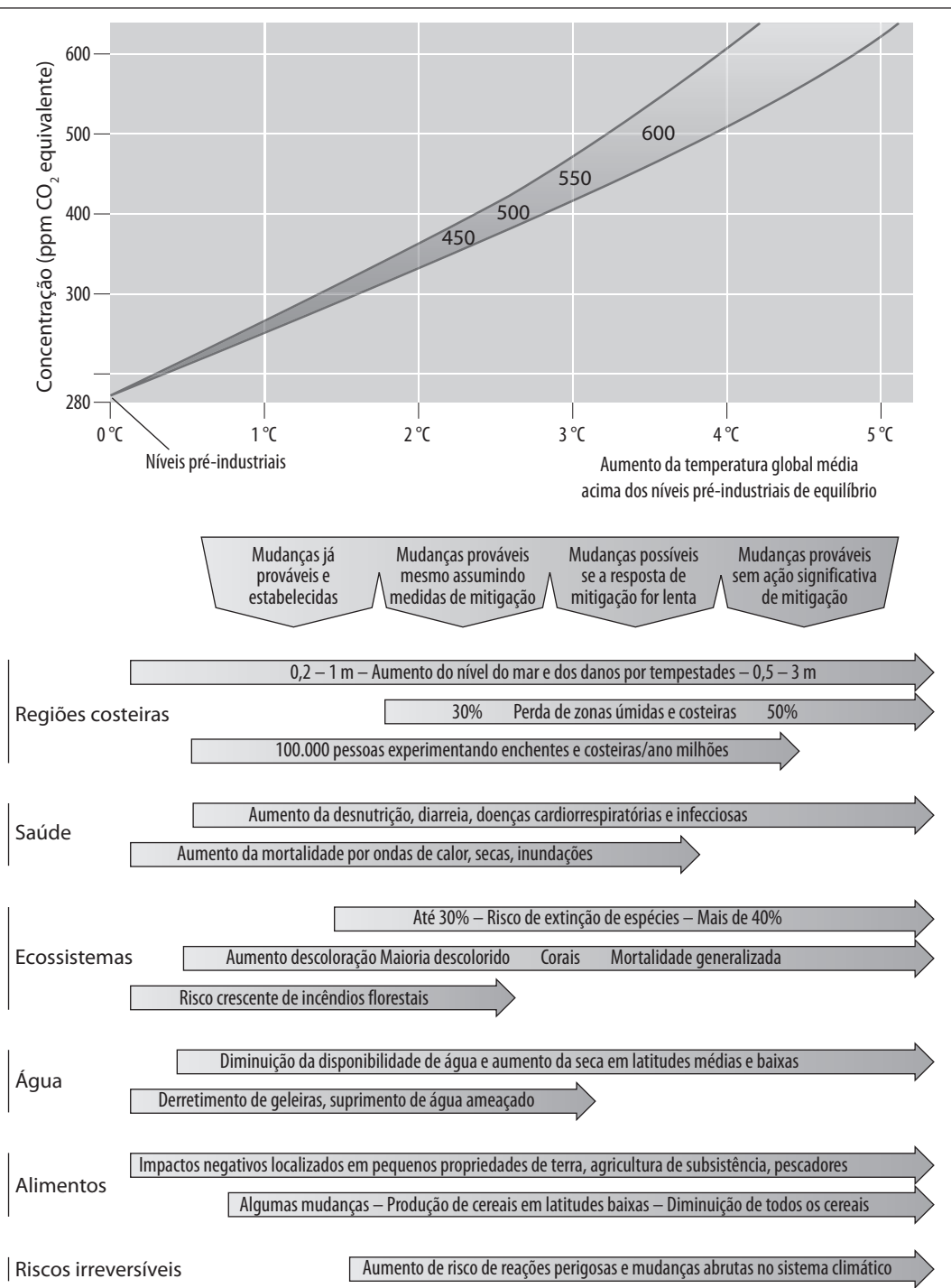
As emissões atuais variam de 26 toneladas *per capita* nos Estados Unidos e Canadá a duas toneladas no Sul da Ásia. Uma meta de 450 ppm exigiria que as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia apresentassem até 2050 uma queda entre 50% a 85% abaixo dos níveis de 2000, para ser coerente com a faixa do IPCC de 450 a 490 ppm de CO<sub>2</sub>e. Segundo o IPCC, mesmo com a estabilização a 450 ppm de CO<sub>2</sub>e (que é muito inferior ao implícito nas projeções do cenário de referência do *WEO2008*), a mudança no clima global resultante levaria a um significativo aumento do nível do mar, à perda de espécies e ao aumento da frequência de fenômenos meteorológicos extremos.

O setor da energia terá de estar no centro das discussões sobre o nível de concentração de CO<sub>2</sub>e que se pretende e sobre como consegui-lo. As emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia representam hoje 61% das emissões totais de gases de efeito estufa no mundo, uma participação que segundo a projeção deve aumentar para 68% em 2030 no cenário de referência. Durante vários anos, o *World Energy Outlook* forneceu análises das implicações das tendências no setor da energia e as políticas governamentais relacionadas à energia associadas às emissões de CO<sub>2</sub>.

Em especial no setor de geração de energia elétrica, as usinas de combustíveis fósseis emitiram 11,4 Gt de CO<sub>2</sub> em 2006, o que corresponde a 41% do total mundial. Essa participação tem aumentado constantemente, evoluindo de 36% em 1990 para 39% em 2000, e continua a crescer nas projeções do cenário de referência do *WEO2008*, para 44% em 2020

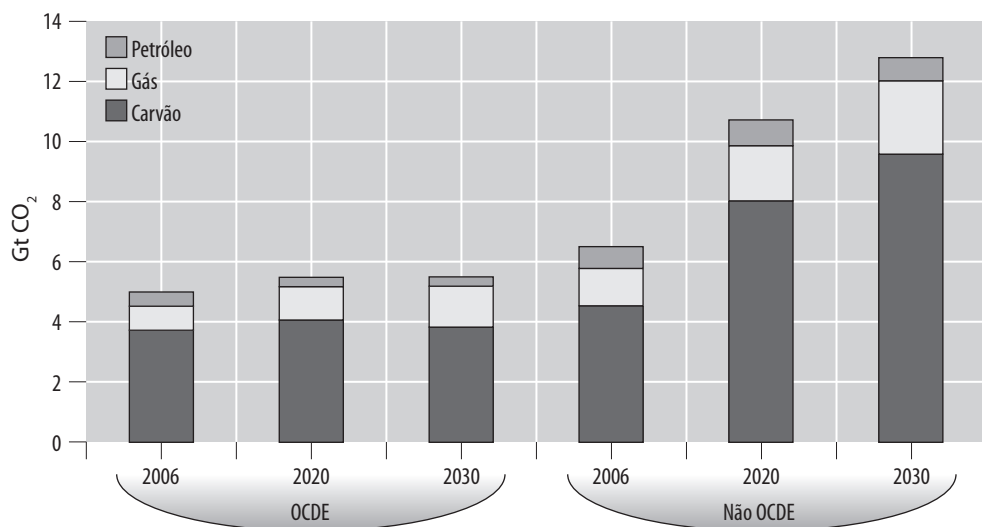
---

<sup>25</sup> Alguns estudos, como Hansen et al. (2008), sugeriram que mesmo se o limite de elevação de 1 °C de temperatura fosse definido, o perigo de sua interferência no sistema climático deveria ser evitado. Isso exigiria uma estabilização do CO<sub>2</sub>e no nível de 400 ppm, o que seria bastante mais exigente que os cenários mais ambiciosos do IPCC Fourth Assessment Report (IPCC, 2007).



**FIGURA 1.10** – Efeitos potenciais da estabilização das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa em diferentes níveis.

Fonte: Adaptado do *WEO2008*, p. 412, baseado no Quarto Relatório do IPCC (2007).

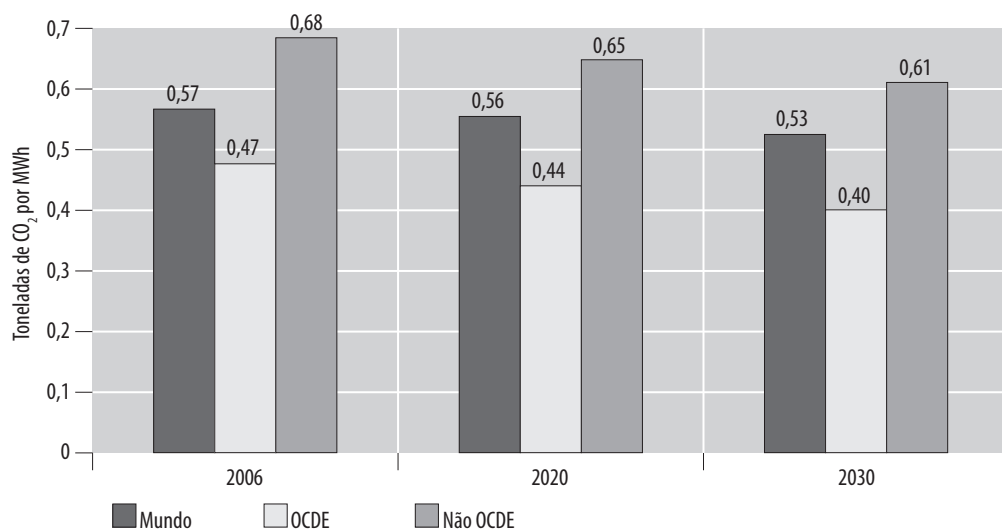


**FIGURA 1.11** – Emissões de CO<sub>2</sub> de plantas de geração elétrica por combustível e região no cenário de referência.

Fonte: Adaptado do *WEO2008*, Capítulo 16, p. 392.

e 45% em 2030. As emissões de CO<sub>2</sub> do setor de geração elétrica devem chegar a 16 Gt em 2020 e a 18 Gt em 2030. Cumulativamente, considerando o cenário de referência do *WEO2008*, a geração de energia elétrica contribui com mais de metade do aumento das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com energia até 2030. Esse crescimento é impulsionado pela ampliação relativamente rápida da demanda por eletricidade e pela utilização de combustíveis fósseis, sobretudo o carvão, na geração de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 1.8. As emissões de gases de efeito estufa de usinas a carvão chegaram a 8,3 Gt em 2006 e devem subir para 12,1 Gt ainda em 2020 e 13,5 Gt em 2030 – quase três quartos das emissões totais do setor de geração de energia elétrica.

Quase todo o aumento de emissões de CO<sub>2</sub> no setor de geração de energia elétrica será originado nos países não membros da OCDE, onde o crescimento da demanda por eletricidade tem uma dependência cada vez maior do carvão (Figura 1.11). Contabilizando uma emissão de 6,5 Gt de CO<sub>2</sub> em 2006, as emissões do setor de geração de energia elétrica de países não pertencentes à OCDE devem dobrar até 2030, conforme projeção. Na região dos países da OCDE, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentarão numa pequena porcentagem no período de projeção, pois o crescimento da demanda por eletricidade é mais contido do que nos países não membros da OCDE e porque há um aumento na participa-



**FIGURA 1.12** – Intensidade de CO<sub>2</sub> na geração elétrica por região no cenário de referência.

Fonte: Adaptado do *WEO2008*, Capítulo 16, p. 392.

ção do gás e das energias renováveis no mix de combustíveis para gerar eletricidade, em detrimento do petróleo e do carvão. O aumento total das emissões de CO<sub>2</sub> projetado para a OCDE de 0,4 Gt entre 2006 e 2030 é inferior ao aumento das emissões de instalações de geração de energia elétrica da China nos últimos dois anos.

A média de emissões de CO<sub>2</sub> por MWh de eletricidade produzida no mundo deve cair ligeiramente, como resultado dos ganhos contínuos na eficiência térmica das usinas de geração elétrica e de uma maior utilização de energias renováveis (Figura 1.12). No entanto, essas economias não são suficientes para compensar o aumento da demanda de eletricidade.

A meta de 550 ppm de CO<sub>2</sub> também exigiria ações imediatas, substancialmente maiores do que no cenário de referência, a fim de desacelerar mais rápido o crescimento das emissões anuais. Para cumprir esse objetivo, as emissões de CO<sub>2</sub> atingiriam o pico e o declínio durante o período de projeção do *WEO2008*. A AIE e os participantes do IPCC enfatizam que os próximos anos são, portanto, de importância crucial. Qualquer atraso ampliará o risco de um aumento ainda maior de temperatura, o que poderia dar origem a uma mudança irreversível, ou demandar reduções de emissões ainda mais caras e a taxas mais rápidas no futuro próximo.

| Tabela 1.5 – Emissões de CO <sub>2</sub> por setor no Brasil (em milhões de toneladas de CO <sub>2</sub> ) |         |                     |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|------------------------------------|
|                                                                                                            | Em 2008 | Tendência para 2030 | Cenário de baixo carbono para 2030 |
| Energia                                                                                                    | 232     | 458                 | 297                                |
| Transporte                                                                                                 | 149     | 245                 | 174                                |
| Resíduos                                                                                                   | 62      | 99                  | 18                                 |
| Desmatamento                                                                                               | 536     | 533                 | 196                                |
| Pecuária                                                                                                   | 237     | 272                 | 249                                |
| Agricultura                                                                                                | 72      | 111                 | 89                                 |
| Emissões Brutas                                                                                            | 1.288   | 1.718               | 1.023                              |
| Emissões Totais (menos sequestro de carbono)                                                               | 1.259   | 1.697               | 810                                |

Fonte: Banco Mundial apud *Folha de São Paulo* (24 nov. 2009)<sup>26</sup>.

As Emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil

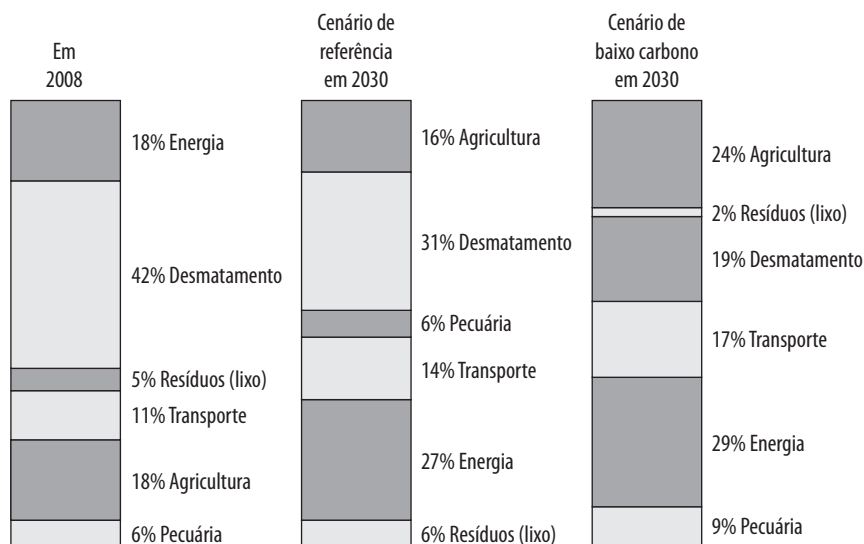
Diferente da situação da maioria dos países, o setor de energia do Brasil não é o principal emissor de CO<sub>2</sub>, conforme dados do Banco Mundial mostrados na Tabela 1.5 e Figura 1.13. É importante observar que o consumo de eletricidade no Brasil está projetado para um crescimento 176% no período 2005-2030<sup>27</sup>, enquanto o aumento das emissões brutas de CO<sub>2</sub> situa-se entre 28% a 97%, dependendo do cenário considerado, evidenciando uma matriz energética de baixo carbono,

1.3 A contribuição da opção nuclear para mitigar os efeitos ambientais

O *World Energy Outlook 2009 – Climate Change Excerpt* da AIE enfatiza a necessidade de alteração das políticas atuais de energia, sob pena de o planeta sofrer impactos severos, resultantes das alterações climáticas. A energia, que hoje responde por dois terços das emissões de gases de efeito estufa, é o cerne do problema – e assim deve formar o núcleo da solução. Na sua análise, a AIE foca no cenário denominado 450, cuja meta é a estabilização de longo prazo da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera em 450 partes por milhão de CO<sub>2</sub>

<sup>26</sup> *Folha de S. Paulo*, “Brasil inflou dados de CO<sub>2</sub> para 2020, sugere estudo”, 24 nov. 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u656701.shtml>>. Acesso em: 24 nov. 2009.

<sup>27</sup> Veja Seção 1.4.



**FIGURA 1.13 – Percentuais de Emissões nos Três Cenários.**

Fonte: Banco Mundial apud *Folha de São Paulo* (24 nov. 2009)<sup>28</sup>.

equivalente. Para isso, devem ser promovidas profundas alterações na forma de utilização de energia, de modo a proporcionar um futuro sustentável.

Na análise da AIE, a crise financeira e econômica que eclodiu em meados de 2008, completando 18 meses no momento em este texto está sendo escrito, teve um impacto considerável sobre o setor energético, com redução das emissões de CO<sub>2</sub>, o que abre uma janela de oportunidade para que a Convenção Estrutural das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) tenha condições de estabelecer acordos para colocação imediata de políticas adequadas para atingir a trajetória de emissões do cenário 450.

A AIE e o grupo executivo da UNFCC, que contribuiu na elaboração do *WEO2009*, reconhecem que a tarefa para atingir o cenário 450 é extremamente difícil, pois envolve forte coordenação política, além de investimentos adicionais. Entretanto, destacam que a maior parte desse esforço se baseia em medidas de eficiência energética, que

<sup>28</sup> *Folha de São Paulo*, “Brasil inflou dados de CO<sub>2</sub> para 2020, sugere estudo”, 24 nov. 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u656701.shtml>>. Acesso em: 24 nov. 2009.

oferecem substancial redução nos custos de energia, e na geração de energia elétrica de baixa emissão de carbono, que pode ter custos elevados de investimento inicial, mas que normalmente oferecem substancial redução de custo ao longo da sua operação em relação às tecnologias que demandam contínuos subsídios. Argumentam ainda que a reestruturação do sistema de energia vai gerar desenvolvimento econômico, segurança energética e benefícios à saúde humana e ao meio ambiente.

### **O Cenário de referência do WEO2009**

Na ausência de novas iniciativas para combater as alterações climáticas globais, a crescente utilização de combustíveis fósseis nesse cenário aumenta as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia de 29 Gt em 2007 para mais de 40 Gt em 2030, o que contribui para a deterioração da qualidade do ar e da saúde pública, além de acarretar graves efeitos ambientais. O aumento das emissões é devido ao aumento da utilização de combustíveis fósseis, em especial nos países em desenvolvimento, onde o consumo *per capita* de energia ainda tem muito para crescer. As emissões da OCDE são projetadas para aumentar pouco no período, em decorrência de um aumento mais lento da demanda de energia, das grandes melhorias na eficiência energética e de uma maior utilização de energia nuclear e energias renováveis. Esses efeitos são, em grande parte, decorrentes de políticas já adotadas para mitigar a mudança climática e do aumento da segurança energética. A análise da AIE indica que o cenário de referência – quando projetado para 2050 e além, e tendo em conta as emissões de gases de efeito estufa de todas as fontes – resultaria em uma concentração de gases de efeito estufa na atmosfera de cerca de 1.000 ppm, a longo prazo.

### **O Cenário 450**

O cenário 450 analisa medidas para forçar a redução das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia para uma trajetória que, combinada com as emissões fora do setor da energia, seja coerente com uma estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em 450 ppm. Nesse nível de concentração é esperado um aumento de 2 °C na temperatura global.

No longo prazo, a concentração de gases de efeito de estufa fixada em 450 ppm de CO<sub>2</sub> é menos da metade da concentração que ocorre no cenário de referência. Trata-se de uma trajetória de superação, ou seja, o pico de concentração de 510 ppm é atingido em 2035, permanecem constantes por cerca de 10 anos e, em seguida, declina para 450 ppm. A análise da AIE centra-se nas emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com energia para 2030, que atingem um pico pouco antes de 2020 em 30,9 Gt e entram em um declínio constante, atingindo posteriormente 26,4 Gt em 2030.

O cenário 450 também tem um olhar mais atento sobre o período até 2020, que é tão crucial para o processo de negociação do clima. Sem tentar prever um resultado ideal para as negociações, ele reflete um conjunto plausível de compromissos e políticas que possam surgir – uma combinação realista do sistema de *cap-and-trade*<sup>29</sup>, os acordos setoriais e políticas nacionais adaptadas a cada país e circunstâncias. O objetivo da AIE nessa modelagem não é prever os compromissos que os países venham a assumir, mas ilustrar como será a evolução das emissões no âmbito de um determinado conjunto de pressupostos consistentes com a meta global de estabilização.

### **O quadro político no cenário 450**

As reduções de emissões no cenário 450 só podem ser alcançadas tirando partido do potencial de mitigação em todas as regiões. Assim, todos os países são considerados para aplicarem medidas de mitigação, respeitando o princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas. Três grupos regionais são considerados:

- “OCDE+”, constituída de países da OCDE e dos países que são membros da União Europeia, mas não pertencem à OCDE.
- “Outras grandes economias” (OGE), com Brasil, China, Oriente Médio<sup>30</sup>, Rússia e África do Sul, que são os maiores emissores

<sup>29</sup> *Cap-and-Trade* é uma abordagem para controlar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), que combina o mercado com a regulamentação. Um limite global, denominado “CAP”, é definido por um período de tempo específico. Partes individuais recebem autorização para produzir uma quantidade de emissões. Aqueles com baixas emissões podem vender as licenças não utilizadas. Outros podem comprá-las para ajudar a satisfazer as suas quotas. (Fonte: Adaptado de WPP. Disponível em: <<http://www.wpp.com/wpp/about/howwebehave/corporateresponsibility/tacklingclimatechange/brochure/aclimatechangeglossary.htm>>. Acesso em: 20 set. 2009.)

<sup>30</sup> A região do Oriente Médio inclui os seguintes países: Bahrain, Irã, Iraque, Israel, Jordânia, Kuwait, Líbano, Omã, Catar, Arábia Saudita, Síria, Emirados Árabes e Iêmen.

fora da OCDE+ (com base no seu volume total de emissões de CO<sub>2</sub> associadas à energia em 2007) e cujo o PIB *per capita* deverá ultrapassar US\$ 13.000 em 2020.

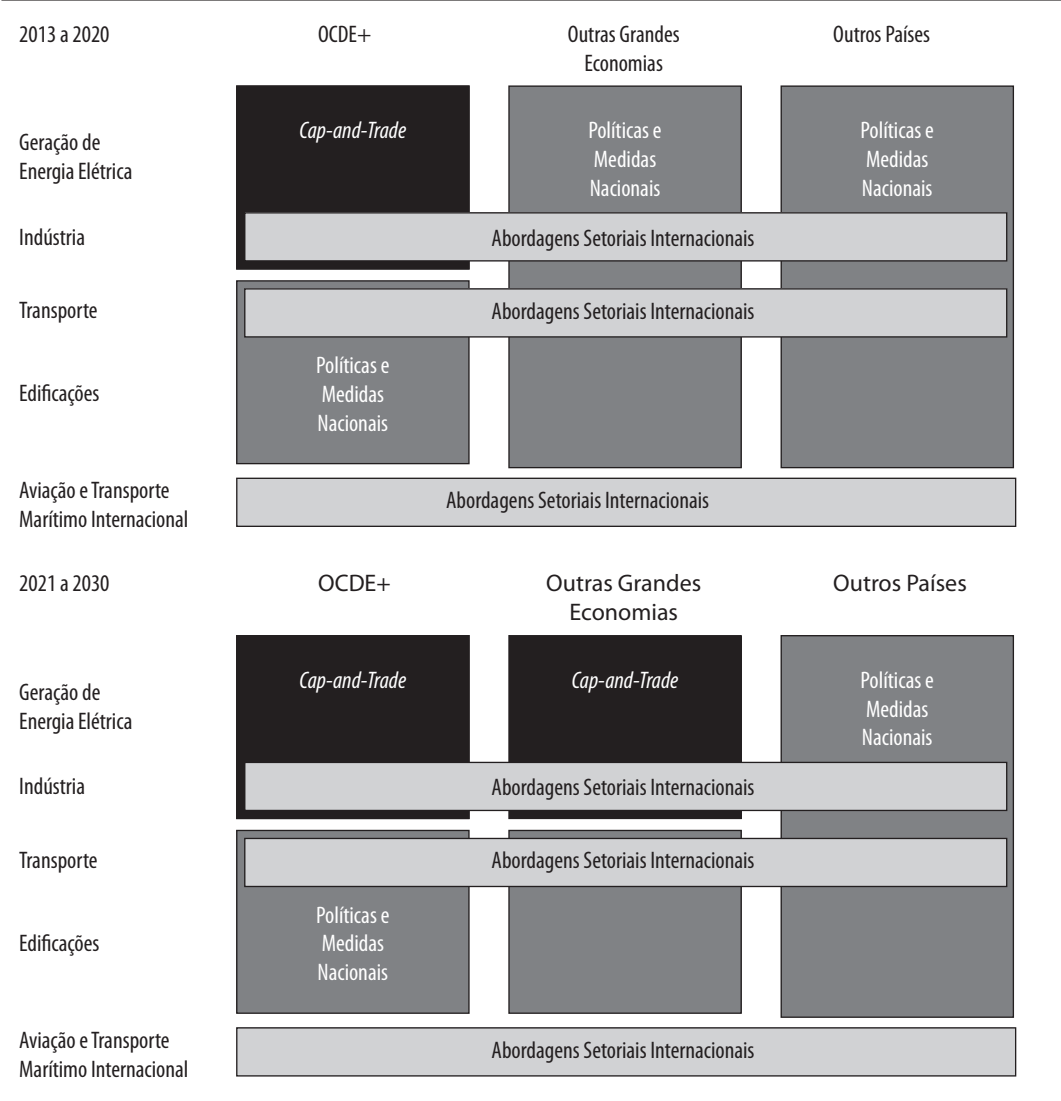
- “Outros países” (OC), com todos os demais.

Até 2020 a AIE pressupõe que os países da OCDE+ assumam compromissos nacionais e executem várias políticas de mitigação, incluindo um sistema de *cap-and-trade* para as emissões dos setores de geração de eletricidade e da indústria. Para os outros países, pressupõe-se que reduzam as suas emissões por meio de ações nacionais apropriadas de mitigação, com apoio técnico e financeiro internacional (Figura 1.14). Todas as regiões deverão participar de acordos setoriais nas áreas de cimento, ferro e aço, veículos de passageiros, aviação e navegação, para os quais sejam estabelecidas metas de intensidade de emissões. Após 2020, a AIE pressupõe que outras grandes economias façam parte do sistema da *cap-and-trade* na geração de eletricidade e na indústria.

### **Principais resultados do Cenário 450**

Todos os países alcançam níveis significativos de redução em relação ao cenário de referência. As emissões OCDE+ declinam numa taxa constante, passando de 13,1 Gt em 2007 para 7,7 Gt em 2030. As emissões das outras grandes economias atingem o pico de 12,6 Gt em 2020 e, em seguida, declinam para 11,1 Gt em 2030, ainda 14% acima dos níveis de 2007. As emissões dos outros países aumentam de forma constante. A maior parte das reduções de emissões em relação ao cenário de referência é alcançada por meio de medidas de eficiência energética. Reduções significativas também vêm de mudanças no mix de tecnologias de geração de eletricidade.

Como mencionado aqui, pressupõe-se a aplicação do sistema de *cap-and-trade* para os setores de geração de energia elétrica e para a indústria na OCDE+ a partir de 2013 e para as outras grandes economias a partir de 2021. A AIE considera que o CO<sub>2</sub> é comercializado, de início, em dois mercados distintos: o da OCDE+ e o das outras grandes economias. Para conter as emissões nos níveis requeridos, a AIE estima que o preço de CO<sub>2</sub> atingirá US\$ 50 por tonelada na OCDE+ em 2020; esse valor sobe para US\$ 110 na OCDE+ e para US\$ 65 por tonelada em outras grandes economias em 2030. Os preços são fixados pela opção



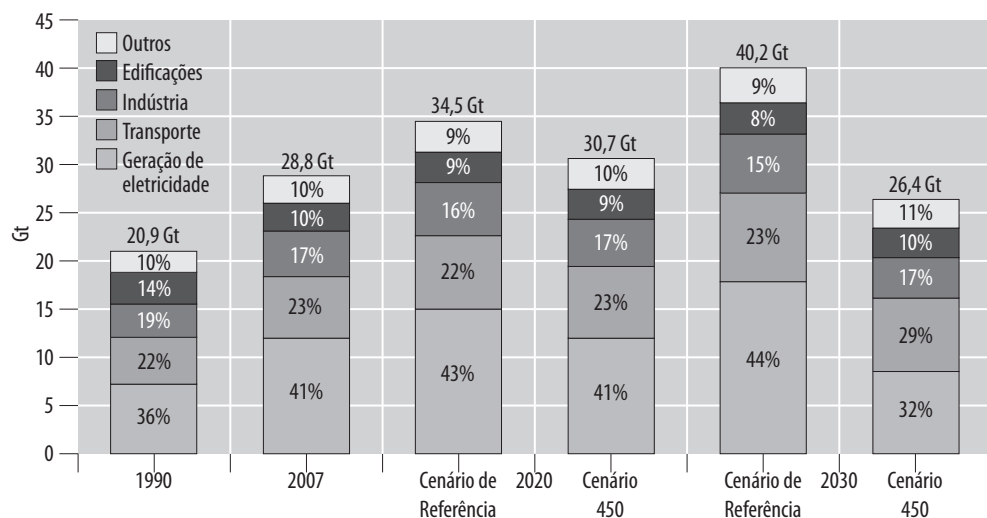
**FIGURA 1.14** – Quadro de ação no cenário 450.

Fonte: Adaptado de *WEO2009*<sup>31</sup>.

de redução mais cara (por exemplo, a captura e armazenagem de CO<sub>2</sub> no setor da OCDE+ em 2030).

O *WEO2009* estima que a implementação das medidas consideradas no cenário 450 vai aumentar os investimentos acumulados relacionados

<sup>31</sup> Agência Internacional de Energia (AIE), *World Energy Outlook 2009 – Climate Change Excerpt*, Paris, 2009. Disponível em: <[http://www.iea.org/weo/2009\\_excerpt.asp](http://www.iea.org/weo/2009_excerpt.asp)>. Acesso em: 5 nov. 2009.



**FIGURA 1.15** – Emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia.

Fonte: Adaptado do *WEO2009*<sup>32</sup>.

com energia<sup>33</sup> ao longo do período 2010-2030 em 10,5 trilhões de dólares. O maior aumento é no setor de transportes, em que a maior parte dos 4,7 trilhões de dólares adicionais cobre o custo maior da aquisição de veículos mais eficientes, porém mais caros. O investimento adicional em edificações, incluindo aparelhos e equipamentos, atinge o montante de 2,5 trilhões de dólares. Um investimento extra de 1,7 trilhão de dólares é necessário para o setor de geração de energia elétrica. O investimento na indústria sobe em 1,1 trilhão de dólares, sobretudo para os processos e motores elétricos mais eficientes. Instalações para a produção de biocombustíveis exigirão um investimento adicional de 0,4 trilhão de dólares. Os investimentos em eficiência energética nos setores de edificações, da indústria e dos transportes são recuperados por meio de economias nos custos de energia.

Mais de três quartos do investimento adicional (8,1 trilhões de dólares) são necessários na última década, porque a maioria das reduções de emissões de CO<sub>2</sub> ocorre após 2020 (emissões globais de CO<sub>2</sub> são

<sup>32</sup> Agência Internacional de Energia (AIE), *World Energy Outlook 2009 – Climate Change Excerpt*, Paris, 2009. Disponível em: <[http://www.iea.org/weo/2009\\_excerpt.asp](http://www.iea.org/weo/2009_excerpt.asp)>. Acesso em: 5 nov. 2009.

<sup>33</sup> Todos os valores monetários estão expressos em dólares americanos de 2008.

reduzidas em 3,8 Gt em 2020 e em 13,8 Gt em 2030, em relação ao cenário de referência). Cerca de 48% do investimento adicional é necessário nos países da OCDE+. Nas outras grandes economias e nos outros países são necessários 30% e 18% do investimento adicional, respectivamente. O resto é necessário para o setor de aviação internacional.

A AIE destaca, na sua análise do cenário 450, que a distribuição geográfica e setorial das despesas de redução de emissões e investimentos não equaciona como essas ações serão financiadas. Esse é um assunto para negociação na UNFCCC, visto que membros dessa convenção concordam que os países desenvolvidos devem prestar apoio financeiro aos países em desenvolvimento, mas a determinação do nível exato não está estabelecida.

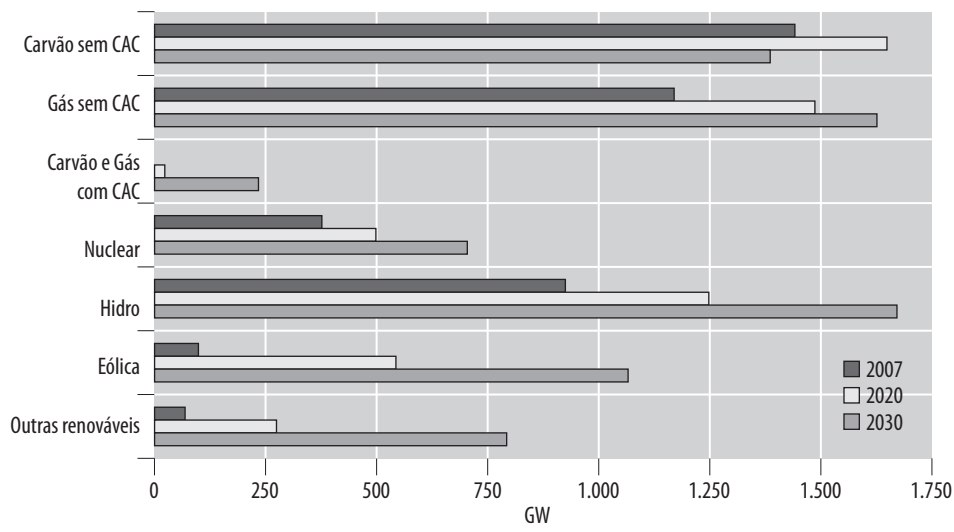
No tocante à geração elétrica, as avaliações da AIE indicam a necessidade de redução da intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> em 21% em relação ao ano de 2007. A AIE e a UNFCCC recomendam acelerar a implantação de tecnologias de baixo carbono, que representam mais de 5 Gt de redução de emissões de CO<sub>2</sub> em relação ao cenário de referência para 2030 (Figura 1.16). Isso inclui uma implantação muito mais rápida das energias renováveis e da energia nuclear e um investimento urgente no desenvolvimento da captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

Com relação à geração de energia elétrica de fonte nuclear, existe o consenso quanto à necessidade da contribuição dessa tecnologia para fazer frente aos desafios da redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Entretanto, o grau de participação, e consequentemente as projeções, divergem bastante, dependendo do organismo que as elabora. A cada ano, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) atualiza as suas projeções para cenários de crescimento global baixo e alto da energia nuclear. Em 2008, tanto as projeções de alta como as de baixa foram revistas para cima. Na projeção atualizada de um cenário de baixa, a demanda mundial de energia nuclear chega a 473 GWe em 2030, em comparação com uma capacidade de 372 GWe no final de 2008. Na projeção atualizada de um cenário de demanda alta, a capacidade instalada atinge 748 GWe.

A Agência Internacional de Energia, por sua vez, também revisou sua projeção para um cenário considerado de referência para a energia nuclear em 2030, incorporando uma alta de cerca de 5%<sup>36</sup>. No entanto,

---

<sup>36</sup> OCDE International Energy Agency, *World Energy Outlook 2008*, OCDE, Paris (2008).



**FIGURA 1.16 – A capacidade mundial de geração de energia elétrica no cenário 450.**

Fonte: Adaptado do *WEO2009*<sup>34, 35</sup>.

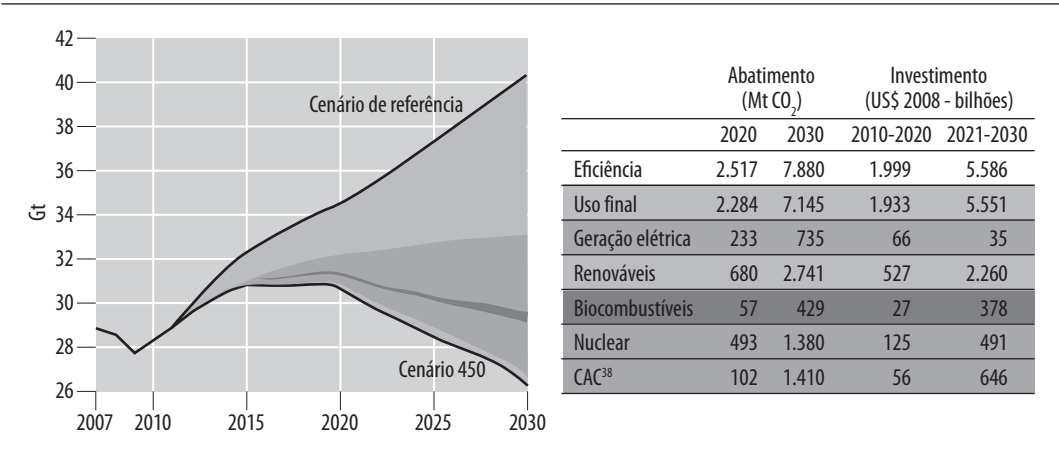
o cenário de referência da AIE, que considera uma capacidade nuclear instalada de 433 GWe em 2030, ainda está abaixo da projeção da AIEA para um cenário de baixo crescimento. A AIE também publicou dois cenários de política climática: o cenário de política 550, que corresponde a uma estabilização dos gases de efeito estufa na atmosfera, no longo prazo, numa concentração de 550 partes por milhão de CO<sub>2</sub>e e a um aumento da temperatura global de cerca de 3 °C; e um outro cenário, o da política 450, que equivale a um aumento de cerca de 2 °C. Para a AIE, no cenário da política climática 550, a capacidade nuclear instalada em 2030 é de 533 GWe. No cenário da política climática 450, a capacidade nuclear instalada atinge 680 GWe.

Já a Agência de Energia Nuclear (OCDE/NEA) publicou suas projeções no Nuclear Energy Outlook de 2008, que também inclui projeções de baixa e alta para a capacidade nuclear instalada em 2050<sup>37</sup>. Para 2030, o intervalo projetado está entre 404 a 625 GWe, um pouco abaixo

<sup>34</sup> Agência Internacional de Energia (AIE), *World Energy Outlook 2009 – Climate Change Excerpt*, Paris, 2009. Disponível em: <[http://www.iea.org/weo/2009\\_excerpt.asp](http://www.iea.org/weo/2009_excerpt.asp)>. Acesso em: 5 nov. 2009.

<sup>35</sup> CAC – Captura e Armazenamento de Carbono.

<sup>37</sup> OCDE International Energy Agency, *World Energy Outlook 2008*, OCDE, Paris (2008).



**FIGURA 1.17** – Redução da emissão de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia.  
Fonte: Adaptado do *WEO2009*<sup>39</sup>.

do da AIEA. Para 2050, o intervalo projetado é de 580 a 1400 GWe. O US Energy Information Administration também reviu a sua projeção de referência para a energia nuclear em 2030 ligeiramente acima de 498 GWe<sup>40</sup>. É assim ligeiramente superior à projeção abaixo da AIEA.

As projeções da AIE, referentes ao cenário 450 do *WEO2009 – Climate Change Excerpt* incorporam o impacto da crise financeira. Já as projeções das outras organizações foram feitas antes da eclosão da crise financeira de 2008.

Como pode ser verificado na Figura 1.17, nesta última versão do *WEO2009*, o aumento na capacidade nuclear instalada proposta para o cenário 450 contribui com aproximadamente 7% no abatimento total das emissões de gases de efeito estufa em 2030.

<sup>38</sup> CAC – Captura e Armazenamento de Carbono.

<sup>39</sup> Agência Internacional de Energia (AIE), *World Energy Outlook 2009 – Climate Change Excerpt*, Paris, 2009. Disponível em: <[http://www.iea.org/weo/2009\\_excerpt.asp](http://www.iea.org/weo/2009_excerpt.asp)>. Acesso em: 5 nov. 2009.

<sup>40</sup> Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2008*. Us Department of Energy, Washington, DC (2008).

| Tabela 1.6 – Capacidade elétrica instalada do sistema brasileiro |        |          |
|------------------------------------------------------------------|--------|----------|
| Fonte                                                            | MWe    | Part (%) |
| Hidrelétrica*                                                    | 81.190 | 85,5     |
| Gás                                                              | 8.694  | 9,2      |
| Nuclear                                                          | 2.007  | 2,1      |
| Óleo combustível                                                 | 1.234  | 1,3      |
| Carvão mineral                                                   | 1.410  | 1,5      |
| Outras                                                           | 462    | 0,5      |
| Potência instalada                                               | 94.996 | 100,0    |

\* Incluindo a capacidade total de Itaipu.  
Fonte: ONS, Operação do SIN: Dados Relevantes 2007.

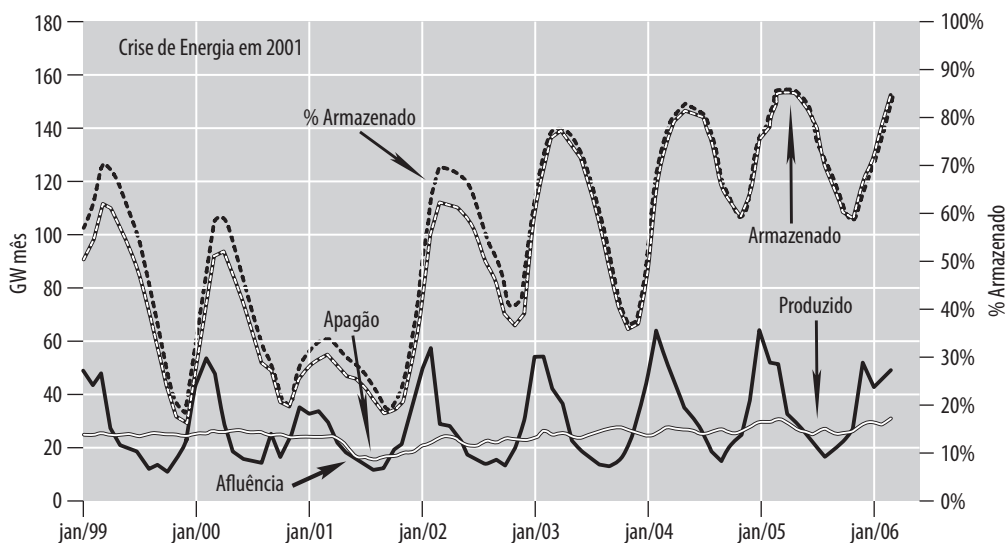
### 1.4 O papel da geração nuclear na matriz elétrica brasileira

A capacidade instalada da matriz elétrica brasileira é composta de cerca de 85% de origem hidrelétrica e 15% de origem termelétrica (Tabela 1.6). Essa característica confere uma grande vantagem competitiva ao País, por dispor de uma das maiores reservas de energia elétrica limpa, renovável, barata e economicamente viável do mundo.

Entretanto, a falta de energia no ano de 2001 indicou claramente a vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro, que é baseado na energia natural afluyente nos rios e na água acumulada nas barragens das usinas hidrelétricas. Essa é uma fonte de energia renovável com uma vantagem indiscutível, mas que inclui também o risco hídrico: depender, para sua renovação, dos ciclos naturais, que apresentam sucessões entre estações secas e chuvosas, com razoável variabilidade dentro de uma mesma região e entre diferentes regiões (Figura 1.18).

Conjugado ao risco hídrico, a demanda por um maior crescimento econômico renovou o interesse por projetos de geração de energia no Brasil. As opções sob consideração incluem a expansão da exploração do gás natural, da biomassa, da geração de hidreletricidade – em especial na Amazônia, onde se encontra a maior parte dos aproveitamentos disponíveis – e das usinas nucleares.

Com relação à fronteira de expansão da geração hidrelétrica, deve-se considerar que as condições topográficas da Amazônia são bastante diferentes da região Sudeste, onde estão as grandes represas para a geração hidrelétrica e onde está concentrada a capacidade principal de reserva-



**FIGURA 1.18** – Operação do sistema SE/CO - 2001 (parte hidráulica).

Fonte: ONS.

ção de água. Na região Sudeste, em especial no litoral entre Santos e Rio de Janeiro, há um desnível abrupto de 700 a 800 metros entre o mar e o planalto. Essa característica topográfica possibilitou a construção das usinas Henry Borden e Ribeirão das Lages, que deram ensejo à industrialização de São Paulo e Rio de Janeiro no início do século XX. Em 1905, Ribeirão das Lages era a maior hidrelétrica do mundo.

Os desníveis significativos entre o Planalto Central e a Planície Platina e o litoral do Nordeste permitiram também os significativos aproveitamentos da Bacia dos Rios Paraná e São Francisco. Os grandes reservatórios de água foram construídos usando esses desníveis, reduzindo o risco hídrico com a estabilização da energia natural afluyente dos rios pela gestão da água neles armazenada (Figura 1.19).

O desnível topográfico entre o Planalto Central e a Planície Amazônica é, entretanto, muito menos acentuado que os anteriores. Com isso, para haver um significativo volume de água armazenado nas barragens, seria necessário alagar vastas áreas. Esse fato conjugado com os ciclos naturais (secos e chuvosos) mais severos que ocorrem na região (vide relações máximo/mínimo na energia natural afluyente, mostradas na Figura 1.20) tendem a ampliar o risco hídrico associado aos aproveitamentos na região.

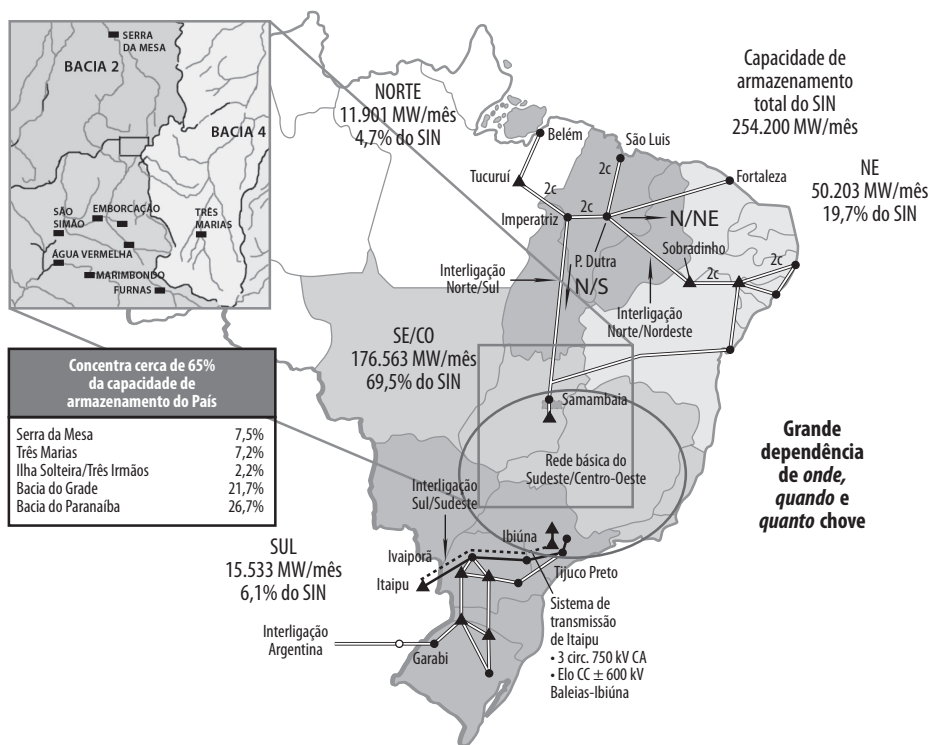


FIGURA 1.19 – Arquitetura atual do Sistema Interligado Nacional (SIN).  
Fonte: ONS.

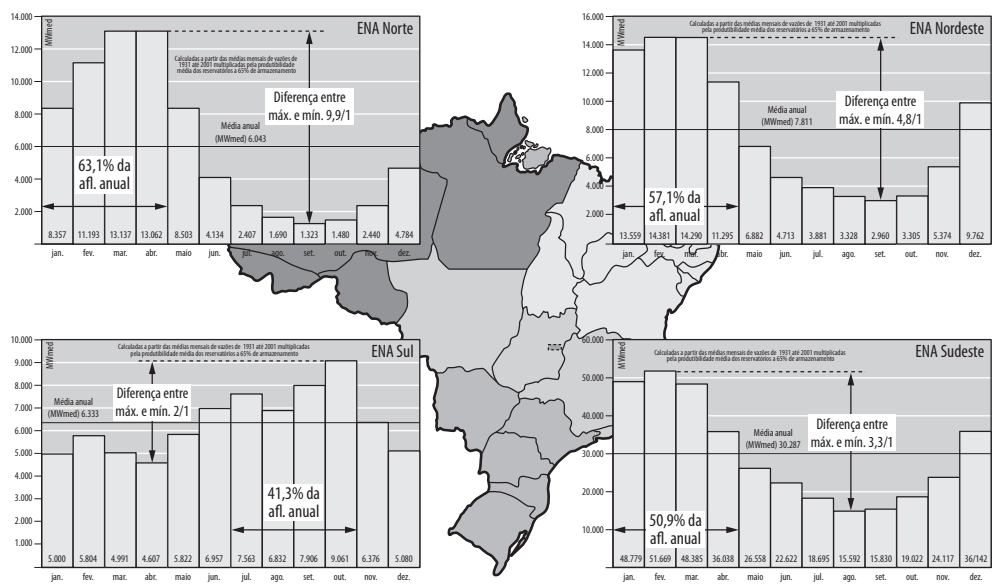
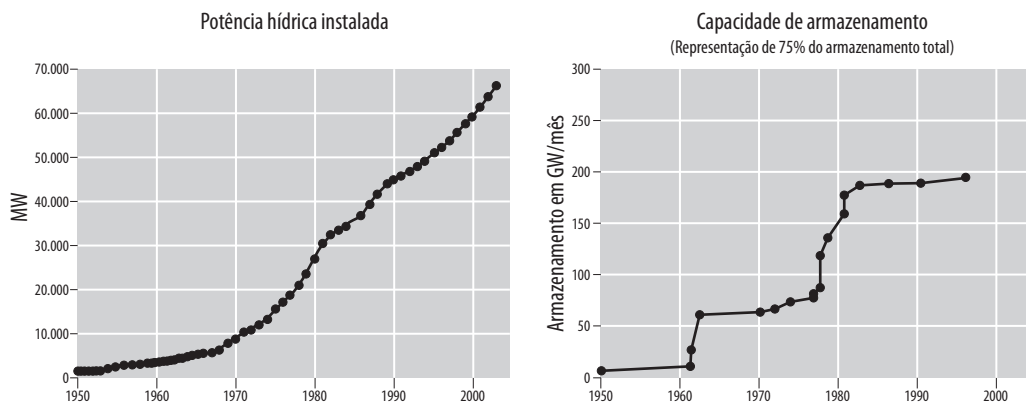
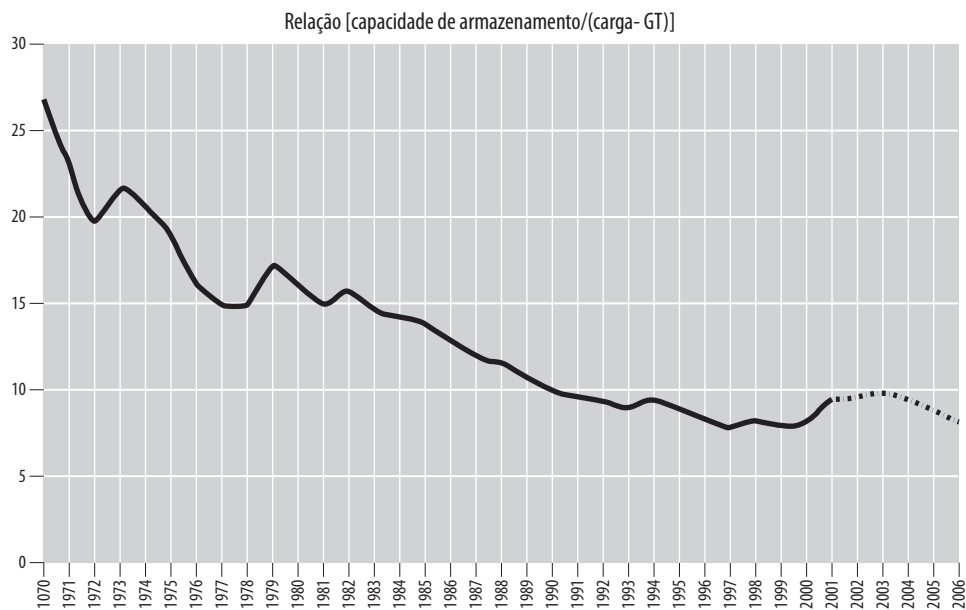


FIGURA 1.20 – Energia natural afluyente nas regiões brasileiras.  
Fonte: ONS.

**FIGURA 1.21** – Evolução da capacidade instalada e reservação.

Fonte: Lista da ONS dos principais reservatórios.

**FIGURA 1.22** – Capacidade de armazenamento e carga total do sistema.

Fonte: ONS.

Uma evidência desse fato é a avaliação da evolução da capacidade hidrelétrica instalada e da capacidade de reservação de água, conforme mostrado na Figura 1.21.

O risco hídrico pode ser caracterizado pela relação entre a capacidade de armazenamento das barragens e a carga total do sistema, excluída a geração elétrica de origem térmica disponível, conforme Figura 1.22.

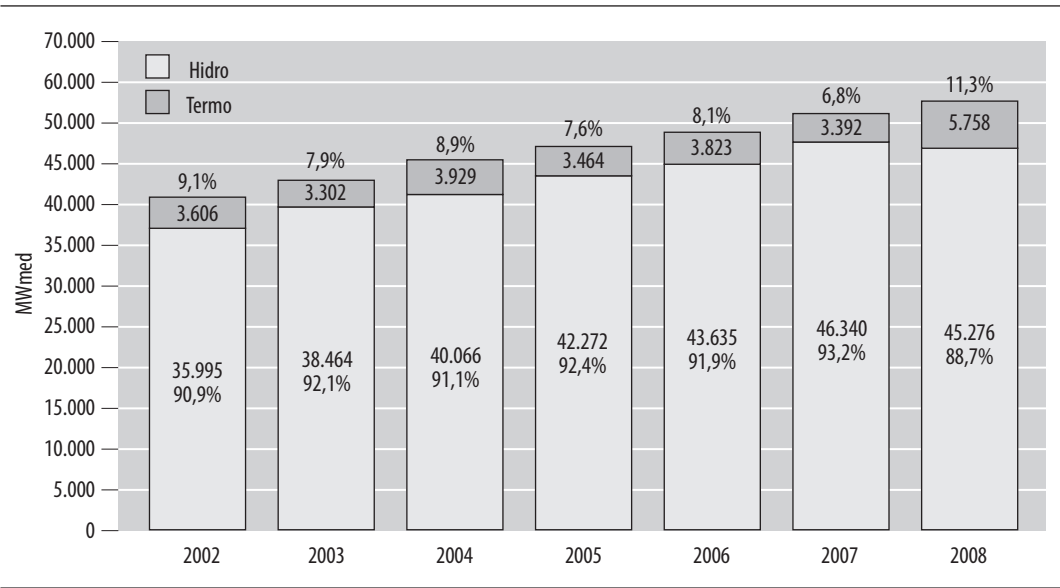


FIGURA 1.23 – Evolução da geração líquida de eletricidade.

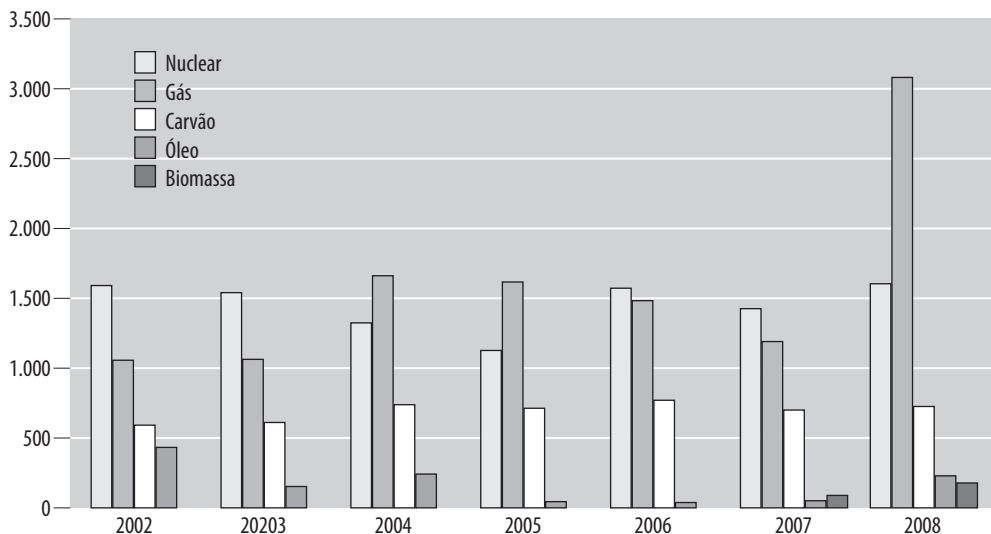
Note-se que esse indicador tem uma nítida tendência de queda que tende a se agravar com a ampliação dos aproveitamentos hidrelétricos na Região Amazônica.

No ano de 2005, foram gerados 45.726 MW médios (400 TWh) de energia elétrica líquida no Sistema Interligado Brasileiro e 51.034 MW médios (447 TWh) em 2008, correspondendo a uma taxa de crescimento acima de 4% ao ano no período<sup>41</sup>, conforme Figura 1.23.

A fonte hídrica respondeu em média por 90% da geração líquida de eletricidade no período. A complementação térmica, que tem variado entre 7% e 12% da carga, é feita pelas fontes apresentadas na Figura 1.24, a seguir, com preponderância da geração nuclear e a gás natural, mas com crescente contribuição da biomassa moderna.

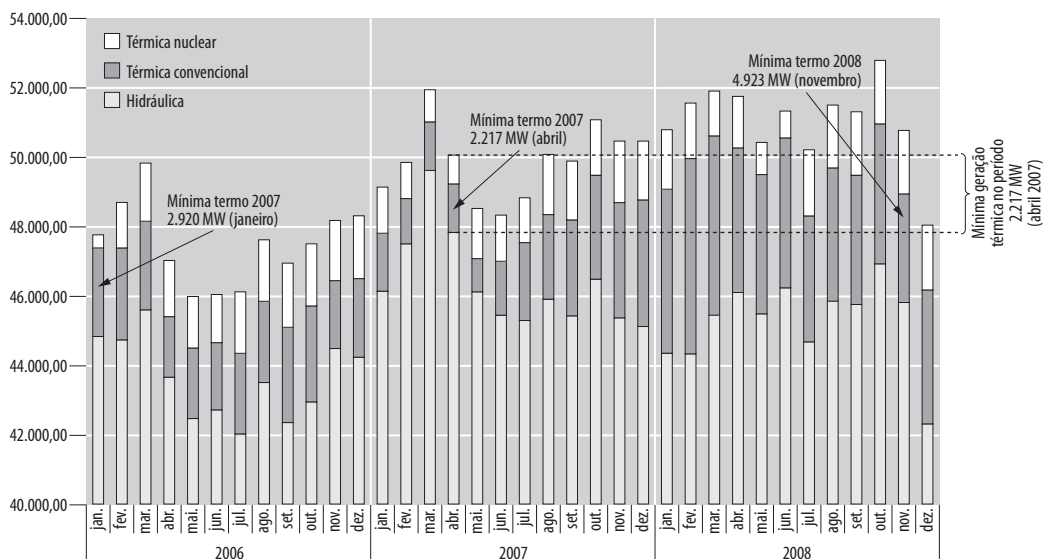
A constância dessa demanda por complementação térmica é demonstrada pela Figura 1.25, que detalha a geração mês a mês. Este gráfico mostra que a mínima geração térmica chegou a cerca de 2.200 MW médios no período 2006-2008. Note-se que Angra 1 e Angra 2 têm uma potência instalada de 2.000 MW, o que corresponde a uma geração líquida de cerca de 1.500 MW médios. Com a entrada em

<sup>41</sup> Empresa de Pesquisa Energética (EPE/MME), *Balanco Energético Nacional 2009 – Ano Base 2008*: resultados preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009. 48p.



**FIGURA 1.24 – Evolução da geração líquida de eletricidade por fonte.**

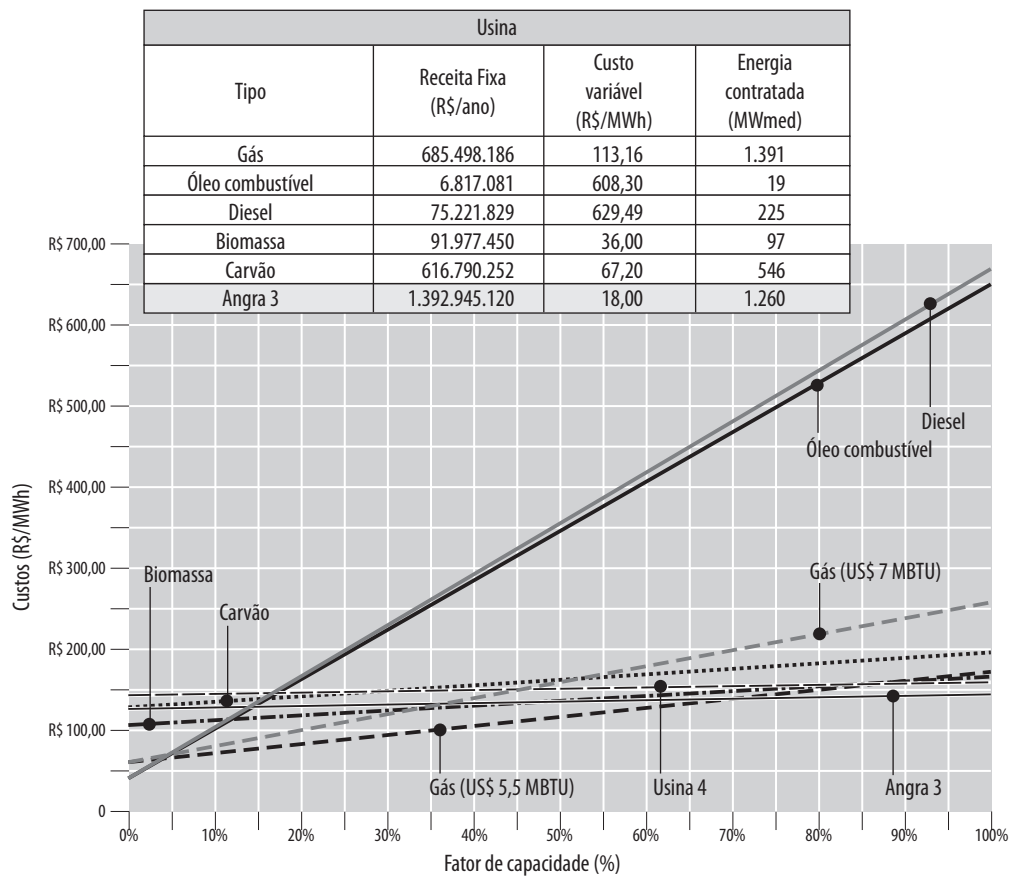
Fonte: Dados dos Relatórios Anuais do NOS.



**FIGURA 1.25 – Demanda térmica.**

Fonte: Dados dos Relatórios Anuais do NOS.

operação de Angra 3, essa geração líquida será ampliada para mais de 2.500 MW médios. O sistema interligado nacional requer, portanto, uma base térmica complementar à hídrica. Para esse papel, a geração nuclear é inquestionavelmente a opção mais competitiva, como mostra a Figura 1.26.



**FIGURA 1.26 – Competitividade da fonte nuclear.**  
Fonte: Dados da EPE e ANEEL, resultado do leilão de energia nova-5 e da Eletronuclear (dados de Angra 3 e Usina 4, base 2005).

Note-se ainda que as perdas do sistema elétrico brasileiro atingiram cerca de 15% da produção bruta de eletricidade, em grande parte em decorrência da dimensão continental da rede de transmissão.

O Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2008)<sup>42</sup>, editado em 2007 pela Empresa de Pesquisa Energética, coloca a projeção de demanda em patamar ainda mais elevado. Prevê um consumo de 1.139 bilhões de kWh em 2030, ou seja, um crescimento de 176% no período 2005-2030. Essa demanda deverá ser atendida com um acréscimo de cerca de 130% na capacidade hidráulica instalada, 135% de acréscimo na

<sup>42</sup> Empresa de Pesquisa Energética (EPE/MME), *Plano Nacional de Energia 2030*, Rio de Janeiro, EPE, 2007, 408 p. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080111\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf)>. Acesso em: 5 set. 2009.

| Tabela 1.7 – Cenários do Plano Nacional de Energia 2030 |            |             |                 |         |                     |        |          |       |
|---------------------------------------------------------|------------|-------------|-----------------|---------|---------------------|--------|----------|-------|
|                                                         | Hidráulica | Gás natural | Eólica e outros | Nuclear | Biomassa e resíduos | Carvão | Petróleo | Total |
| SIN (jan/2006)                                          | 75,6       | 8,1         | 1,6             | 2,0     | 0,1                 | 1,4    | 2,9      | 91,6  |
| Cenário 1                                               | 167,8      | 20,6        | 9,1             | 7,3     | 6,5                 | 5,9    | 3,3      | 220,5 |
| Cenário 2                                               | 168,8      | 18,1        | 8,0             | 7,3     | 6,5                 | 6,5    | 3,3      | 218,5 |
| Cenário 3                                               | 168,2      | 24,1        | 9,1             | 9,3     | 6,5                 | 6,5    | 3,3      | 227,0 |
| Cenário 4                                               | 168,7      | 21,6        | 9,1             | 11,3    | 6,5                 | 6,5    | 3,3      | 227,0 |
| Cenário 5                                               | 243,3      | 28,1        | 9,1             | 9,3     | 6,5                 | 6,5    | 3,3      | 306,1 |

Fonte: Plano Nacional de Energia PNE 2030.

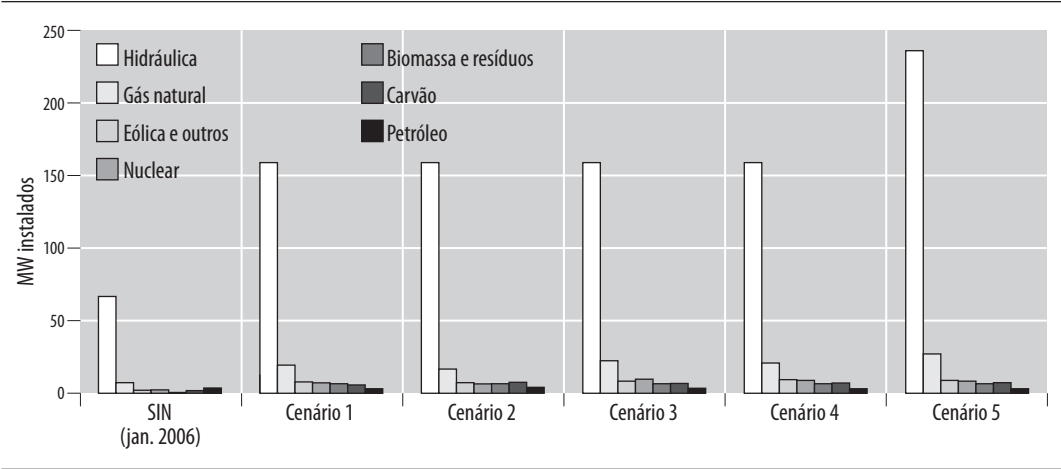


FIGURA 1.27 – Cenários do Plano Nacional de Energia 2030.

Fonte: Plano Nacional de Energia PNE 2030.

capacidade termelétrica instalada – na qual a nuclear está inserida – e cerca de 1.300% de acréscimo na capacidade instalada de fontes alternativas. Nesse cenário, para que exista uma oferta adequada de energia no País, não é possível prescindir de qualquer fonte de energia, inclusive a nuclear, cujo crescimento de capacidade instalada deverá ser de cerca de 235%, passando de 2.000 MWe em 2005 para 7.300 MWe em 2030.

A distribuição demográfica brasileira, com 80% da população vivendo em áreas urbanas, é outro fator-chave a ser contabilizado no planejamento energético. A distribuição demográfica está concentrada em uma faixa de 1.000 km ao longo da costa, e as projeções para o

desenvolvimento brasileiro indicam um aumento no consumo *per capita* de eletricidade de 2.020 kWh para 4.380 kWh. Fontes distribuídas de geração elétrica, como a eólica, solar e de biomassa, não podem atender sozinhas a tal aumento de demanda de forma concentrada como ocorre nas áreas urbanas. Mesmo com o aumento extraordinário dessas fontes, tal como previsto no PNE 2030, grandes blocos de energia concentrada, como das usinas hidrelétricas e termelétricas, ainda serão necessários. Deve ser criado um mix composto de blocos de geração de eletricidade concentrados e distribuídos para responder aos grandes desafios do crescimento da procura por eletricidade. Além dos aspectos mencionados de reservação na região norte, concorre a necessidade de promoção da exploração sustentável, que inclui o respeito às áreas de preservação permanente e às reservas legais da Amazônia, que deve obrigatoriamente fazer parte da agenda de energia referente a essa região.

Portanto, para conferir confiabilidade ao sistema elétrico brasileiro, é vital contar com um portfólio diversificado de fontes de energia. A fonte nuclear é certamente uma das opções para compor esse portfólio, uma vez que as centrais de Angra 1 e 2 tiveram um papel-chave para suportar a demanda de eletricidade e para mitigar o impacto da falta da energia em 2001. Ambas as centrais operaram continuamente, a plena carga e ao longo de todo o período do chamado “apagão”. A energia gerada por essas duas usinas equivale hoje a cerca da metade do consumo elétrico do estado do Rio de Janeiro. Com a entrada em operação de Angra 3, a energia dessa central nuclear passará a representar cerca de 80%.

O Brasil possui disponibilidade e tecnologia em quase todas as fontes primárias de geração de energia elétrica, além de uma matriz que apresenta reduzidos níveis de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Considerando as preocupações atuais do cenário global de mudanças climáticas, quanto ao potencial de comercialização de créditos de carbono e quanto à segurança energética, o Brasil não tem dificuldade para estabelecer um planejamento adequado para obter um balanço ideal para uma matriz hidrotérmica. As reservas brasileiras de urânio estão discutidas no Capítulo 2.

A energia nuclear apresenta uma complementaridade estratégica em relação à geração hidrelétrica, por ser sempre despachada na base.

|                                         | 2007-2015           | 2016-2020               | 2021-2025                      | 2026-2030                      | 2016-2030 |
|-----------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| Referência<br>Cenário 1<br>Cenário 2    | 1.360 MW<br>Angra 3 | 1.000 MW<br>NE 1        | 1.000 MW<br>NE 2               | 2.000 MW<br>SE 1 + SE 2        | 4.000 MW  |
| Intermediário<br>Cenário 3<br>Cenário 5 | 1.360 MW<br>Angra 3 | 1.000 MW<br>NE 1        | 1.000 MW<br>NE 1 + NE 2        | 2.000 MW<br>SE 1 + SE 2 + NE 3 | 6.000 MW  |
| Alto<br>Cenário 4                       | 1.360 MW<br>Angra 3 | 2.000 MW<br>NE 1 + NE 2 | 3.000 MW<br>SE 1 + SE 2 + NE 3 | 3.000 MW<br>SE 3 + SE 4 + NE 4 | 8.000 MW  |

FIGURA 1.28 – Cenários do Plano Nacional de Energia 2030 – energia nuclear.

Reforça a característica de baixa emissão de gases de efeito estufa da matriz elétrica brasileira e promove o arraste tecnológico, por meio do estímulo ao desenvolvimento industrial e tecnológico do País, fortalecendo setores especializados no fornecimento de equipamentos, combustível e instalações com alto conteúdo tecnológico.

É importante observar que a motivação brasileira para a adoção da opção nuclear é distinta da maioria dos países, que em grande parte não possuem reservas próprias de recursos energéticos e têm suas matrizes de energia elétrica centradas no carvão, no petróleo e nos seus derivados. Esses aspectos colocam tais países expostos a problemas de segurança energética, traduzidos no dispêndio de recursos para importação de combustíveis fósseis, na volatilidade do preço dessas *commodities* no mercado internacional e no risco de interrupção em caso de conflitos. Outra dificuldade está associada ao cumprimento das metas de redução de emissões ligadas a acordos internacionais, cuja tendência parece inexorável, tendo em vista as consequências das alterações climáticas previstas caso nenhuma atitude venha a ser tomada.

O planejamento oficial no Brasil<sup>43</sup> prevê um crescimento da geração nuclear de 4 Gwe para 8 GWe em 2030, incluindo a construção de novas centrais nucleares de 1 GWe após a conclusão da usina nuclear de Angra 3. A contribuição da geração nuclear no consumo de eletricidade deverá evoluir a partir dos atuais 2,6% para valores acima de 5% em 2030.

<sup>43</sup> Empresa de Pesquisa Energética (EPE/MME), *Plano Nacional de Energia 2030*. Rio de Janeiro: EPE, 2007, 408 p. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080111\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf)>. Acesso em: 5 set. 2009.

