

NO.6 . NOV 2005. Versão em língua portuguesa, a partir da Versão em inglês [Boell - atom mythen_matthes.pdf, 14 dez 2005]

Energia Nuclear e Mudança Climática
Nuclear Issues Paper No. 6

FELIX CHR. MATTHES

Índice

| | |
|----|--|
| 1 | Prefácio |
| 4 | Introdução |
| 6 | O desafio da mudança climática |
| 10 | Se o modelo não mudar (“Business as usual”) |
| 16 | A gestão de estruturas de risco complexas |
| 21 | Opções para a mitigação |
| 40 | Estratégias chaves: um estudo de caso sobre a Alemanha |
| 44 | Conclusões |
| 45 | Referências |

O Autor:

O Dr. Felix Chr. Matthes se formou em engenharia elétrica (Diplom-Ingenieur) e em ciência política (Dr.rer.pol.). Após trabalhar na indústria durante alguns anos, ele trabalha desde 1991 em Berlim com a Öko-Institut (Instituto para a Ecologia Aplicada), cuja sede fica em Freiburg. Publicou vários estudos sobre políticas energéticas e climáticas em nível nacional e internacional, além de prestar consultorias sobre políticas públicas na Alemanha e na EU. De 2000 até 2002, foi Membro Científico da Comissão de Estudos “Energia Sustentável no Contexto da Globalização e da Liberalização”, no Parlamento Federal Alemão.

Nuclear Issues Papers, No. 6
Energia Nuclear e Mudança Climática
por Felix Chr. Matthes
© Fundação Heinrich Böll 2005
Todos os direitos reservados

O seguinte texto não representa necessariamente os pontos de vista da Fundação Heinrich Böll.

Publicado pelo Escritório Regional da Fundação Heinrich Böll para a África Austral, em cooperação com a sede da Fundação Heinrich Böll.

Contato:
Heinrich Böll Foundation Regional Office for Southern Africa, PO Box 2472; Saxonwold, 2132; África do Sul. Telefone: +27-11-447 8500. Fax: +27-11-447 4418. e-mail: info@boell.org.za

Heinrich Böll Stiftung, Rosenthaler Str. 40/41, 10178 Berlin, Alemanha.
Tel.: ++49 30 285 340; Fax: ++49 30 285 34 109; info@boell.de; www.boell.de/nuclear

Prefácio

A mudança climática é sem dúvida um dos maiores desafios do Século XXI. Apesar de sinais positivos como a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto e o bom funcionamento do Sistema Europeu para a Troca de Emissões, ainda falta muito para a resposta da humanidade chegar à altura da tarefa.

Grandes desafios exigem o **concerto** de grandes esforços. Será, no entanto, que eles também exigem tecnologias grandes, caras e arriscadas desenvolvidas há mais de meio século? Ou seja, responder à mudança climática exige que reconsideremos a energia nuclear?

Felix Matthes demonstra convincentemente neste estudo que existe toda uma gama de opções de baixo risco disponíveis para lutar contra a mudança climática. Investir na energia nuclear envolve mais do que riscos sanitários, financeiros e de segurança, já que também pode acabar sendo uma camisa-de-força e um beco-sem-saída. Vinte anos depois do desastre nuclear de Tchernobil, deve ser rejeitada qualquer tentativa da indústria nuclear no sentido de se ressuscitar, pintada de solução para a mudança climática. As autoridades no mundo inteiro devem ouvir a opinião pública, que majoritariamente resiste ao uso da energia nuclear.

Estamos convencidos que a energia nuclear não é resposta para a mudança climática. Um renascimento míope da energia nuclear exigiria imensos investimentos públicos, que seriam mais bem investidos no desenvolvimento e emprego de tecnologias para energias renováveis e de medidas para maior eficiência energética.

Por isso, apresentamos este 6º Estudo sobre Questões Nucleares (6th Nuclear Issues Paper) como contribuição para o debate público sobre respostas apropriadas à mudança climática e sobre o futuro da energia nuclear.

Jörg Haas
Fundação Heinrich Böll

1 Introdução

O aquecimento global constitui um dos maiores desafios do Século XXI. Um grande acúmulo de pesquisas e de modelos neste campo demonstra cada vez mais claramente a necessidade de ambiciosas reduções nas emissões, para manter o impacto do aquecimento global dentro de limites ainda toleráveis.

O desafio de uma ambiciosa política para o clima terá especial relevância para o setor energético. As emissões de dióxido de carbono pela queima de combustíveis fósseis respondem pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa. Por serem necessários grandes cortes nas emissões de CO₂ neste século, o setor energético e em particular o setor de geração de energia elétrica devem passar por uma profunda transição.

Entre as tecnologias que poderiam contribuir para a redução das emissões, a geração de energia nuclear ocupa um papel crucial. O emprego da energia nuclear é alvo de polêmica desde que foi introduzida no mercado de energia. Os riscos relacionados a esta tecnologia vão desde os acidentes desastrosos até o uso militar ou terrorista de materiais nucleares produzidos na cadeia nuclear. A geração da energia nuclear estagnou depois do desastre de Tchernobil e de outros acidentes. Além disto, depois da liberalização dos mercados de energia na maioria dos países membros da OCDE, muitas usinas nucleares passaram por sérios apuros e novos investimentos na energia nuclear eram anti-econômicos para muitos investidores. Mesmo assim, o debate emergente sobre a mudança climática voltou a colocar de vez na agenda o debate sobre a energia nuclear. Especialmente depois que a União Européia introduziu um esquema de troca de emissões e a emissão de CO₂ deixou de ser gratuita, a energia nuclear vem sendo apresentada cada vez mais como uma tecnologia chave no elenco de opções para a redução de emissões.

Uma política de mudança climática que combata os riscos do aquecimento global e os riscos específicos da energia nuclear é um terreno complexo, repleto de conflitos. O debate envolve o problema de diferentes padrões de risco, e a questão das alternativas. Os riscos para a saúde, os ecossistemas e as estruturas socioeconômicas devem ser avaliados frente à disponibilidade e aos custos de possíveis alternativas. Neste contexto, as magnitudes das futuras reduções nas emissões assumem um papel vital, junto à contribuição potencial para a redução das emissões. Se fosse necessária apenas uma redução moderada das emissões, ou se houvesse um tremendo potencial de alternativas atraentes, então o debate sobre a energia nuclear seria muito menos pertinente do que nos cenários opostos.

Neste trabalho, procuramos estruturar o debate sobre políticas para a mudança climática e a energia nuclear, além de tirar algumas conclusões a partir de uma gama de publicações e debates. No Capítulo 2, oferecemos uma visão panorâmica da magnitude necessária para as reduções de emissões no futuro e definimos uma base para discutir a energia nuclear no contexto de uma política ambiciosa para o clima. No Capítulo 3 faremos uma projeção, com base na continuidade das atividades atuais, para as emissões de CO₂ e para o desenvolvimento da energia nuclear nas próximas décadas. Esta projeção serve como caso de referência para a discussão que segue, sobre opções para a redução das emissões. Com este pano de fundo de padrões muito diferenciados de risco para o aquecimento global e a energia nuclear, então, apresentaremos um modelo ilustrativo para a análise e avaliação sistêmicas dos vários tipos de risco no Capítulo 4. No Capítulo 5, descreveremos e avaliaremos as diferentes opções para a redução das emissões em uma perspectiva de longo prazo.

A modo de exemplo, apresentamos no Capítulo 6 uma experiência de modelagem de uma redução de 80% nas emissões de CO₂ em um país altamente industrializado como a Alemanha, depois dessa análise muito global. Elaboramos então algumas lições derivadas do exercício e das análises dos capítulos anteriores. No Capítulo 7 concluímos com algumas lições essenciais apreendidas da análise apresentada no texto.

Pelo caráter de longo prazo do problema de aquecimento global, as opções devem ser avaliadas para um longo período de tempo. Limitamos nossa análise a um período até o ano 2050, porque a avaliação da tecnologia e das outras opções passa a ser cada vez mais especulativa na medida em que se estende o período em estudo. Além disto, todas as análises apresentadas no estudo são feitas em escala global. Para muitas das questões levantadas nos diferentes capítulos, seria valiosa uma discussão mais regionalizada, que ensejasse uma compreensão dos avanços e debates que variam muito entre os países e regiões do mundo.

2 O desafio da mudança climática

A mudança climática global será provavelmente o desafio mais significativo para as políticas energética e ambiental nas próximas décadas. Cada vez mais as provas científicas quanto ao fato e às consequências do aquecimento global causado por emissões antropogênicas exigem novos modelos e políticas no campo da energia. Se as emissões de gases de efeito estufa continuarem crescendo e se a concentração destes gases na atmosfera se duplicar (ou mais), surgirão outras interferências mais significativas ainda no sistema climático do planeta.

As emissões de dióxido de carbono a partir da queima de combustíveis fósseis exercem um papel preponderante na mudança climática, sendo responsáveis por quase 80% das emissões globais e constituindo um dos gases de efeito estufa que mais contribuem para o aquecimento global. Embora a concentração de alguns outros gases de efeito estufa tenha aumentado em escala significativa no último século, e apesar de alguns gases terem uma longa vida atmosférica deixando margem para algumas incertezas, as emissões de dióxido de carbono induzidas por seres humanos representam mais da metade do aumento no forçamento radiativo que causa o aquecimento global antropogênico.

Tabela 1 Concentrações atuais de gases de efeito estufa

[colunas:]

Concentração Pré-1750

Concentração troposférica atual

PAG (horizonte temporal de 100 anos)

Tempo de vida na atmosfera / anos

Aumento no forçamento radiativo / W/m²

[linhas:]

Concentrações em partes por milhão (ppm)

Dióxido de Carbono (CO₂) 280 374.97 1 variável 1.46

Concentrações em partes por bilhão (ppb)

Metano (CH₄) 730/688 1.852/1.730 23 124 0,48

Óxido nitroso (N₂O) 270 319 296 1.144 0,15

Ozônio troposférico (O₃) 25 344 n.d. horas-dias 0,35

Concentrações em partes por trilhão (ppt)

CFC-11 (triclorofluorometano) (CCl₃F) zero 256/253 4.600 45

0.34 para todos os halocarbonos em seu conjunto, inclusive muitos não relacionados aqui.

(CCl₂F₂) zero 546/542 10.600 100

CFC-113 (triclorotrifluoroetano)

(C₂Cl₃F₃) zero 80/80 6.000 85

Tetracloro de carbono (CCl₄) zero 94/92 1.800 35

Clorofórmio de metila (CH₃CCl₃) zero 28/28 140 4,8

HCFC-22 (clorodifluorometano)

(CHClF₂) zero 15.811 1700 11,9

HFC-23 (fluorôfórmio) (CHF₃) zero 1.412 12.000 260
Perfluoroetano (C₂F₆) zero 312 11.900 10.000
Hexafluoreto de enxofre (SF₆) zero 5,2111 22.200 3.200 0,0025
Pentafluoreto de enxofre trifluorometila (SF₅CF₃) zero 0,1213 ~ 18.000 ~ 3.200 (?) < 0,0001

Fonte: Blasing/Jon (2005)

A discussão sobre o nível em que as concentrações de gases de efeito estufa devem ser estabilizados “que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático” (Artigo 2º da CQNUMC) ainda está em curso. Mesmo assim, a limitação do aumento da temperatura média global a 2 graus Celsius acima dos níveis pré-industriais é visto cada vez mais como limiar para a magnitude de aquecimento global que levará a conseqüências e riscos inaceitáveis para a natureza e para as sociedades humanas.¹ Considerando que a temperatura média global já subiu 0,6°C desde o Século XIX, apenas um aquecimento adicional de 1,4°C é visto como tolerável. Além disto, uma taxa média de aquecimento a longo prazo de 0,2°C por década, no máximo, não deverá ser ultrapassada.²

A tradução destas metas em concentrações e em trajetórias de emissões ainda está sujeita a incertezas (por exemplo à sensibilidade climática) e a um longo debate científico. Os parâmetros que seguem serão essenciais na identificação de medidas que possam limitar o aquecimento global à “janelas climáticas”.

- As trajetórias das emissões ao longo do tempo para diferentes gases de efeito estufa e também para outros gases com impactos pelo forçamento radiativo (por exemplo, as emissões de enxofre, já que os aerossóis SO₂ têm um efeito de “refrigeração”), nas quais a taxa de crescimento, o momento de pico e a subsequente taxa de redução possuem particular importância;
- A concentração ou os perfis de forçamento radiativo para os diferentes gases em função das respectivas trajetórias de emissão;
- A sensibilidade climática adotada por modelos recentes varia desde um aumento de temperatura de 1,5° até uma de 4,5° Celsius para duplicar as concentrações de CO₂, com 2,5° como valor médio. Se for comprovada que a sensibilidade climática fica na faixa superior desta variação, serão necessárias reduções de emissões muito mais ambiciosas para alcançar a meta de 2°C indicada acima. Se ficar na faixa inferior, menos restrições se imporão para as futuras emissões. (No entanto, muitos modelos já se baseiam na sensibilidade climática da faixa de 2,5°C a 2,8°C).

Existe um amplo espectro de resultados de exercícios de modelagem visando identificar trajetórias para as emissões aceitáveis, no cenário das restrições para menos de 2°C de aquecimento global. De particular importância para o debate são as estratégias alternativas de redução das emissões para os vários gases ou as variações temporais para a sua implementação.³ Hare/Meinshausen (2004) indicam que:

¹ Por exemplo, o Conselho Europeu afirmou “que para alcançar o objetivo final da CQNUMC de impedir uma interferência antrópica perigosa no sistema climático, o aumento total da temperatura global não deve ser maior que 2°C acima dos níveis pré-industriais”.

² Ver WGBU (2003+2004).

³ Para mais discussão sobre os conceitos exemplares de “ação antecipada” ou “resposta retardada”, ver Meinshausen et al (2005).

- Com a estabilização de concentrações de gases de efeito estufa em 550 ppm do equivalente CO₂ (todos os gases, correspondendo aproximadamente a uma estabilização em 475 ppm de CO₂), o risco de ultrapassar os 2°C fica entre 68% e 99% (mediano 85%, ou seja “muito alto” segundo os critérios adotados pelo PIMC).
- Com uma estabilização de concentrações de gases de efeito estufa em 450 ppm do equivalente CO₂ (todos os gases, correspondendo aproximadamente a uma estabilização em 400 ppm de CO₂), o risco de ultrapassar os 2°C fica entre 26% e 78% (mediano 47%, ou seja “probabilidade média”).
- Com uma estabilização de concentrações de gases de efeito estufa em 400 ppm do equivalente CO₂ (todos os gases, correspondendo aproximadamente a uma estabilização em 350 ppm de CO₂), o risco de ultrapassar os 2°C fica entre 2% e 27% (mediano 27%, ou seja “probabilidade baixa”).

Neste contexto, uma política ambiciosa para o clima deve buscar uma estabilização de concentrações dos gases de efeito estufa entre 400 a 450 ppm (igual a uma estabilização de concentrações de CO₂ de 350 a 400 ppm).⁴ Para esta faixa de estabilização das concentrações, as emissões de gases de efeito estufa devem diminuir em aproximadamente 50% até 2050 (comparado com os níveis de 1990).

Mesmo com uma multiplicidade de trajetórias de emissões para alcançar estes níveis de concentração, devem ser consideradas importantes interações entre, por um lado, o ponto em que as crescentes emissões alcançam o pico para depois se voltarem para a redução, e por outro lado, a taxa de redução necessária para atingir a reversão do processo. Meinshausen (2005) demonstra que uma demora de 10 anos na adoção de uma ação global leva à duplicação da taxa necessária de redução das emissões depois do pico, para cortar pela metade as emissões globais de gases de efeito estufa, comparadas com as de 1990). Neste contexto, uma “ação antecipada” é necessária não apenas em termos de “aprender fazendo” como também para evitar custos e ônus adicionais durante o período depois do pico das emissões de gases de efeito estufa.

Tabela 2

Metas exemplares para a redução de emissões, para estabilizar as emissões de CO₂ em 400, 450 ou 550 ppm, 2020 e 2050

[colunas]

Nível de Estabilização

Região

Emissões de CO₂

2020 2050

Comparadas aos níveis de emissões em 1990 (a não ser nos casos indicados)

[linhas]

400 ppmv CO₂ Global

Anexo I

Não-Anexo I

⁴ Para o debate sobre a ultrapassagem temporária destes níveis e o retorno (“peaking”) posterior, ver Meinshausen (2005).

+10%

-25% até -50%

Grande desvio da referência na América Latina, Oriente Médio, Ásia Oriental e Ásia com Planejamento Central

-60%

-80% até -90%

Grande desvio da referência em todas as regiões

450 ppmv CO2 Global

Anexo I

Não-Anexo I

+30%

-10% até -30%

Desvio da referência na América Latina, Oriente Médio, Ásia Oriental e Ásia com Planejamento Central

-25%

-70% até -90%

Grande desvio da referência em todas as regiões

550 ppmv CO2 Global

Anexo I

Não-Anexo I

+50%

-5% até -25%

Desvio da referência na América Latina, Oriente Médio e Ásia Oriental

+45%

-40% até -80%

Desvio da referência na maioria das regiões, particularmente na América Latina e no Oriente Médio

Fonte: Ecofys (2004)

A Tabela 2 indica tetos referenciais para as emissões visando a estabilização das concentrações de CO₂ em vários níveis, diferenciados por grupos de países (países incluídos no Anexo I e os não incluídos no Anexo I da CQNUMC). Se for necessária a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na faixa de 400 a 450 ppm e das de CO₂ entre 350 a 500 ppm, as emissões globais de CO₂ terão que ser reduzidas em aproximadamente 60% até 2050, comparado com os níveis de 1990.

Para os países do Anexo I, seria necessária uma redução de 80% a 90% nas emissões de CO₂. Mesmo para metas de estabilização menos ambiciosas, as reduções exigidas para os países industrializados chegaram a mais de 70%, com relação aos níveis de 1990.

Além disto, reduções significativas nas emissões teriam que ser alcançadas pelos países em desenvolvimento nesta trajetória de emissões. As emissões de CO₂ poderiam aumentar até

2020 neste cenário exemplar, mas terão que cair significativamente além do horizonte de 2020.

No entanto, a trajetória de emissões de CO₂ para limitar o aquecimento global a 2°C comparado aos níveis pré-industriais depende em grande medida da sensibilidade climática.⁵ A Tabela 3 ilustra isto com dados apresentados pelo WBGU (2003). Ao se presumir uma elevada sensibilidade climática, as emissões acumuladas de CO₂ para o período 2000-2010 serão um quarto do que seriam no caso de uma sensibilidade menor.⁶

Tabela 3

Emissões acumuladas de CO₂ para limitar o aquecimento global a 2°C acima dos níveis pré-industriais

| Grau presumido de sensibilidade climática °C | Emissões acumuladas permitidas de CO ₂ 2000-2100 | |
|---|--|--|
| | bilhões de toneladas métricas de carbono | bilhões de toneladas métricas de CO ₂ |
| 1.5 | 1780.0 - 1950.0 | 6,527 - 7,150 |
| 2.5 | 850.0 - 910.0 | 3,117 - 3,337 |
| 3.5 | 530.0 - 560.0 | 1,943 - 2,053 |
| 4.5 | 380.0 | 1,393 |

Fonte: WBGU (2004)

Neste contexto, a avaliação da energia nuclear e de outras opções mitigantes deve considerar um quadro de redução rápida e significativa das emissões de CO₂, alcançando o pico das emissões nos países industrializados nas próximas duas décadas, as emissões globais de CO₂ devem ser reduzidas em 30% a 60% até 2050 e as emissões dos países industrializados devem ser reduzidos em 60% a 90% até 2050. Alcançar o limiar dos 2°C só dever ser visto como “provável” se as trajetórias das emissões ficarem próximas aos limites inferiores das faixas apresentadas.

⁵ A sensibilidade climática se expressa como o aumento da temperatura média global no caso de uma duplicação da concentração dos gases de efeito estufa.

⁶ Outros autores (por exemplo Meinhausen 2005) concluem a partir dos resultados de modelagens que alcançar a meta de 2°C apenas será “provável” se as emissões acumuladas de CO₂ dos combustíveis fósseis puderem ser limitadas a 400 bilhões de toneladas métricas de carbono (Gt C) para o período além de 1990. Se as emissões acumuladas entre 1990 e 2000 forem consideradas, isto resultaria em um orçamento remanescente de 333 Gt C (ou aproximadamente 1,221 Gt CO₂) para as emissões da queima de combustíveis fósseis.

3 Se o modelo não mudar (“*Business as usual*”)

A tendência nas emissões de CO2

Desde o início do Século XX, as emissões globais de CO2 cresceram 12 vezes. Enquanto as emissões na América do Norte e da Europa Ocidental do mais importante dos gases de efeito de estufa dominaram a tendência global na primeira metade do século, as emissões dos países socialistas aumentaram muito rapidamente no período pós-guerra. Até a crise do petróleo dos anos 70, os países de planejamento centralizado da Europa chegaram a responder por 22% das emissões globais de CO2 oriundo da queima de combustíveis, a Europa Ocidental por 23% e a América do Norte por 32%.

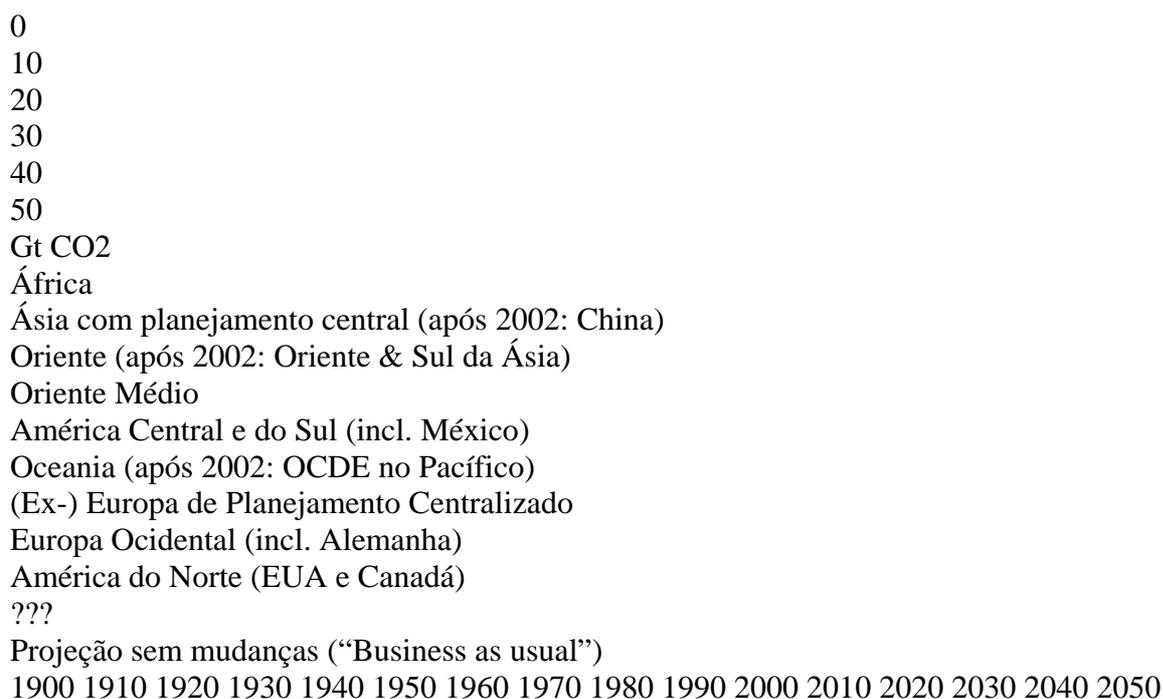
As tendências mais significativas nas emissões globais de CO2 a partir dos anos 80 são:

- O crescimento constante das emissões na América do Norte;
- A tendência mais ou menos estagnada nas emissões da Europa Ocidental;
- A queda abrupta das emissões de CO2 com o colapso dos países de planejamento centralizado na Europa; e
- As crescentes emissões em países de planejamento centralizado da Ásia (principalmente a China) e em outras economias emergentes do Oriente.

Em 2002, a participação da América do Norte nas emissões globais de CO2 foi de apenas 26%. A participação da Europa Ocidental (14%) era comparável com a dos países de planejamento centralizado na Ásia (15%) e um pouco maior do que a das economias em transição (12%).

Figura 1

Emissões globais de CO2 da queima de combustíveis, 1900-2050



Fonte: Marland et al. (2005), AIE (2004), cálculos do autor

Mesmo assim, as emissões acumuladas da América do Norte e da Europa Ocidental responderam pela maior parte das emissões de CO₂ no período 1900 a 2002. As emissões totais de CO₂ neste período somaram 1.012 bilhão de toneladas métricas de CO₂ (t CO₂). A participação das várias regiões nas emissões acumuladas é parecida à situação das emissões do ano 1970. Os países da América do Norte respondem por cerca de 32% do total das emissões acumuladas de CO₂. A Europa Ocidental representa uma fração de 22% e os ex-países socialistas da Europa entram com 18%. A participação da Ásia com planejamento centralizado e dos outros países orientais ainda fica baixa, com 8% e 5% respectivamente.

A projeção da Agência Internacional de Energia (AIE 2004) com base no caso de referência prevê a continuação das tendências recentes:

- As emissões globais de CO₂ da queima de combustíveis cresce 62% no período 2002-2030;
- O aumento nas emissões de CO₂ para os países da OCDE na América do Norte chega a 33%;
- As emissões na Europa Ocidental e na União Européia podem crescer cerca de 20%;
- As emissões nos países da OCDE na região Ásia e Pacífico também aumentam em cerca de 20%;
- As emissões de CO₂ nas economias em transição (especialmente a Rússia) voltam a aumentar em 40%;
- As emissões de CO₂ em muitos países em desenvolvimento (China, Índia, Indonésia, Brasil, etc.) aumentam entre 20% e 60%.

A Figura 2 indica setores chaves para o crescimento das emissões na projeção da AIE. Metade do crescimento nas emissões projetado para 2002 a 2030 tem origem no setor energético, e sendo um terço da geração de energia com carvão. O segundo setor chave é o transporte, que responde por 26% do crescimento das emissões. Embora todos os setores devam se sujeitar a medidas de redução das emissões, os setores de transportes e de geração de energia devem assumir papéis destacados em qualquer estratégia de redução de emissões.

Mesmo que a projeção se baseie em outra dinâmica de crescimento das emissões nas regiões do mundo, as “responsabilidades históricas” em termos da acumulação de emissões de CO₂ mudariam pouco. Os países da América do Norte respondem por 28% do total das emissões de CO₂ acumuladas no período 1900 a 2030, a Europa Ocidental por 18% e os ex-países socialistas da Europa por 14%. Os países que mais crescem na Ásia e no Extremo Oriente ainda representariam 12% e 9% das emissões globais de CO₂ acumuladas no período 1900 a 2030.

Figura 2 Contribuições por setores ao crescimento das emissões globais de CO₂ da queima de combustível, 2002-2030

Usos Não Energéticos

1%

Consumo Final

Transporte

26%

Consumo Final
 Outros Setores
 8%
 Usinas Geradoras de Energia e Calor (Carvão)
 33%
 Usinas Geradoras de Energia e Calor (Outros Combustíveis)
 18%
 Transformação, Uso Próprio e Perdas
 4%
 Consumo Final
 Indústria
 10%

Fonte: AIE (2004), cálculos do autor

Comparada com os orçamentos de emissão mencionados no Capítulo 2, a tendência das emissões na projeção de caso de referência feita pela AIE dificilmente se enquadra em qualquer trajetória de emissões que cumpra com a meta de 2°C, se a sensibilidade climática for maior do que 2,5°C. Se a sensibilidade climática for perto de 2,5°C, as tendências das emissões terão que assumir uma tendência de queda rápida imediatamente depois de 2030, para ter alguma possibilidade de limitar o aquecimento global a 2°C acima dos níveis pré-industriais (Tabela 4).

Tabela 4 Emissões acumuladas de CO₂ para limitar o aquecimento global a 2°C acima dos níveis pré-industriais, e o caso de referência para as tendências de emissão de CO₂ até 2030.

[colunas]
 Sensibilidade climática presumida °C
 Emissões acumuladas de CO₂ permitidas de 2000 a 2100
 Emissões Acumuladas de CO₂ 2000-2030
 Orçamento de emissão remanescente

Bilhões de toneladas métricas de CO₂

1,5
 2,5
 3,5
 4,5

6.527 - 7.150
 3.117 - 3.337
 1.943 - 2.053
 1.393

~ 900
 ~ 900
 ~ 900
 ~ 900

86% - 87%
71% - 73%
54% - 56%
35%

Fonte: WBGU (2004), AIE (2004), cálculos do autor.

Geração de energia nuclear

Contrastando com a demanda global por energia e as emissões globais de CO₂, o desenvolvimento da energia nuclear se deu basicamente nos países da OCDE e nos países socialistas europeus, hoje em transição. O forte crescimento na geração de energia nuclear dos anos 70 e 80 amainou claramente depois do desastre de Tchernobil. Há pouco crescimento nos anos desde 2000. A participação da energia nuclear foi 22% em 2003 nos países da OCDE e 6% para os países não-membros da OCDE. Poucos países produzem mais do que um terço de sua energia elétrica com a energia nuclear, incluídos países da OCDE (França, Suécia, Bélgica, Hungria, Coreia, Eslováquia e Suíça) e também alguns países com economias em transição (Bulgária, Eslovênia, Armênia, Lituânia e Ucrânia).

Figura 3 Geração de energia nuclear, 1975-2030



Projeção sem mudanças (“Business as usual”)

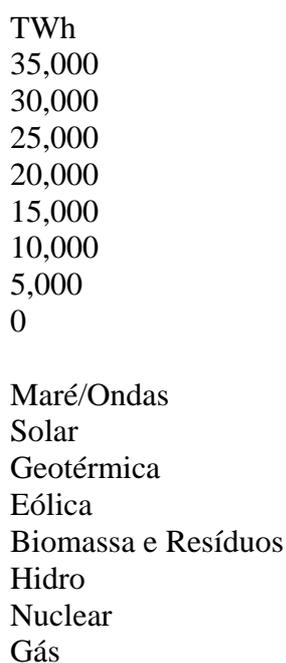
Fonte: AIE (2004+2005)

As principais razões pela dinâmica declinante no setor de energia nuclear em muitas regiões do mundo se encontram entre os seguintes fatores:

- Maior resistência do público contra a energia nuclear em muitos países, particularmente com relação a grandes acidentes nucleares, a disposição dos resíduos radioativos, o transporte do material nuclear e os problemas de proliferação e terrorismo;
- Os problemas econômicos enfrentados pelas usinas nucleares depois da liberalização dos mercados de energia elétrica em alguns países da OCDE, inclusive o problema de financiar a desativação das usinas e a disposição dos resíduos;
- Maior rigor nas exigências e normas de segurança para usinas nucleares novas e existentes; e
- O preço relativamente baixo dos combustíveis fósseis e grandes avanços em tecnologias concorrentes para a produção de energia elétrica.

A projeção do caso de referência para a geração de energia nuclear indica um pequeno crescimento até 2010 e uma pequena redução durante as duas décadas a partir de 2010. Esta tendência surge de três tendências diferentes. Particularmente nos países europeus da OCDE, se presume uma forte redução na produção de energia nuclear. Nestes países e na União Européia a produção de energia elétrica deve diminuir em 40% nas próximas três décadas. Na América do Norte e nas economias em transição, se supõe que a produção de energia nuclear está mais ou menos estagnada. Porém nos países asiáticos da OCDE e em alguns países em desenvolvimento, a AIE (2004) prevê um grande aumento na produção de energia nuclear. nos países asiáticos da OCDE este aumento é projetado para alcançar 60%. A partir de níveis muito baixos, a produção de energia nuclear na China deve aumentar 10 vezes, e na Índia 4,8 vezes. Para outros países em desenvolvimento projeta-se um crescimento menor, porém significativo, na energia nuclear (América Latina +38% para 2002-2030, e na África +18%).

Figura 4: Produção de energia elétrica no caso de não haver mudanças (“Business as usual”), 2002-2020



Petróleo
Carvão

2002 2010 2020 2030

Fonte: AIE (2004)

Mesmo prevendo um pequeno aumento na geração de energia nuclear, para o World Energy Outlook a participação da energia nuclear no total da geração deverá diminuir de maneira significativa. Em 2002 sua participação era 17%, e até 2030 este percentual cairá para apenas 9%. Mesmo na China, o país onde a energia nuclear mais cresce, ela contribuirá apenas 5% do total de energia gerada. O maior crescimento na geração de energia elétrica, segundo o World Energy Outlook 2004, será da energia produzida com carvão e gás natural.

Embora também se preveja um forte crescimento para a energia elétrica gerada de fontes renováveis, estas fontes (a não ser as hidrelétricas) terão um papel menos importante, segundo a projeção do caso de referência esboçada pela AIE.

4 A gestão de estruturas de risco complexas

Os riscos do aquecimento global e os riscos relacionados à energia nuclear constituem uma área de conflito, que carece de uma abordagem mais sistêmica na avaliação das diferentes ordens de risco, para permitir a elaboração de diretrizes e de estratégias.

O Conselho Assessor Alemão sobre a Mudança Global (WBGU) propôs um modelo que permita a comparação e a avaliação dos diversos riscos. No modelo do WBGU, os riscos devem ser categorizados pelos seguintes critérios (WBGU 2000):

- A probabilidade de ocorrência
- A extensão do dano
- A certeza da avaliação da probabilidade e da extensão do dano
- A ubiqüidade (impacto global)
- A persistência (períodos muito longos para a remoção)
- A irreversibilidade (danos não são reversíveis)
- Os impactos retardados (lapsos temporais muito longos)
- O potencial de mobilização (alta relevância psicológica e política)

Com base nestes critérios, os riscos podem ser agregados em diferentes “áreas”. Os riscos da “área normal” se caracterizam pelos seguintes atributos (WBGU 2000):

- Baixo grau de incertezas quanto a distribuição provável do dano;
- Pequeno potencial geral catastrófico;
- Incerteza baixa a média quanto à probabilidade e à magnitude do dano;
- Baixos níveis de persistência e de ubiqüidade (alcance temporal e espacial);
- Alto grau de reversibilidade dos potenciais danos; e
- Baixo potencial de conflito e mobilização sociais.

É mais problemática a situação da área crítica, que consiste de uma “área de transição” e uma “área proibida”. Os riscos na “área crítica” possuem ao menos uma das seguintes características (WBGU 2000):

- Alto grau de incerteza para todos os parâmetros de risco;
- Alto potencial de dano;
- Alta probabilidade de ocorrência (próximo a 1);
- Alto grau de incerteza na avaliação, porém com fundamentos consistentes para supor que grandes danos são possíveis;
- Alta persistência, ubiqüidade e grau de irreversibilidade, com fundamentos consistentes para supor a possibilidade de dano;
- Expectativa de grande potencial de mobilização (recusa, protestos, resistência) por causa da percepção de injustiças distributivas ou por outros fatores sociais ou psicológicos.

A diferenciação entre a “área de transição” e a “área proibida” se fundamenta na possibilidade de reduzir o risco ou de construir um consenso pelo qual as oportunidades superam os danos (WBGU 2000):

- Se forem possíveis medidas de redução do risco cuja implementação promete uma transição para um risco da “área normal”, o risco deve ser visto na “área de transição”.
- Se a extensão dos danos for tão grave e não se pode construir um consenso na sociedade de modo que os riscos sejam aceitos devido às oportunidades associadas, o risco deve ser considerado como pertencendo à “área proibida”.

Neste contexto, são as seguintes as perguntas chaves sobre todos os riscos a serem alocados nas áreas críticas:

- Existem ou estão em gestão medidas que possam reduzir a extensão do dano com alto grau de certeza no futuro previsível até o ponto de caber na “área normal”? Se não, todos os esforços devem ser feitos para substituir a tecnologia em questão, etc.
- Existe um consenso na sociedade ou poderia ser construído tal consenso, que aceitasse os riscos de graves danos devido às oportunidades associadas para a sociedade? Se não, todos os esforços devem ser feitos para substituir a tecnologia em questão, etc. Esta dimensão é de particular complexidade, quando o problema é alcançar uma forte dimensão internacional e inter-gerações, na ausência de bases institucionais que expressem um consenso da sociedade neste sentido.

Além dos critérios de categorização dos riscos, o WBGU introduziu várias classes de risco, indicando as dimensões para um par de riscos ambientais e outros. A Tabela 5 apresenta uma visão geral das classes de risco ‘Dámocles’, ‘Cyclops’, ‘Pythia’, ‘Pandora’, ‘Cassandra’ e ‘Medusa’.

Tabela 5: Visão geral das classes de risco: caracterização e exemplos concretos

[colunas]

| Classe de risco | Caracterização | Exemplos |
|-----------------|----------------|----------|
|-----------------|----------------|----------|

Dámocles

Baixa probabilidade de ocorrência
 Alto grau de certeza na avaliação da probabilidade
 Alta extensão de danos
 Alto grau de certeza na avaliação da extensão dos danos

Energia Nuclear
 Grandes indústrias químicas
 Barragens
 Inundações
 Impactos de meteoros

Cyclops

Probabilidade de ocorrência desconhecida
 Alta extensão de danos
 Grau de certeza na avaliação da extensão dos danos tende a ser alto
 Confiabilidade da estimativa da probabilidade desconhecida

Terremotos
 Erupções vulcânicas
 Infecção por AIDS
 Colapso da circulação termohalina
 Sistemas de alerta avançado e sistemas de armas NBQ
 Desenvolvimento em massa de espécies antropogenicamente influenciadas

Pythia

Probabilidade de ocorrência desconhecida
 Extensão de danos desconhecida (apenas como presunções)
 Extensão de danos desconhecida (potencialmente alta)
 Grau de certeza na avaliação da extensão de danos desconhecido
 Grau de certeza na avaliação da probabilidade desconhecido

Aquecimento global retro-alimentado
 Liberação e entrada em circulação de infecção BSE/nv-CJD
 Certas aplicações da engenharia genética
 Instabilidade das camadas de gelo na Antártida Ocidental

Pandora

Probabilidade de ocorrência desconhecida
 Persistência alta (várias gerações)
 Extensão de danos desconhecida (apenas como presunções)
 Grau de certeza na avaliação da extensão de danos desconhecido
 Grau de certeza na avaliação da probabilidade desconhecido

Poluentes orgânicos persistentes (POPs)
Disruptores hormonais

Cassandra

Probabilidade de ocorrência tende a ser alta
Extensão de danos alta
Longa demora para aparecerem conseqüências
Grau de certeza na avaliação da extensão de danos tende a ser alto
Grau de certeza na avaliação da probabilidade tende a ser baixo

Mudança climática paulatina antropogênica
Desestabilização de ecossistemas terrestres

Medusa

Probabilidade de ocorrência tende a ser baixa
Extensão de danos baixa (alta exposição)
Alto potencial de mobilização
Grau de certeza na avaliação da extensão de danos tende a ser alto
Grau de certeza na avaliação da probabilidade tende a ser baixo

Campos eletromagnéticos

Fonte: WBGU (2000)

São de particular relevância para o debate sobre energia nuclear e clima as classes de risco “Cassandra” e “Dámocles”. Em uma perspectiva dinâmica, o WBGU trabalha por medidas de precaução na política de clima e pela adoção de grandes esforços para conter o risco tipo “Cassandra” de aquecimento global (ver a Figura 5) dentro de limites toleráveis:

- O aumento da temperatura média global deve ser limitado a 2°C acima dos níveis pré-industriais.
- A taxa de elevação da temperatura deve ser inferior a 0,2°C por década.

Figura 5 Classes de risco e sua inserção nas áreas normal, de transição e proibida

Probabilidade de ocorrência →

Extensão do dano →

Fora das definições [2 vezes]

Área Proibida

Área de Transição

Área Normal

Medusa

Pythia

Cassandra

Cyclops

Dámocles

Mudança climática paulatina antropogênica

Aquecimento global retro-alimentado

Campos eletromagnéticos

Colapso da circulação termohalina

Energia Nuclear

Fonte: WBGU (2000).

Sobre o risco “Dámocles” da energia nuclear, o WBGU afirma: “Se os melhores esforços não puderem reduzir de maneira expediente o potencial catastrófico ou se só puderem fazê-lo a um custo exorbitante, então ... este tipo de fonte de risco deveria ser aprovada somente sob duas condições: primeiro se a utilidade desta fonte de risco for de importância existencial e, segundo, se for possível garantir que todas as opções tecnológicas, institucionais e organizacionais sejam exploradas para garantir que o evento catastrófico simplesmente não ocorra e, se viesse a ocorrer, que os danos sejam mitigados na medida do possível. Esta segunda pré-condição ganhará particular relevância se estas fontes de risco forem exportadas via transferência de tecnologias para terceiros países.”

Por isso, a avaliação da situação da energia nuclear é complexa:

- Uma primeira questão chave é se existe todo o conjunto de opções tecnológicas, institucionais e de organização para transformar o risco “Dámocles” em “Medusa”, ou seja para limitar os danos e manter baixa a probabilidade de sua ocorrência. Estas opções devem ser avaliadas com relação ao uso atual da energia nuclear e ao uso de energia nuclear em escala muito maior em qualquer região do mundo.
- A segunda questão é se a energia nuclear poderia ser um componente existencial na substituição de risco com relação ao aquecimento global, ou seja, a substituição de um risco tipo “Cassandra” que definitivamente pertence à “área proibida”.

Com as modernas tecnologias nos reatores, a extensão do dano (em acidentes grandes, ataques terroristas, manejo e disposição de materiais radioativos, etc.) definitivamente não pode ser limitada à faixa exigida pela “área normal”. Além disto, persistem grandes incertezas sobre a capacidade de futuras gerações de reatores cumprirem com as exigências mencionadas acima e sobre a estreita relação entre os riscos da energia nuclear, por um lado, e outros riscos de instabilidade social, política e institucional.

Neste contexto, a primeira pergunta decisiva sobre o futuro da energia nuclear no sistema energético global é se existem opções alternativas que garantam um volume adequado de serviços energéticos em escala global, dentro das fortes limitações à emissão de gases de efeito estufa. A segunda é se e como o risco de mudança climática poderá ser contido dentro de limites aceitáveis, sem lançar mão da energia nuclear, e se este objetivo pode ser alcançado sem conseqüências inaceitáveis (em termos de custos, aceitação e outros riscos).

5 Opções para a mitigação

Comentários preliminares

Um amplo corpo de análises científicas sobre estratégias para reduzir emissões e assim estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera demonstra que não há uma opção única capaz de suprir toda a redução necessária. No entanto, a contribuição das diferentes opções vai depender, em grande medida, do nível de estabilização da concentração. Se forem estabelecidas metas menos ambiciosas para a redução, haveria uma grande flexibilidade quanto ao alcance que as diferentes opções tecnológicas poderiam alcançar. Nesse cenário seria muito mais fácil abandonar o uso da energia nuclear, pelas razões discutidas no capítulo anterior.

O “mix” de tecnologias para as estratégias de redução de gases de efeito estufa foi analisado com muitas e variadas abordagens metodológicas, por exemplo no III Relatório de Avaliação do PIMC (2001), além de outros estudos (p. ex. Schrattenholzer et al. 2004, WBGU 2004).

Nesta análise, nos referimos a esses estudos com uma abordagem simples. Presume-se que no caso de continuidade, sem mudanças no modelo (ou “Business as Usual”, sigla BAU), as emissões globais de CO₂ da queima de combustíveis vão aumentar de 40 a 50 bilhões de toneladas por ano até o ano 2050, e que a redução necessária para estabilizar as emissões de CO₂ em um nível no qual a meta de 2°C possa ser alcançada fica de 30% a 60% abaixo dos níveis de 1990, então o lapso a ser compensado com opções de mitigação será de 25 a 40 bilhões de toneladas de CO₂ no ano 2050. Com um modelo simplificado, presumimos uma tendência linear e não levamos em conta diferentes opções temporais de pico de emissões ou

de trajetórias de redução depois do pico, que poderiam ser caracterizadas por diferentes gradientes de redução das emissões. Usamos o modelo simplificado para demonstrar as contribuições potenciais, além das potenciais interações entre diferentes agrupamentos de estratégias de abatimento, ou redução.

Energia nuclear

442 reatores com capacidade total de 368,6 GW operavam no mundo para produzir energia em 2004. A grande maioria destes reatores são de água leve, com diferentes projetos. Em 2003, 15,7% da produção global de energia elétrica era gerada em usinas nucleares. A participação da energia nuclear varia significativamente entre os países dentro e fora da OCDE. Os países da OCDE geraram aproximadamente 2.223 TWh com suas usinas nucleares em 2003, respondendo por 22,3% nesse ano. A geração de energia nuclear em países fora da OCDE em 2003 chegou a 412 TWh, uma participação de apenas 6%.

A projeção de continuidade (BAU) para a OCDE indica um crescimento lento na geração de energia nuclear até 2030. O aumento da capacidade total de 359 GW em 2002 para 376 GW em 2030 corresponde a um crescimento líquido de 600 MW por ano, na média. Ou seja, a cada dois anos é inaugurada uma nova usina nuclear com uma capacidade de 1.200 MW, para seguir esta trajetória. Considerando o perfil da idade das usinas nucleares existentes, porém, uma média de 4 a 5 GW de nova capacidade de geração nuclear (o que representa 3 ou 4 grandes usinas) terá que entrar em operação a cada ano.

A contribuição potencial da energia nuclear para alcançar as metas de redução das emissões foi avaliada em vários estudos.

- Uma expansão de dez vezes na produção de energia nuclear no período 2000-2075 (van der Zwaan, 2002) indicaria uma capacidade nuclear global de 2.050 GW, com uma produção de 17.283 TWh, em 2050. Isto seria seis vezes mais do que a energia a ser gerada no caso 'BAU'. Na média, 35 GW de capacidade nuclear teria que ser agregada por ano até o ano 2050. Este aumento na produção de energia nuclear substituiria não apenas o carvão como uma grande parte da geração de energia elétrica por gás. De ser adotado este cenário extremo, e obviamente irreal, haveria uma redução de 9.700 Mt nas emissões de CO₂ no ano 2050.
- Pacala/Socolow (2004) sugerem uma expansão de 700 GW até meados deste século, equivalente a triplicar a capacidade atual. Considerando a necessidade de substituição de usinas hoje em operação, na média 25 GW de capacidade nova teria que entrar em operação por ano para alcançar a capacidade de 1.060 GW para o conjunto das usinas nucleares em 2050. A produção total de energia elétrica chegaria a 8.260 TWh neste caso, reduzindo as emissões de CO₂ em 7.000 Mt no ano 2050, se fossem substituídas apenas as usinas movidas a carvão. No caso da substituição de um "mix" de usinas a carvão e a gás por novas usinas nucleares, a contribuição para a redução das emissões chegaria a 5.000 Mt CO₂ no ano 2050.

A história da energia nuclear sugere que os dois cenários são muito irrealistas. Os grandes riscos e preocupações com relação à energia nuclear, no entanto, deveriam ser refletidos nos dois cenários. Além disto, devemos destacar que estes cenários implicam uma expansão significativa da participação da energia nuclear na geração total de eletricidade, em países e regiões onde o papel da energia nuclear hoje é nulo ou pouco relevante. Uma expansão de três

a seis vezes na geração de energia nuclear na América do Norte, na Europa ou no Japão não será viável, devido à grande participação atual da energia nuclear nas matrizes energéticas desses países.

O risco principal dos reatores nucleares é um grande acidente com grande liberação de radiação. Estas liberações radioativas prejudicam muito a saúde, os ecossistemas e os sistemas sócio-econômicos (PNUD/UNICEF 2002). A grande maioria das usinas existentes e, nos próximos 30 anos, a grande maioria de novas usinas nucleares seriam reatores de água leve, a serem projetadas evolutivamente com base nos conceitos atuais de reatores. Para todos estes reatores, falhas muito graves e inerentes de segurança devem ser reconhecidas (Froggatt 2005).

Mesmo que a probabilidade de um acidente desastroso pareça muito baixa em termos específicos⁷, a multiplicação da geração de energia nuclear por três ou seis vezes nos próximos 50 anos elevaria enormemente o risco de um ou mais acidentes desastrosos. Exercícios de modelagem sobre as conseqüências econômicas de um grande acidente em uma usina nuclear alemã demonstram que o custo total de tal desastre poderia somar de \$2 a \$5 trilhões (Ewers/Rennings 1991+1994).

Além dos reatores a água leve, vários outros conceitos de reator estão em diversas etapas de desenvolvimento e implementação. A cada um destes “conceitos evolucionários” (chamados de “reatores de 3ª geração”), correspondem grandes riscos inerentes, para cenários de acidentes que incluem a liberação maciça de material radioativo. Em alguns países há pesquisas incipientes para desenvolver “conceitos revolucionários de reatores” (chamados de “reatores de 4ª geração”) que serão muito mais seguros, confiáveis e econômicos do que os reatores da 3ª geração, e ao mesmo tempo resistentes à proliferação, etc. (NERAC 2002). O exame mais detalhado dos conceitos técnicos revela que muitos problemas de segurança continuam completamente sem solução, além de haver evidência empírica que sugerem que a melhora da segurança em certos aspectos poderia criar novos problemas de segurança. Finalmente, mas não menos importante, continua totalmente sem solução a dúvida quanto ao necessário equilíbrio entre maior segurança e menores investimentos e custos operacionais. O desenvolvimento da nova geração de reatores, diga-se de passagem, ainda exigirá enormes investimentos e o resultado continua incerto. Os reatores de 4ª geração, se é que um dia forem entrar em operação, não estarão disponíveis por pelo menos os próximos 20 a 30 anos. Se, e de que maneira, esses reatores responderão à ameaça de ataques terroristas intencionais (inclusive choques de aviões) continua uma incógnita. Outros problemas análogos poderiam surgir com a expansão de usinas nucleares para países ou regiões onde o risco de conflito militar é muito maior do que naqueles países e regiões onde a maioria das usinas atuais estão em operação.

A disponibilidade do combustível nuclear será uma grande pré-condição para as usinas nucleares poderem contribuir em peso para as metas de redução de emissões até 2050. Hoje, a demanda anual por combustível nuclear está em torno de 70.000 toneladas de urânio. Para expandir a produção de três a seis vezes em um prazo relativamente curto, a demanda por combustível nuclear aumentaria também várias vezes, mesmo no caso de ganhos significativos de eficiência no uso do combustível. A oferta de combustível nuclear dependeria da expansão de recursos especulativos (não descobertos) em poucas décadas (ver

⁷ Sailor et al. (2000) se refer a um risco de acidente com grande liberação externa de atividade de aproximadamente 10-5 a 10-6 por reator, por ano. A possibilidade de ataques terroristas propositais, no entanto, não foi levado em conta na época desse estudo.

Kreusch et al., 2005). A capacidade de mineração de urânio teria que crescer substancialmente, em um processo que pode demorar muitos anos, com base na experiência histórica⁸ (8). Além disto, teriam que ser criada muito mais capacidade de enriquecimento. Lovins (2005) informa que 15 novas usinas de enriquecimento de urânio terão que ser construídas para usinas nucleares adicionais de 700 GW.

Neste contexto, Rothwell/van der Zwaan (2003) classificam os reatores a água leve como não-sustentáveis, pelo critério de esgotamento de recursos não-renováveis. Ao mesmo tempo, os planos para os reatores de 4ª geração destacam claramente o problema de recursos finitos de combustíveis, para os reatores a água leve (NERAC 2002). Se a disponibilidade (e o custo) do combustível nuclear para reatores a água leve for considerada problemática, então os ciclos de combustível sem reprocessamento (“once-through”) terão pouca importância no futuro. Hoje, os ciclos “once-through” são a opção preferida por conta dos custos reduzidos e da exclusão de riscos relacionados ao reprocessamento do combustível gasto. Se bem que os conceitos dos reatores de 4ª geração continuam em grande medida especulativos, sua ênfase em “ciclos de combustível fechados” traz novamente à pauta a introdução em grande escala de reatores regenerativos (“fast breeders”) e o reprocessamento do combustível gasto (NERAC 2002). Se a cadeia da tecnologia nuclear se estender até os reatores regenerativos e as usinas de reprocessamento (junto com novas necessidades de transporte), aumentarão significativamente os riscos de acidentes, junto com a vulnerabilidade ao atentados terroristas e conflitos militares. Lovins (2005) ilustra a dimensão do reprocessamento com o caso de usinas nucleares adicionais de 700 GW, que precisariam de em torno de 50 novas usinas de reprocessamento, ao redor do mundo.

O desafio da proliferação vem ganhando projeção desde o final da Guerra Fria. Problemas concretos da não-proliferação (Irã, Coreia do Norte) indicam que com a expansão da energia nuclear – inclusive em escala regional – podem surgir riscos adicionais (Nassauer 2005). Um sistema elétrico com a capacidade nuclear de 1.000 GW, com reatores de água leve, produziria aproximadamente 290 t de plutônio (Pu) por ano. No caso de uma capacidade nuclear total de 2.000 GW em 2050, a produção anual de plutônio alcançaria 560 t. Esse volume de material físsil levantaria graves problemas para conter a proliferação, exigindo outra escala de qualidade nos regimes internacionais de salvaguardas. Se os ciclos de combustível sem reprocessamento fossem substituídos por ciclos fechados, com o reprocessamento e separação do plutônio, surgiriam graves ameaças à segurança internacional, tanto pelo volume de plutônio a ser processado como pelas regiões onde seriam geradas quantias significativas de plutônio. Além disto, seria um erro supor que o risco da proliferação cairia para um nível zero ou irrisório, consideração esta que também se aplica aos conceitos de reatores de 4ª geração.

Apesar de vários estudos realizados para identificar e demonstrar a confiabilidade a longo prazo dos depósitos finais, nenhum país achou uma solução permanente para a disposição final dos resíduos nucleares. A pesquisa para desenvolver depósitos finais, assim como os procedimentos para a participação do público ou esforços para ganhar a aceitação pelo público dos locais escolhidos para a disposição dos resíduos nucleares estão cada vez mais presentes (Kreusch et al. 2005). Se o volume de resíduos nucleares crescesse de maneira significativa, o lapso entre a geração de resíduos com alto nível de radioatividade e a disponibilidade de locais para disposição ficaria cada vez maior. Van der Zwaan (2002)

⁸ Price et al. (2004), em uma visão panorâmica de projetos de mineração, informam que o prazo do começo da exploração e o início da produção foi de 20 a 30 anos, e que o prazo entre a descoberta do depósito e o início da produção era de 10 a 20 anos.

exemplifica com o caso da duplicação da geração de energia nuclear nos EUA, que exigiria uma capacidade adicional de disposição equivalente a um novo projeto Yucca Mountain a cada 25 anos. Segundo Lovins (2005), o acréscimo de 700 GW de capacidade de geração de energia nuclear exigiria depósitos com a capacidade de 14 projetos na escala de Yucca Mountain.

Por último, porém não menos importante, a viabilidade econômica da geração de energia nuclear será decisiva para a sua participação em uma estratégia ambiciosa para o clima. Se não houver um preço para o CO₂ (seja com um imposto ao carbono, seja como parte de um esquema de troca de emissões), é pouco provável que a energia nuclear possa concorrer em mercados competitivos (Thomas 2005). Mesmo assim, a introdução gradual de instrumentos de mercado para políticas de clima (por exemplo o esquema da União Européia de troca de emissões) mudaria esta situação de certa maneira. O nível dos preços de CO₂ – que poderia melhorar significativamente o desempenho econômico de novas usinas nucleares – continua cercado de polêmica. Sailor et al (2000) se refere a um preço de carbono de aproximadamente 100 US\$/tC (27 US\$/t CO₂), que seria o nível necessário para novas usinas nucleares serem competitivas no mercado. Outras avaliações oferecem limiares bem mais altos para garantir a competitividade da geração de energia nuclear. Por outro lado, deve ser lembrado que muitos outros fatores distorcem a avaliação econômica da geração de energia nuclear. A ausência de fundos suficientes para financiar o descomissionamento, regras muito generosas para a responsabilidade civil, incentivos fiscais e outros descontos em muitos países ocultam o verdadeiro custo da eletricidade gerada com energia nuclear. Se a energia nuclear tiver um papel mais significativo no futuro, esses custos ocultos virão cada vez mais à tona, pois o ônus para as entidades obrigadas a suportarem o peso acabará ficando mais evidente.

Resumindo, a energia nuclear contribuiria até certo ponto para as metas ambiciosas de redução de emissões a nível global. Esta contribuição não eliminaria outras opções, é verdade, e poderia ser significativa. Para esta contribuição ser realmente significativa, o emprego da energia nuclear teria que ser ampliada até dimensões com fortes impactos. Estes impactos precisam ser avaliados para permitir uma comparação bem fundamentada com outras opções de redução de emissões. Uma expansão maciça da energia nuclear:

- aumentaria significativamente os riscos para a saúde, os ecossistemas e os sistemas sociais e econômicos, por causa de grandes acidentes (inclusive por atentados terroristas);
- elevaria o problema de resíduos nucleares e da proliferação a novas dimensões, em termos do volume de material e das regiões e países onde os problemas surgiriam;
- exigiria a substituição do sistema de ciclos de combustível sem reprocessamento (“once-through”) por ciclos de combustível mais ou menos fechados, e a volta do reprocessamento e da tecnologia de reatores regenerativos (“fast breeder”), levantando assim riscos e vulnerabilidades adicionais na cadeia tecnológica;
- exigiria pesados investimentos em toda a cadeia tecnológica, desde a mineração até o enriquecimento e reprocessamento, investimentos estes que precisam de demoradas atividades preparatórias;
- exigiria malhas de interligação e outras infraestruturas para garantir a estabilidade das operações;
- será mais atraente se o preço das emissões de CO₂ for fixado, por um lado, mas traria à tona outras distorções que fortalecem o desempenho da geração da energia nuclear.

Estes riscos e problemas dependem de debates políticos e científicos em múltiplas dimensões. Para alguns dos riscos, não existem propostas tecnológicas ou institucionais quanto a como

limitar ou excluir os problemas ou suas conseqüências (ver Sailor et al. 2000, van der Zwaan 2002). No entanto, é uma cogitação extremamente especulativa tentar saber se tais propostas um dia funcionarão ou se poderão ser implementadas suficientemente no mundo real e em prazos adequados.

Neste contexto, as próximas seções do texto analisam quais outras opções poderiam contribuir para estratégias ambiciosas de redução de emissões, qual seria seu potencial, quais as restrições relacionadas, as exigências, prazos, ferramentas político-administrativas, outros impactos e os custos, comparados aos da energia nuclear.

Se os riscos e os problemas da energia nuclear, mencionados acima, forem avaliados com seriedade, a questão fundamental é saber se as potenciais alternativas ao uso da energia nuclear (inclusive seus impactos) permitiriam o cumprimento de metas ambiciosas de redução de emissões. Em outras palavras,

- seria possível alcançar metas ambiciosas de redução de emissões sem a energia nuclear, em termos de contribuições ou custos potenciais, ou
- os impactos de qualquer uma das alternativas ou das alternativas em seu conjunto seriam obstáculos, no final, para as estratégias de redução de emissões, ou
- uma estratégia com uma contribuição significativa da energia nuclear acabaria sendo contraproducente para as estratégias ambiciosas de redução de emissões, pela impossibilidade de evolução para as outras opções?

A questão fundamental para a avaliação da energia nuclear é identificar metas ambiciosas para a redução das emissões em uma estratégia para a mudança climática, na medida em que estiver explícita (em termos de potenciais) ou implícita (em termos das conseqüências e impactos para outras opções de redução) a forte necessidade de incluir a energia nuclear no arsenal para cumprir com os desafios e metas ambiciosos de estratégias e políticas para a mudança climática.

Eficiência energética no consumo final

O relatório World Energy Outlook (Perspectiva Energética Mundial, AIE 2004) presume um ganho anual de intensidade energética entre 1,3 e 1,6% durante as próximas três décadas. Ou seja, o mesmo valor econômico (em termos de paridade de poder de compra) será gerado no ano 2030 gastando um terço a menos de energia primária do que em 2002. Porém, o forte crescimento global a nível global mais do que compensará os ganhos da eficiência no consumo de energia. Para o período 2002 a 2030, a AIE estima que a economia global crescerá por um fator de 2,4, enquanto a população deverá crescer perto de 30% no mesmo período. Em conseqüência, o consumo de energia primária aumentará em quase 60%. Se continuarem, estas tendências projetam um consumo de energia primária de aproximadamente 21 milhões de toneladas de petróleo-equivalente e emissões anuais de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis de 48 bilhões de CO₂, em 2050.

No entanto, o grande potencial de ganhos de eficiência não será alcançado na hipótese de tudo seguir como está (“Business as Usual”, ou BAU), apesar dos ganhos econômicos que estas opções representam. Jochem et al (2000) demonstram significativos potenciais de eficiência energética (de 5% a 80%) em todos os setores, para todas as regiões do mundo. O PIMC (2001) destaca áreas claves de consumo de energia onde existem possibilidades consideráveis para o uso eficiente da energia.

Nos setores de uso final, as seguintes áreas deverão ser as mais significativas para os ganhos na eficiência energética:

- No consumo de energia em edifícios (inclusive por eletrodomésticos), o PIMC (2001) se refere a um potencial de redução de emissões entre 1.000 e 1.1000 Mt C (3,667 to 4,033 Mt CO₂) anualmente, até o ano 2020. Pacala/Socolow (2004) trabalham com o mesmo volume para o horizonte de 2050, em uma estimativa conservadora.
- Os grandes ganhos no setor industrial são projetados para a eficiência energética e maior eficiência nos materiais. Segundo o PIMC (2001), o potencial total de redução é de 1.300 até 1.500 Mt C (4,767 a 5,500 Mt CO₂) por ano, em 2020.
- O consumo de energia no transporte é significativo por causa do rápido crescimento de emissões neste setor. O PIMC (2001) estima uma economia potencial entre 300 e 700 Mt C (1.100 a 2.567 Mt CO₂) por ano em 2020; Pacala/Socolow (2004) se referem a 2.000 Mt C (7.333 Mt CO₂), para o horizonte de 2050.

Anualmente, uma redução potencial total de até 16.000 Mt CO₂ pode ser projetada para 2050, se medidas abrangentes forem implementadas para melhorar a eficiência energética nos setores de consumo final. Este volume representa entre 40% e 60% da distância entre a hipótese “BAU” e as reduções ambiciosas de emissões que permitiriam a estabilização das concentrações de CO₂ na faixa de 400 a 450 ppm.

Uma das principais vantagens das estratégias focalizadas na eficiência é que muitas opções reduzem os custos, no âmbito agregado, e as reduções nas emissões seriam alcançadas a um custo adicional zero, ou muito baixo. Os principais problemas para a implementação de medidas de eficiência energética, porém, não são de ordem econômica. Há múltiplos entraves e barreiras estruturais por um lado (desde a falta de informação e motivação, até o dilema usuário-investidor) e uma heterogeneidade de estruturas envolvendo atores, motivações e capacidades, por outro.

As tecnologias de hoje já possibilitam relevantes ganhos na eficiência energética. Além disto, futuras inovações tecnológicas e administrativas terão papéis incrementais ao longo do tempo. O cerne do problema da eficiência energética é manter permanentes esforços para a constante introdução das inovações. Neste campo da eficiência energética, as melhorias alcançadas passo-a-passo e introduzidas imediatamente serão muito mais importantes do que alguns saltos tecnológicos. Os investimentos de longo prazo, como no setor da construção, exigem ações imediatas para aproveitar estas janelas de oportunidade.

Avanços na eficiência do próprio setor energético

No setor energético em particular, o progresso tecnológico tem sido significativo nos últimos anos. Durante os próximos anos e décadas podemos esperar ainda mais ganhos na eficiência, se for mantida a dinâmica atual de pesquisa e desenvolvimento. Em vez da média global de 30% a 35% hoje, a eficiência da combustão em usinas de carvão pode chegar a 50% e a das usinas à base de gás natural até 65%, em um futuro próximo (EK 2002). Em um prazo um pouco maior, a eficiência de turbinas a gás de ciclo combinado poderia se aproximar aos 70%, enquanto as novas turbinas super-críticas a vapor podem alcançar uma eficiência de 55% dentro de 20 anos.

Um ganho bem maior na produção eficiente de energia elétrica poderia ser à base da produção conjunta de calor e energia (CHP, em inglês), ou até de calor, energia e refrigeração (CHPC). O uso do calor residual da geração de eletricidade para aquecer processos industriais, ou até para a refrigeração, poderia elevar a eficiência total destas usinas CHP e CHPC a 90%. Esta técnica pode ser aplicada em instalações de grande escala gerando centenas de megawatts, para fornecer calor em processos industriais ou em aquecimento de ambientes na vizinhança. Ao mesmo tempo, em micro-instalações CHP de vários kilowatts (Pehnt et al. 2005) há um tremendo potencial para disponibilizar calor para tecnologias CHP eficientes.

Enquanto muitas projeções lineares “BAU” já incorporam uma melhora constante das usinas, e é limitado o potencial adicional para a redução de emissões, o potencial dos sistemas CHP continua longe da plenitude, em projeções recentes. Um cálculo simplificado ilustra a relevância potencial de CHP e CHPC em uma estratégia integrada de redução de CO₂.

Uma produção adicional de energia usando CHP sem biomassa, de 20% da geração global de eletricidade de 30.000 TWh em 2050 (considerado uma redução significativa por conta dos ganhos de eficiência energética) traria uma redução anual de 2.000 Mt de CO₂, apenas pelo ganho de eficiência na produção de energia, sem levar em conta os impactos adicionais da troca de combustíveis.

A troca de combustíveis no setor energético

No cenário BAU, ou “tudo como d’antes”, da AIE (2004), a produção de energia com combustíveis fósseis dominará a oferta de eletricidade no ano 2030. De 2002 até 2030, as usinas de carvão deverão expandir suas capacidades de 1.135 GW até 2.156 GW e as usinas de gás de 893 GW para 2.564 GW. Para o período como um todo, isto representa um crescimento médio anual de 36 GW para o carvão mineral e 60 GW para o gás natural. Considerando também que ao longo destas três décadas (2002-2030) perto da metade da capacidade instalada terá que ser substituída por novas usinas, terão que ser inauguradas todos os anos usinas de carvão com capacidade de gerar 57 GW e usinas a gás com capacidade de 76 GW. Estendendo esta projeção para o ano 2050, os novos investimentos em usinas de carvão somariam aproximadamente 2.700 GW, e nas usinas à gás 3.600 GW. Uma decisão a favor de novas usinas de carvão com capacidade de 1 GW equivale a uma decisão a favor de emissões anuais de perto de 4,7 Mt de CO₂ (com a eficiência média de 40% nas novas usinas e um fator de carga de 0,63) ao longo da vida útil (mais de 40 anos) das usinas. Uma estimativa similar para novos investimentos em usinas a gás natural produz uma emissão anual de 1,3 Mt de CO₂ por GW (com a eficiência média de 55% e um fator de carga de 0,40)

Pelo combustível menos intensivo em carbono e pela maior eficiência das usinas a gás, a geração de eletricidade de novas usinas a gás agrega 57% CO₂ do que uma nova usina de carvão. Neste contexto, mais trocas de combustível do carvão para o gás no setor energético abririam um potencial importante para a redução de emissões.

Pacala/Socolow (2004) projetam a substituição de carvão por gás na geração de 28 GW de energia, para alcançar mais reduções de emissões. Isto representa metade do investimento anual em novas usinas de carvão, pelos cálculos que vimos. Se 50% dos novos investimentos em carvão forem trocados por gás natural até o ano 2050, usinas de carvão com emissões totais de 6.300 TM de CO₂ em 2050 seriam substituídas por usinas elétricas movidas a gás, com emissões totais de 2.700 Mt de CO₂. Se todos os novos investimentos que seriam feitos em usinas de carvão fossem trocados por investimentos em usinas a gás, os níveis de emissão

seriam duplicados: 12.700 Mt de CO₂ para o carvão e 5.500 Mt de CO₂ para o gás natural. Se presumirmos a substituição de 50% dos novos investimentos em plantas de carvão, haveria um potencial anual de redução de emissões de 3.600 Mt de CO₂ em 2050.

Evidentemente, os investimentos adicionais em usinas movidas a gás exigirão uma oferta adicional de gás natural. Para a estimativa aproximada que acabamos de ver, a demanda adicional por gás na geração de energia é de 29 EJ para o ano 2030 e 49 EJ em 2050. A demanda por gás no cenário BAU da AIE (2004) é de 176 EJ em 2030. Ou seja, a demanda por gás natural aumentaria em aproximadamente 16%, acima do cenário BAU. A demanda adicional por gás no horizonte de 2050 ficaria na mesma magnitude. No contexto de uma estratégia energética sustentável, este volume de gás natural deveria ser compensado por medidas de eficiência energética, seja em outros setores (por exemplo, na construção) seja no próprio setor energético. A tecnologia chave para reduzir a demanda por gás natural é a produção combinada de calor e energia (CHP) ou de calor, energia e refrigeração (CHPC). Se um quarto das novas usinas a gás forem do tipo CHP ou CHPC, a demanda adicional por gás ficaria 7% menor.

Energia renovável

Os fluxos globais de energias renováveis estão a três ordens de magnitude acima da demanda global atual e projetada por energia primária (Rogner 2000). Já existe uma gama de tecnologias para usar energias renováveis, além de uma variedade maior ainda em vias de desenvolvimento. Os principais desafios para a extensão em grande escala das energias renováveis são os seguintes (Rogner 2000, WBGU 2004):

- Poucas opções de uso de energias renováveis hoje são competitivas frente à energia de fonte fóssil ou nuclear, no atual contexto econômico (sem internalização de externalidades).
- A utilização e a economicidade das energias renováveis são afetadas por vários constrangimentos, como conflitos sobre o uso da terra (ex. biomassa), latitude (ex. energia solar), localização (ex. energia eólica e geotérmica) ou impactos ambientais e tensões sociais (ex. hidrelétricas).
- A distribuição global das fontes atuais e futuras de energias renováveis é muito diferenciada, com um potencial muito menor na Europa (excluindo a ex-União Soviética) e na Ásia do que nas Américas e outros continentes e regiões ricas em energia solar.

A energia renovável já responde por uma parte significativa da oferta global de energia primária. Subsistem, porém, muitas incertezas quanto à sua participação precisa, pois a maior parte das energias renováveis consumidas hoje é de biomassa tradicional, que não constitui uma energia comercial em muitas regiões do mundo. Além disto, as “biomassas tradicionais” (ex. lenha) não podem ser consideradas fontes sustentáveis de energia nessas regiões, por contribuírem para o desmatamento e a desertificação. A Agência Internacional de Energia (AIE 2004) estima que aproximadamente 10% de toda a demanda por energia primária era coberta por biomassa em 2002. A AIE (2004) calcula que aproximadamente 70% do uso global de energia de biomassa é de “biomassa tradicional” com sérios problemas de sustentabilidade. Ao todo, o uso de “biomassa moderna” para a produção sustentável de energia poderia se multiplicar por seis ou mais, usando tecnologias em conformidade com os critérios da sustentabilidade (Rogner 2000, WBGU 2004).

A energia hidrelétrica é a segunda fonte de energia renovável que entra com uma participação mais do que marginal hoje na oferta global de energia primária. Ela representa atualmente

16% da geração mundial de eletricidade, e aproximadamente 6% da oferta global de energia primária. Mesmo existindo um potencial técnico significativo para a extensão do uso da energia hidrelétrica (Rogner [2000] indica um potencial técnico cinco vezes maior do que o uso atual), ela é a opção entre todas as energias renováveis com o menor potencial para futuro crescimento.

Além destas fontes de energia renovável, poucas outras fontes podem desempenhar um papel crescente na oferta primária ao longo das próximas décadas.

Em primeiro lugar, a geração de eletricidade pelo vento cresceu significativamente em anos recentes. De 1990 a 2002, a geração de energia eólica aumentou a uma taxa média de 30% por ano, tanto dentro como fora dos países da OCDE (Turkenburg 2000, AIE 2005). Quanto ao potencial tecnológico para o uso futuro da energia eólica, Rogner (2002) indica 640 EJ, cifra que representa cem vezes mais do que os níveis atuais de geração.

A geração de eletricidade por energia solar ainda está em uma fase preliminar de desenvolvimento. Se bem que a geração fotovoltaica cresceu cerca de 30% por ano recentemente (Turkenburg 2000, AIE 2005), e ainda se espera um crescimento significativo da produção da energia solar térmica nos próximos anos, a contribuição da energia solar para a produção global de energia ainda é muito pequena. Mesmo assim, o imenso potencial da produção de energia solar e o rápido progresso tecnológico poderiam levar a energia solar a participar significativamente na oferta total de energia primária nas próximas cinco décadas (van der Zwaan/Rabl 2004).

O maior potencial tecnológico entre as energias renováveis vem da energia geotérmica, que já produz eletricidade em várias regiões do mundo. Rogner (2000) indica um potencial de 500 EJ produzidos de modo econômico em 10 ou 20 anos, e um potencial economicamente viável de 5.000 EJ em 40 ou 50 anos.

Por último, mas nem por isso menos importante, a energia oceânica (das marés, das ondas, térmica, dos gradientes do sal) poderia fazer uma contribuição imensa à oferta global de energia primária no médio e longo prazo. Rogner (2000) estima um potencial técnico de 7.400 EJ para as variadas opções de uso energético dos mares.

Tabela 6: Custos atuais e futuros da geração de eletricidade com fontes renováveis de energia

PNUD (2000) ICCEPT (2002) Enquete-Kommission (2002)
 atual futuro | atual além de 2020 | atual 2010 2020 2050
 ¢/kWh ct/kWh

| Fonte | PNUD (2000) atual | PNUD (2000) futuro | ICCEPT (2002) atual | ICCEPT (2002) além de 2020 | Enquete-Kommission (2002) atual | Enquete-Kommission (2002) 2010 | Enquete-Kommission (2002) 2020 | Enquete-Kommission (2002) 2050 |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Hidrelétrica | | | | | | | | |
| Eólica terrestre | | | | | | | | |
| Eólica “offshore” | | | | | | | | |
| | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 |
| | 5...13 | 3...10 | 5...13 | 3...10 | 5...13 | 3...10 | 5...13 | 3...10 |
| | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 | 2...10 |
| | 3...5 | 2...3 | 3...5 | 2...3 | 3...5 | 2...3 | 3...5 | 2...3 |
| | 6...10 | 2...5 | 6...10 | 2...5 | 6...10 | 2...5 | 6...10 | 2...5 |
| | 5,5...15 | --- | 5,5...15 | --- | 5,5...15 | --- | 5,5...15 | --- |
| | 4,5...9 | 3...6 | 4,5...9 | 3...6 | 4,5...9 | 3...6 | 4,5...9 | 3...6 |
| | 6,3...10 | 4...6 | 6,3...10 | 4...6 | 6,3...10 | 4...6 | 6,3...10 | 4...6 |
| Fotovoltaica | | | | | | | | |
| Usinas de energia solar térmica (d) | | | | | | | | |
| | 25...125 | 5...25 | 25...125 | 5...25 | 25...125 | 5...25 | 25...125 | 5...25 |
| | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 |
| | 50...80(a) | ~ 8(a) | 50...80(a) | ~ 8(a) | 50...80(a) | ~ 8(a) | 50...80(a) | ~ 8(a) |
| | 30...50(b) | ~ 5(b) | 30...50(b) | ~ 5(b) | 30...50(b) | ~ 5(b) | 30...50(b) | ~ 5(b) |
| | 20...40(c) | ~ 4(c) | 20...40(c) | ~ 4(c) | 20...40(c) | ~ 4(c) | 20...40(c) | ~ 4(c) |
| | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 | 12...18 | 4...10 |
| | 50...100 | 29...58 | 50...100 | 29...58 | 50...100 | 29...58 | 50...100 | 29...58 |
| | 8...16 | 5...6 | 8...16 | 5...6 | 8...16 | 5...6 | 8...16 | 5...6 |
| Biomassa | | | | | | | | |
| Geotérmica | | | | | | | | |
| Oceânica | | | | | | | | |
| | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 |
| | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 |
| | 8...20 | 5...15 | 8...20 | 5...15 | 8...20 | 5...15 | 8...20 | 5...15 |
| | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 | 5...15 | 4...10 |
| | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 | 2...10 | 1...8 |
| | 3,5...30 | --- | 3,5...30 | --- | 3,5...30 | --- | 3,5...30 | --- |
| | ---- | | ---- | | ---- | | ---- | |

Notas:

- a a 1.000 kWh/m² (Europa Central).
- b a 1.500 kWh/m² (Europa Mediterrânea).
- c 2.500 kWh/m² (Regiões do Sul).
- d em localidades com 2.500 kWh/m²

Fonte: Turkenburg (2000), ICCEPT (2002), EK (2002).

Mesmo assim, e apesar do tremendo potencial técnico para o uso de energias renováveis para a geração de eletricidade, uma barreira central para a expansão do uso de renováveis é sua competitividade econômica. À parte as hidrelétricas e certas opções de biomassa, a maioria das tecnologias para a geração com energias renováveis está em fase inicial de desenvolvimento. Muitos estudos prevêem custos bem menores, se houver uma intensificação

da pesquisa e desenvolvimento e uma rápida introdução ao mercado. Muitas opções de geração com energias renováveis demonstraram significativos “efeitos pelo aprendizado” ao serem introduzidas rápida e amplamente ao mercado. (AIE 2000)

A Tabela 6 indica diferentes projeções de custos para tecnologias chaves na geração com energias renováveis. Este panorama destaca a redução significativa de custos previsível para as próximas duas décadas, principalmente para a energia eólica, geração com biomassa e energia geotérmica. A médio e longo prazo (mais que duas décadas), a energia solar e a geração de eletricidade com energias oceânicas podem revelar custos significativamente menores.

Figura 6: Projeções da contribuição de energias renováveis à oferta total de energia primária (OTEP), 2002-2050

EJ

1,800

1,600

1,400

1,200

1,000

800

600

400

200

Oferta Total de Energia Primária (“BAU”)

Outras Energias Renováveis

Energia Geotérmica

Calor Solar

Eletricidade Solar *

Vento*

Biomassa Moderna

Biomassa Tradicional

Hidrelétrica*

* O equivalente em energia primária da geração de eletricidade de fontes nuclear, hidro, vento e solar foi ajustado usando um fator de conversão de 0,33 para todas as estatísticas e projeções.

0

AIE

OTEP*

WBGU

Shell

OTEP*

WBGU

Shell

OTEP*

2002

2020

2050

Fontes: WBGU (2004), Shell (2002), AIE (2004), estimativas do autor e cálculos.

A Figura 6 oferece um panorama de duas diferentes projeções para o crescimento futuro de energias renováveis.⁹ As duas presumem fortes intervenções políticas para alcançar um sistema energético sustentável em escala global. Dependendo da presunção quanto à oferta total futura de energia primária, de 50% a 100% da oferta total de energia primária poderia ser suprida com energias renováveis. A comparação, no entanto, também indica variações entre as avaliações das contribuições de cada energia renovável. Enquanto Shell (2002) prevê taxas comparáveis de crescimento para a biomassa, o vento e a energia solar em seu cenário “Espírito da nova era”, o WBGU (2004) apresenta um potencial de crescimento muito mais agressivo e de saltos tecnológicos para as energias eólica e solar, e um incremento bem menos significativo para o uso da biomassa no setor energético. Nas duas projeções, a energia geotérmica terá um papel significativo.

Resumindo, as energias renováveis poderiam suprir plenamente, ou em grande medida, a demanda futura por energia primária, do ponto de vista técnico. Porém, algumas tecnologias para expandir a adoção de energias renováveis ainda estão nos primórdios de seu desenvolvimento. O ICCEPT (2002) indica as seguintes agrupações de energias renováveis para a geração de eletricidade:

- Tecnologias maduras: biomassa (em co-combustão, ou “co-firing”), hidrelétricas grandes e pequenas, barragens de marés, placas fotovoltaicas fora da malha;
- Tecnologias emergentes à beira da maturidade: usinas eólicas terrestres, placas fotovoltaicas para edifícios, biomassa (combustão);
- Tecnologias emergentes: usinas eólicas “offshore”, biomassa (gaseificação);
- Tecnologias conceituais à beira de virarem emergentes: placas fotovoltaicas avançada, fluxo de ondas e de marés, biomassa (hidrólise), geotérmica (pedra seca quente/HDR);
- Tecnologias conceituais: hidrogênio fotossintético

⁹ Para os propósitos deste estudo, os dados das várias fontes foram ajustados para uma metodologia comum. As estatísticas amplamente usadas da AIE levam em conta o conteúdo energético da eletricidade (3.6 MJ/kWh) de fontes hídricas, eólicas e solares para a conversão em energia primária. Para a geração de energia nuclear, a AIE presume uma eficiência de conversão de 33%. À diferença dessa definição, as projeções do PIMC (2000) não usam a mesma conversão para a energia nuclear, mas o conteúdo energético da eletricidade. Para os propósitos deste estudo, a eletricidade produzida por energia nuclear, hidrelétricas, eólica e solar foi convertida em energia primária com um fator de conversão de 33%, para permitir uma comparação adequada das contribuições da geração de energias fóssil, nuclear e renováveis à oferta primária energética.

Esta longa lista de opções tecnológicas oferece suficiente flexibilidade para os diferentes cenários dos avanços e progressos tecnológicos visando a redução de custos para a geração de eletricidade a partir de energias renováveis. A maior contribuição poderia vir da biomassa, do vento e das hidrelétricas, até 2020. Para os horizontes além de 2020, o principal desafio será o volume de energia que poderá ser gerada com tecnologias solares, e a extensão do uso das opções de geração eólica, geotérmica e oceânica.

Mesmo assim, grandes esforços serão necessários para melhorar o retorno econômico das várias tecnologias, alcançar novos saltos tecnológicos e construir a infra-estrutura necessária. Uma questão chave para a infra-estrutura será a geração intermitente com usinas fotovoltaicas e eólicas. Um sistema de oferta de energia com grande participação de fontes intermitentes criará exigências totalmente novas para as malhas e para a flexibilidade de outras fontes de eletricidade. Os avanços alcançados nos últimos anos (modelos maduros de prognóstico, desenvolvimento de tecnologias altamente eficientes e flexíveis de geração a gás, etc.) revelam como a integração de fontes intermitentes de eletricidade deve ser encarada mais como desafio do que como barreira para a adoção generalizada de energias renováveis no setor elétrico. No entanto, para as fontes renováveis também há constrangimentos ecológicos e sociais a considerar. Em certas regiões do mundo há limitações de localização para a geração eólica, enquanto algumas tecnologias oceânicas (barragens de maré) e usinas hidrelétricas provocam impactos ambientais e sociais negativos locais.

Neste contexto, destaca-se que grandes avanços tecnológicos e ganhos econômicos na geração de eletricidade com energias renováveis elevarão enormemente o potencial para a geração de eletricidade em um prazo relativamente curto. Se forem reduzidos os custos da energia solar e inclusive das tecnologias eólicas e de biomassa e se a infra-estrutura necessária for disponibilizada, o sistema de energia se transformará rapidamente. Em outras palavras, se a contribuição de energias renováveis para a oferta global de energia primária superar os níveis relativamente baixos no futuro, elas dominarão a estrutura de energias primárias a partir de meados deste século. É difícil imaginar um “caminho do meio” para a contribuição das energias renováveis.

Captura e armazenamento de carbono

Uma das tecnologias emergentes para reduzir a liberação de gases de efeito estufa na atmosfera é a captura e seqüestro de carbono (CSC). A CSC abrange tecnologias para a coleta e concentração de CO₂ de várias fontes, seu transporte para lugares adequados de armazenamento, e seu armazenamento durante longos períodos de tempo. A CSC poderia ser aplicada para o CO₂ da queima de combustíveis fósseis ou de processos industriais, ou então para as emissões de CO₂ pela combustão de biomassa sem emissões líquidas de carbono (“carbon neutral”). Esta última opção representaria um sumidouro líquido para as emissões de CO₂, e deveria assumir um papel nas políticas climáticas de longo prazo.

Mesmo já existindo algumas tecnologias maduras ou economicamente viáveis na cadeia da CSC, novas tecnologias também devem ser desenvolvidas ou melhoradas, e grandes esforços serão necessários para alcançar um sistema integrado de CSC, que seja confiável em termos de tecnologia, viabilidade econômica e aceitação pública. A captura e armazenamento de carbono depende de intensas atividades de pesquisa e desenvolvimento, e hoje passa por profundas análises e avaliações (ver PIMC 2005, AIE 2004b+2005b).

Do lado econômico, a captura de CO₂ é a chave para a opção CSC. O principal desafio está em que a captura do CO₂ exige uma grande quantidade de energia, reduzindo significativamente a eficiência das usinas elétricas. A captura das emissões de CO₂ poderia diminuir a eficiência da geração de eletricidade em quase 10%, e comprometeria boa parte do progresso tecnológico dos últimos 20 anos. Além disso, as taxas efetivas de captura não implicam uma usina livre de emissões, já que a redução líquida de CO₂ varia de 80% a 90% para as tecnologias preferidas (PIMC 2005). A captura de carbono poderia proceder de várias tecnologias:

- captura pós-combustão,
- captura pré-combustão,
- captura com tecnologia oxi-combustível (combustão com oxigênio puro),
- captura de processos industriais (ex. produção de aço ou de amônia),

Para as opções de pré-combustão e de captura com tecnologia oxi-combustível, a tecnologia de geração terá que passar por uma transição fundamental. Apesar destas tecnologias já existirem em plantas demonstrativas (de gaseificação integrada com ciclo combinado, ou IGCC) ou em programas para projetos demonstrativos, ainda não há evidência suficiente da viabilidade econômica destas tecnologias. A tecnologia IGCC em particular perdeu a concorrência com as turbinas a vapor, usando parâmetros críticos e supercríticos, nas últimas duas décadas. As usinas elétricas que queimam carvão pulverizado em turbinas convencionais a vapor demonstraram uma correlação muito melhor com as exigências das operações comerciais cotidianas do que a tecnologia mais inovadora e mais eficiente da IGCC.

O transporte do CO₂ poderia contar com tecnologias existentes (gasodutos, transporte marítimo) e será menos intensivo em custos se as distâncias ficarem na faixa de 200 a 300 km. Se for preciso passar por distâncias muito maiores entre as fontes de CO₂ e os locais de armazenamento, os custos de transporte também pesarão significativamente nos custos.

Existem três grandes opções para armazenar o CO₂. O CO₂ pode ser injetado em formações geológicas, ou no fundo dos mares (em profundidades maiores que 1.000 m), ou pode ser mineralizado para armazenar os minerais em lugares adequados. Destas três opções, apenas a do armazenamento em formações geológicas é vista como aceitável à luz dos conhecimentos atuais. Existe alguma evidência de danos que seriam causados pela injeção de volumes significativos de CO₂ no fundo do mar, para ecossistemas marinhos. Os impactos das injeções de CO₂ para ecossistemas marinhos em grandes áreas oceânicas, a longo prazo, são simplesmente desconhecidos. A carbonização mineral do CO₂ induziria imensos fluxos de materiais, a necessidade de disposição final para produtos em grande escala, e outros problemas ambientais. Por exemplo, o processo de carbonização consumiria de 1,6 a 3,7 toneladas de silicatos por tonelada de CO₂ armazenado, e produziria de 2,6 a 4,7 de toneladas de material para disposição final. Estes fluxos de material e os processos relacionados (mineração, esmagamento, moagem, transporte e disposição) também teriam custos relativamente altos.

Em consequência, o armazenamento em formações geológicas (campos exauridos de petróleo e gás, veios de carvão não exploráveis, formações salinas profundas) deve ser visto como a principal opção de CSC nas próximas décadas. O PIMC (2005) indica uma faixa de 200 até 2.000 bilhões de toneladas de CO₂ como potencial econômico da CSC ao longo do próximo século. A faixa inferior é qualificada pelo PIMC como “quase certa” (probabilidade de 99% ou mais), e o limite superior como “provável” (probabilidade de 66% a 90%). Neste contexto,

a CSC poderia fazer uma contribuição significativa para a redução de emissões a longo prazo. No entanto, a CSC vai representar uma opção temporária de mitigação, já que a capacidade de armazenamento deve ser vista como finita.

A Tabela 7 indica as faixas de custo para os vários componentes de um sistema de CSC. Para o caso de armazenamento em formações geológicas, a captura de CO₂ responde pela maior parte do custo. O transporte do CO₂ sobre longas distâncias, por um lado, aumentaria os custos de um sistema de CSC. Por outro lado, usar o CO₂ capturado para incrementar a recuperação de petróleo (EOR) ou do metano em minas de carvão (ECBM) traria benefícios econômicos que reduziriam os custos do sistema CSC. Porém as oportunidades para aproveitar tais benefícios seriam reduzidas significativamente, no contexto de metas muito ambiciosas para a redução de emissões. No total, os custos de compensação via CSC – entre \$15 e \$90/t CO₂ – são comparáveis aos de muitas fontes renováveis de energia.

Tabela 7: Faixas de custos para os componentes de um sistema CSC de novas instalações em grande escala

| Componentes do sistema CSC | Faixa de custos | Comentários |
|----------------------------|-----------------|-------------|
|----------------------------|-----------------|-------------|

Captura

Captura de uma usina a carvão ou a gás

15...75 US\$/tCO₂ Captura líquida

Custo líquido do CO₂ capturado comparado com a mesma usina sem captura.

Captura da produção de hidrogênio e amônia, ou do processamento de gás

5...55 US\$/tCO₂ Captura líquida

Aplica-se a fontes de alta pureza que exigem secagem simples e compressão.

Captura de outras fontes industriais

25...115 US\$/tCO₂ Captura líquida

Faixa reflete o uso de várias tecnologias e combustíveis diferentes.

Transporte

1...8 US\$/tCO₂ transportado

250 km em gasoduto ou como carga, para taxas de fluxo em massa de 5 (limite superior) a 40 (limite inferior) Mt CO₂/ano.

Armazenamento

Armazenamento Geológico(a)

0.5...8 US\$/tCO₂ Injeção líquida

Exclui receitas potenciais de EOR ou ECBM.

Armazenamento Geológico: monitoramento e verificação

0.1...0.3 US\$/tCO₂ Injeção

Abrange pré-injeção, injeção e monitoramento pós-injeção, e depende de exigências regulatórias.

Armazenamento oceânico

5...30 US\$/tCO₂ Injeção líquida

Inclui o transporte marítimo de 100-500 km, sem contar monitoramento e verificação.

Carbonização mineral

50...100 US\$/tCO₂ Mineralização líquida

Faixa observada no melhor caso estudado. Inclui energia adicional gasta na carbonização.

Note: (a) A longo prazo, podem surgir custos adicionais para remediação e responsabilidades civis.

Fonte: PIMC (2005).

Alguns riscos associados a sistemas CSC se referem ao armazenamento do CO₂. Riscos globais surgem do potencial de vazamento parcial do CO₂ armazenado para a atmosfera. Tal vazamento voltaria a contribuir para o aquecimento global. A seleção dos locais para o armazenamento de CO₂ deve responder à necessidade de manter o CO₂ armazenado nos reservatórios durante prazos de 100 a 1.000 anos. Com relação a riscos locais, uma liberação súbita e rápida de CO₂ (por falha de poço, etc.) ameaçaria a vida e a saúde humana. Vazamentos lentos e difusos impactariam lençóis freáticos e ecossistemas, ou causariam a acidificação de solos. Muitos destes riscos seriam repelidos pela seleção e projeção adequadas dos locais de armazenamento e por estratégias abrangentes de monitoramento e remediação. Se bem que estes riscos não devem ser subestimados, algumas poucas opções para reduzir os perigos associados estão disponíveis e devem ser implementadas.

Mesmo assim, muitos problemas terão que ser resolvidos para estabelecer a CSC como opção eficaz para estratégias ambiciosas de redução de emissões. Além dos problemas tecnológicos, econômicos e de segurança, há grandes preocupações com a responsabilidade civil, propriedade, embasamento jurídico e também monitoramento e verificação, que terão que ser superadas antes de a CSC constituir uma opção eficaz de redução.

As avaliações da contribuição da CSC para a redução de emissões globais variam muito, para o horizonte temporal das próximas cinco décadas. O PIMC (2005) prevê que a maioria dos projetos CSC serão implementados na segunda metade do século. Em contraste, o WBGO (2004) presume uma contribuição significativa anual pela CSC para a redução de emissões (>15 Gt CO₂) já em 2050. Pacala/Socolow (2004) presumem uma redução de emissões de 3,7 Gt CO₂ das usinas elétricas de carga básica movidas a carvão com capacidade de 800 MW e das usinas de carga básica a gás natural com capacidade de 1.600 MW, equipadas com SCS em meados deste século.

Se o desenvolvimento tecnológico receber um tremendo impulso e os problemas pendentes (confiabilidade dos reservatórios, infra-estrutura, questões jurídicas, etc.) forem resolvidos, além de haver aceitação pública pela CSC, estes sistemas poderiam contribuir para a redução de emissões em 2050 com vários bilhões de toneladas de CO₂. Em uma primeira fase, a implementação da CSC ocorrerá em países industrializados, enquanto a expansão global dependerá de muitos fatores (infra-estrutura, capacidades institucionais, etc.). A CSC, porém, ainda pertence ao grupo de opções emergentes para a redução de emissões, apesar de contar com alguns componentes maduros.

Conclusões preliminares

A percepção de que nenhuma opção por si só será suficiente para alcançar a redução de emissões necessária para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em níveis que limitem o aquecimento global a dimensões toleráveis é denominador comum no debate sobre o clima. A questão da eliminação de qualquer uma das opções da carteira de medidas de redução é muito mais difícil e polêmica.

Se presumirmos um lapso a ser fechado entre a tendência atual (“BAU”) para emissões de CO₂ e a redução necessária de emissões (induzida, por exemplo, pela “meta de 2°C”) fica na faixa de 25 a 40 Gt de CO₂ em 2050, chegamos aos seguintes resultados, com base em estimativas grosseiras para cada opção de redução:

- cerca de 5 Gt CO₂ da expansão da geração de energia nuclear até três vezes a capacidade atual;
- cerca de 4 Gt CO₂ da melhora na eficiência dos edifícios;
- cerca de 5 Gt CO₂ da melhora na eficiência energética e de materiais em setores industriais;
- cerca de 7 Gt CO₂ da melhora na eficiência energética no setor de transportes;
- cerca de 2 Gt CO₂ da melhora na eficiência energética no setor energético (sem troca de combustível);
- cerca de 3.6 Gt CO₂ da troca de combustível (de carvão para gás) no setor elétrico;
- cerca de 15 Gt CO₂ (ou mais) das energias renováveis (nos setores elétrico e de calefação);
- entre 4 a 10 Gt CO₂ da captura e seqüestro de carbono.

Ao todo, podem estar disponíveis no ano 2050 opções para reduzir as emissões para 45 a 55 Gt CO₂ abaixo das projeções lineares (“BAU”). Neste contexto, a contribuição da energia nuclear não consta como indispensável, mesmo para um caminho muito ambicioso de redução de emissões. Existem em diferentes dimensões, porém, incertezas, riscos e interações para todas as opções:

- Apesar de o aquecimento global e a energia nuclear apresentarem riscos diferenciados, a tensão principal é a que existe entre estes dois desafios. Mesmo havendo alguns riscos para a saúde e os ecossistemas em opções desde as energias renováveis até a CSC, nenhuma outra opção de redução por si só apresenta riscos comparáveis para a saúde, para os ecossistemas e para os sistemas sociais e econômicos como os associados à energia nuclear.
- À diferença das energias renováveis e a CSC, a opção nuclear já tem fortes vínculos ao sistema de energia elétrica, e ainda os terá ao menos no futuro próximo. As energias renováveis e a CSC exigem uma transição fundamental para o sistema elétrico (novas tecnologias básicas, transformação da estrutura geográfica, integração de malhas, etc.). Porém, se a energia nuclear puder contribuir significativamente à redução de emissões, grandes mudanças na cadeia tecnológica (reprocessamento, tecnologia de reatores) serão necessárias dentro de duas a três décadas. Persistem ainda muitas incertezas quanto à viabilidade desta proposta.
- As mudanças na cadeia tecnológica da energia nuclear exigem preparações de longa preparação (desde a mineração até a disposição de resíduos), e muitas incertezas precisam ser explicitadas para preparar todos os elos da cadeia oportunamente.
- As exigências associadas a uma maior participação de energias renováveis e de CSC na oferta de energia para o sistema elétrico (maior flexibilidade, integração da descentralização e centralização, manejo da produção intermitente de energia, melhora da infra-estrutura para a eletricidade e CO₂) podem entrar em conflito com as da energia nuclear renovada (grandes unidades, estruturas centralizadas de malha, pouca flexibilidade).
- As únicas opções de redução com vínculos parecidos ao sistema elétrico atual são a troca de combustíveis e a melhora da eficiência do setor energético (inclusive com CHP). Apesar de terem contribuições limitadas ao longo do tempo, estas duas opções podem desempenhar papéis importantes no início da transição do sistema elétrico.
- As opções com maior potencial de eficiência econômica (várias formas de melhorar a eficiência energética) exigem intervenções políticas abrangentes, devido à multiplicidade de entraves à implementação de medidas de eficiência energética. Este problema é diferente

quando se trata de medidas de implementação imediata no setor energético. Um nível satisfatório de preços para o CO₂ (e um esquema adequado de trocas de emissões, etc.) poderia dar o pontapé para as medidas necessárias.

- As opções-chaves para a redução a médio prazo (algumas energias renováveis, CSC) não são competitivas com a energia nuclear a curto prazo, desde que as externalidades da energia nuclear continuem ocultas (responsabilidade e seguros, custo do descomissionamento, etc.) e outras distorções também sobrevivam (subsídios diretos ou indiretos). Se a energia nuclear fizer mais do que estagnar nas próximas décadas (se não, sua contribuição para reduzir as emissões será pífia), ela enfrentará importantes desafios econômicos na forma de mudanças que terão que ser feitas na cadeia tecnológica. Nesta perspectiva, o caminho nuclear pode acabar sendo o caminho errado.
- Nenhuma outra tecnologia na carteira de opções de redução ostenta tamanho potencial de mobilização. Se ocorressem um ou mais acidentes em unidades nucleares (inclusive as de enriquecimento, reprocessamento e disposição), a aceitação do caminho nuclear iria à água abaixo em pouco tempo. Isto seria desastroso para uma política para o clima que contasse com a energia nuclear para dar uma contribuição significativa na redução de emissões.

Se estas complexas interações forem consideradas, será necessário e possível desenvolver cuidadosamente estratégias para o curto, médio e longo prazo. Se a energia nuclear não for considerada indispensável (como se desprende da análise que acabamos de ver), então no curto prazo a troca de combustível do carvão para o gás no setor elétrico poderia ser a prioridade nas próximas duas ou três décadas, em conjunto com grandes esforços para melhorar a eficiência energética nos setores de geração e de consumo final. Esta seria a ponte para a era quando a curva de aprendizagem para as energias renováveis tiver reduzido consideravelmente seus custos, e os esforços de PeD com a CSC também mostrarem resultados.

6 Estratégias-chaves: um estudo de caso sobre a Alemanha

Para avaliar a gama de opções e estratégias para a redução de emissões para um país altamente industrializado, a Comissão de Estudos (Enquete-Kommission) sobre “Energia Sustentável no contexto da globalização e da liberalização” do Bundestag Alemão contratou um exercício de modelagem para analisar diferentes estratégias para alcançar uma redução de 80% nas emissões de CO₂ (comparado com os níveis de 1990) até o ano 2050 (EK 2002).

O objetivo principal do exercício era identificar o padrão da oferta de energia e seus desdobramentos em uma política ambiciosa para o clima. Na análise, foram desenvolvidos quatro cenários diferentes (também sujeitos a uma análise abrangente de sensibilidade):

- Em um “Cenário de Referência”, as atuais políticas e medidas são projetadas para o futuro, sem uma política ambiciosa para o clima para além do horizonte temporal de 2012.
- Em um cenário de “Renováveis e Eficiência”, a meta de reduzir em 80% as emissões de CO₂ deve ser alcançada sem contar com a captura e sequestro de carbono ou com a energia nuclear (presumindo a estratégia alemã atual de eliminação atual).
- Em um cenário de “Foco no Setor Energético”, a opção de captura e sequestro de carbono também foi incluída.
- Em um cenário de “Mistura de Energias Fósil e Nuclear”, a opção nuclear foi incluída, junto com todas as outras opções para a redução de emissões.

O exercício de modelagem foi realizado com diferentes modelos de simulação e de otimização, para garantir resultados robustos. A Figura 7 fornece um resumo dos resultados da modelagem.

No cenário de referência (tipo “BAU”), observa-se uma pequena redução na oferta de energia primária enquanto as emissões de CO₂ diminuiriam até um nível 20% abaixo do nível de 1990, configurando uma redução adicional de emissões na ordem de 10 pontos percentuais comparado com o nível alcançado em 1998. Mantém-se aproximadamente a mesma estrutura de energia primária, com uma redução no consumo de óleo mineral e um pequeno aumento nas energias renováveis. Estas tendências no tempo surgem das tendências demográficas e da melhora autônoma da eficiência energética na economia nacional.

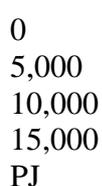
Se for para alcançar uma redução de 80% das emissões de 1990 com base na melhora da eficiência energética e na maior participação de energias renováveis, a oferta de energia primária cairia significativamente. Comparado com o cenário de referência, os ganhos da eficiência energética somariam 13%. Aproximadamente 48% da oferta total de energia primária viria de energias renováveis, com contribuições especialmente significativas da biomassa e da energia eólica. O consumo do carvão (mineral e lignita) seria gradualmente eliminado até 2030, e o de gás natural e de óleo mineral diminuiriam significativamente. Porém o consumo de gás natural e de óleo ainda representaria 40% da oferta total de energia primária em 2050. Vale destacar que, por causa da situação geográfica da Alemanha, a importação de eletricidade de regiões com maior potencial para a geração à base de energias renováveis responderia por 9% da oferta total de energia primária.

Figura 7 Oferta de energia primária e emissões de dióxido de carbono, cenários do estudo de caso sobre a Alemanha

a) Cenário de Referência



b) Redução de 80% nas Emissões de CO₂ – Foco: Eficiência Energética e Energias Renováveis



0
500
1,000
1,500
Mt CO2
1990 1995 1998 2010 2020 2030 2040 2050

c) Redução de 80% nas Emissões de CO2 – Foco: Captura e Seqüestro de Carbono

0
5,000
10,000
15,000
PJ
0
500
1,000
1,500
Mt CO2
Captura e Seqüestro de Carbono
1990 1995 1998 2010 2020 2030 2040 2050

d) Redução de 80% nas Emissões de CO2 – Foco: Energia Nuclear

15,000

1990 1995 1998 2010 2020 2030 2040 2050
1,500

PJ

10,000

1,000

5,000

500

0

0

Carvão Mineral

Lignita

Óleo Mineral

Gás Natural

Nuclear

Hidro, Eólica & PV

Outras Renováveis

Importação de Eletricidade

Emissões de CO2

Mt CO2

Fonte: EK (2002).

Se a opção de redução via CSC for incorporada, a estrutura da oferta de energia primária será muito diferente. Mesmo presumindo grandes esforços a favor da eficiência energética nos setores de uso final, o nível de oferta total de energia primária fica apenas 4,5 abaixo do nível do cenário de referência. Isto se deve principalmente à demanda adicional por energia resultante da CSC, que começaria a ser implementada em 2030 e que poderia recuperar perto de 260 Mt de CO2 em 2050. A participação das energias renováveis, porém, também crescerá significativamente neste cenário, respondendo por 38% em 2050. A disponibilização da CSC voltará a deixar atraente o uso de carvão para a geração de energia. A participação do gás natural na estrutura total de energia primária será em grande medida descolada pela eficiência energética e por energia renovável.

Se a estratégia de redução de emissões enfatizar principalmente a energia nuclear, esta energia dominará a estrutura de energia primária no ano 2050. A energia nuclear substituirá inteiramente o uso do carvão e a CSC não competirá com a energia nuclear. À diferença da CSC, algumas energias renováveis serão atraentes (principalmente a biomassa e a energia eólica), participando com 23%. O nível da oferta de energia primária ficará acima do nível no cenário de referência, basicamente por causa da conversão de eletricidade em energia primária com o baixo fator de conversão de 33% (ou seja, apenas um recurso estatístico), e também pela falta presumida no exercício de outros esforços (políticos) para melhorar a eficiência energética nos setores energético e de uso final. O óleo mineral e o gás natural desempenham um papel menor neste cenário, enquanto o setor de transportes passa completamente para o hidrogênio produzido em usinas nucleares.

Como ficou demonstrado na análise de cenários, a estratégia de redução de emissões não depende muito do potencial das diferentes agrupações de medidas de redução. A não ser no cenário nuclear (onde graves questões seriam levantadas independente deste caminho ser tomado como viável ou não), a variedade de opções de redução possibilita diferentes estratégias. Em outras palavras, a carteira de opções para a redução de emissões inclui mais opções do que o necessário para atingir uma redução de emissões de 80% até 2050.

Figura 8 Custos cumulativos e anuais per capita para os diferentes cenários

€(1998)/cap

-1,500

-1,000

-500
0
500
1,000
1,500
2,000
2,500

CSC Eficiência e renováveis Nuclear
Custos cumulativos 1998-2050, comparados à referência
(descontado para 1998)

CSC Eficiência e renováveis Nuclear
Custos anuais em 2050
(descontado para 1998)

€(1998)/cap
-75
-50
-25
0
25
50
75
100
125

Fonte: EK (2002).

Os custos relacionados aos diferentes cenários (Figura 8) levantam duas observações principais. Em primeiro lugar, persistem incertezas importantes e diferenciadas para os dois cenários. A variedade de tecnologias usadas no cenário focado na eficiência e nas renováveis faz com que a faixa de preços seja maior do que nos cenários em que uma só tecnologia assume um papel mais dominante. Segundo, comparados com os custos totais do sistema, os custos da redução não são baixos mais ficam em um nível aceitável. Os custos da redução em 2050 chegam a, no máximo, 2% do produto interno bruto (PIB real). A avaliação do cenário nuclear depende em grande medida das presunções quanto aos custos futuros das tecnologias nucleares. Se a análise for baseada em presunções relativamente “otimistas”, o uso da energia nuclear será atraente. Se forem usados parâmetros mais “pessimistas” para os custos, estes serão comparáveis com os outros cenários. Porém, se além dos desafios da mudança climática, forem considerados também os custos externos da energia nuclear (com uma ampla gama de presunções sobre as quais não há consenso), as diferenças de custo entre o cenário nuclear e os outros diminuem muito ou lavam a vantagens de custos para os cenários sem energia nuclear.

Se bem que nem todos os resultados do exercício de modelagem na Alemanha podem ser extrapolados para outros países e regiões, e persistem muitas incertezas e sensibilidades nestas projeções a longo prazo, podemos extrair algumas lições básicas:

- Existe uma plêiade de opções de redução para elaborar estratégias robustas para caminhos ambiciosos de redução de emissões. A eficiência energética e as energias renováveis terão papéis em todas as estratégias, mas não há argumento algum para fazer da energia nuclear uma opção indispensável.
- Os custos da redução não são desprezíveis para alcançar metas ambiciosas de redução de emissões. A 2% do PIB em 2050, porém, ficam em um patamar aceitável, comparados aos custos do aquecimento global. O nível da meta de redução de emissões terá um impacto muito mais importante sobre os custos, do que a composição da carteira de opções para a redução.
- Além do risco do aquecimento global e os custos da redução das emissões, outros riscos precisam ser considerados também. Há graus suficientes de liberdade para permitir a implementação de uma estratégia geral de minimização de riscos.

O debate ainda em curso quanto à magnitude dos custos externos do aquecimento global e também da energia nuclear indica que o cerne do problema envolve decisões sobre valores. Esta conclusão não deve ser aplicada apenas ao desafio do aquecimento global. Uma estratégia de minimização de riscos, com metas ambiciosas de redução de emissões e a eliminação gradual da energia nuclear, é viável em termos de seu potencial e aceitável em termos dos custos. O padrão de risco específico da energia nuclear deixaria muito mais vulneráveis, em termos de sua solidez e potencial inovador, as estratégias ambiciosas para o clima que dessem à energia nuclear um papel preponderante.

7 Conclusões

O aquecimento global deverá ser um dos desafios mais importantes do Século XXI. A magnitude dos danos potenciais e a longa escala temporal dos impactos e respostas constituem um padrão especial de risco (tipo “Cassandra”). No entanto, a mudança climática não é o único grande risco para a saúde, os ecossistemas e as estruturas sociais e econômicas. As conseqüências potenciais da energia nuclear (acidentes desastrosos, disposição de resíduos, proliferação, etc.) constituem um padrão de risco diferente (tipo “Dâmocles”) que também deve ser considerado com seriedade. A percepção de que nenhuma opção de redução por si só será suficiente para alcançar a redução de emissões necessária para estabilizar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera em níveis que limitem o aquecimento global a uma dimensão tolerável faz parte do conhecimento já partilhado no debate sobre o clima. A questão de se opções isoladas de redução, como a energia nuclear, poderiam ou deveriam ser eliminadas da carteira de medidas de redução é muito mais difícil e polêmica. Uma análise das interações entre as diferentes opções de redução demonstra que, além do fato de a energia nuclear não ser indispensável em estratégias ambiciosas de redução de emissões, o caminho nuclear pode não só ser o caminho errado, mas também criar um potencial de obstrução.

- Algumas necessidades de infra-estrutura e de flexibilidade para o sistema elétrico com energias renováveis e CSC podem ser comprometidas pelas exigências da geração de energia nuclear, se esta crescer de maneira significativa.
- Enquanto se pode presumir efeitos do aprendizado e uma redução de custos com as energias renováveis e a CSC a médio prazo, a energia nuclear vai causar uma carga adicional de custos nos mesmos prazos, se a cadeia nuclear passar por um ajuste profundo em razão da disponibilidade de recursos, problemas não resolvidos de resíduos, etc.
- A contribuição mais importante para reduções ambiciosas de emissões, na perspectiva da eficiência dos custos, virá de uma grande melhora da eficiência energética tanto no setor

energético como nos setores de uso final. Devido aos múltiplos entraves e barreiras, serão necessários esforços políticos de longo prazo para desenvolver estes potenciais. A polêmica sobre a energia nuclear frequentemente mascara esta necessidade.

Considerando este emaranhado de interações, um conjunto de estratégias para o curto, médio e longo prazo é necessário e possível. Se a energia nuclear não for vista como indispensável a curto prazo, a troca de combustíveis do carvão para o gás no setor elétrico deve ser enfatizada nas próximas duas a três décadas, em conjunto com grandes esforços para melhorar a eficiência energética nos setores de energia e de consumo final. Este enfoque seria uma ponte para a era quando a curva de aprendizado sobre as energias renováveis tiver deitado significativamente seus custos, e quando os esforços de P&D sobre a CSC trouxer resultados.

A análise apresentada neste estudo indica que uma estratégia geral de minimização de riscos pode ser desenvolvida e implementada. Metas ambiciosas de redução de emissões podem ser atingidas com ou sem a energia nuclear, incorrendo custos que não extrapolam a capacidade de sociedades modernas. No contexto da transformação necessária e fundamental do sistema energético global, uma estratégia para o clima sem energia nuclear enseja uma estratégia provavelmente mais inovadora e mais sólida.

8 Referências

Blasing, T.J.; Jon, S. (2005): Current Greenhouse Gas Concentrations. Atualizado em fevereiro de 2005. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory (http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current_ghg.html)

Ecofys (2004): Options for the second commitment period of the Kyoto Protocol. Report for the German Federal Environmental Agency. Colônia, novembro de 2004.

EK (Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung" des 14. Deutschen Bundestages) (2002): Bericht der Enquete-Kommission. Bundestags-Drucksache 14/9400.

Ewers, H.-J.; Rennings, K. (1991): Die volkswirtschaftlichen Kosten eines Super-GAUS' in *Biblis. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht*, 4/1991, 379-396.

Ewers, H.-J.; Rennings, K. (1994): Economics of Nuclear Risks – A German Study. In: Hohmeyer/Ottinger: *Social Costs of Energy – Present Status and Future Trends. Proceedings of an international Conference*, Racine, Wisconsin, 8-11 setembro, 1992.

Frogatt, A. (2005): Nuclear Reactor Hazards. Nuclear Issues Paper No. 2. Berlin: Fundação Heinrich Böll.

Hare, B., Meinshausen, M. (2004): How much warming are we committed to and how much can be avoided? PIK Report Nr. 93. Potsdam: PIK.

ICCEPT (Imperial College Centre for Energy Policy and Technology) (2002): Assessment of Technological Options to Address Climate Change. A Report for the Prime Minister's Strategy Unit. Londres, 20 dezembro, 2002.

AIE (Agência Internacional de Energia) (2000): Experience Curves for Energy Technology Policy. Paris: OCDE/AIE.

AIE (Agência Internacional de Energia) (2004a): World Energy Outlook 2004. Paris: OCDE/AIE.

AIE (Agência Internacional de Energia) (2004b): Prospects for CO₂ Capture and Storage. Paris: OCDE/AIE.

AIE (Agência Internacional de Energia) (2005a): Electricity Information 2005. Paris: OECD/AIE.

AIE (Agência Internacional de Energia) (2005b): Legal Aspects of Storing CO₂. Paris: OCDE/AIE.

PIMC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima) (2000): Special Report Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press.

PIMC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima) (2001): *Climate Change 2001: Mitigation. A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

PIMC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima) (2005): *PIMC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*.

Jochem, E. (2000): *Energy End-Use Efficiency*. In: PNUD/UNDESA/WEC: *Energy and the Challenge of Sustainability*. World Energy Assessment. Nova Iorque: PNUD, 173-217.

Kreusch, J.; Neumann, W.; Appel, D.; Diehl, P. (2005): *The nuclear fuel cycle*. Nuclear Issues Paper No. 3. Berlin: Fundação Heinrich Böll.

Lovins, A.B. (2005): *Nuclear power: economics and climate-protection potential*. Rocky Mountain Institute (www.rmi.org/sitepages/pid171.php@E05-08)

Marland, G.; Boden, T.A.; Andres, R. J. (2005): *Global, Regional, and National CO₂ Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., EUA.

Meinshausen, M. (2005): *On the risk of overshooting 2°C*. Scientific Symposium “Avoiding Dangerous Climate Change” Exeter, Met Office, UK, 2 fevereiro 2005.

Meinshausen, M.; Hare, B.; Wigley, T.M.L.; van Vuuren, D.; den Elzen, M.G.J., and Swart, R. (2005): *Multi-gas emissions pathways to meet climate targets*. *Climatic Change*, no prelo.

Nassauer, O. (2005): *Nuclear energy and proliferation*. Nuclear Issues Paper No. 4. Berlin: Fundação Heinrich Böll.

NERAC (Nuclear Energy Research Advisory Committee) (2002): *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Washington, D.C.: US DOE NERAC.

Pacala, S.; Socolow, R. (2004): *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies*. *Science* 305 (2004) 968-972.

Pehnt, M.; Cames, M.; Fischer, C.; Praetorius, B.; Schneider, L.; Schumacher, K.; Voß, J.-P. (2005): *Micro Cogeneration. Towards decentralized energy systems*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Price, R.R.; Blaise, J.R.; Vance, R.E. (2004): *Uranium production and demand. Timely mining decisions will be needed*. NEA News 2004 – No. 22.1.

Rogner, H.-H. (2000): *Energy Resources*. In: PNUD/UNDESA/WEC: *Energy and the Challenge of Sustainability*. World Energy Assessment. New York: PNUD, 135 171.

Rothwell, G.; van der Zwaan, B. (2003): *Are light-water reactor energy systems sustainable?* *The Journal of Energy and Development* 29 (2003) No. 1, 65-79.

Sailor, W.C.; Bodansky, D.; Braun, C.; Fretter, S., and van der Zwaan, B. (2000): A Nuclear Solution to Climate Change?. *Science* 288 (2000) 1177-1178.

Schrattenholzer, L.; Miketa, A.; Riahi, K.; Roehrl, R.A. (2004): Achieving a Sustainable Global Energy System. Identifying possibilities using long-term Energy Scenarios. ESRI Studies on the Environment, Cheltenham: Edgar Elgar.

Shell (2002): Energy Needs, Choices and Possibilities Scenarios to 2050. Scenarios to 2050. Shell International.

Thomas, S. (2005): The economics of nuclear power. Nuclear Issues Paper No. 5. Berlin: Heinrich Böll Foundation.

Turkenburg, W.C. (2000): Renewable Energy Technologies. In: PNUD /UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy Assessment. New York: PNUD, 219-272.

PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento)/UNICEF (Programa das Nações Unidas para a Infância) (2002): The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery. Relatório contratado pelo PNUD e UNICEF com o apoio da UN-OCHA e da OMS. Nova Iorque: PNUD.

van der Zwaan, B.; Rabl, A. (2004): The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy. *Energy Policy* 32 (2004) 1545-1554.

van der Zwaan, B.C.C. (2002): Nuclear energy: Tenfold expansion or phase-out? *Technological Forecasting & Social Change* 69 (2002) 287-307.

WBGU (Conselho Assessor Alemão sobre Mudança Global) (2000): Strategies for Managing Global Environmental Risks. Berlin/Heidelberg: Springer.

WBGU (Conselho Assessor Alemão sobre Mudança Global) (2003): Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and beyond. Relatório especial. Berlin: WBGU.

WBGU (Conselho Assessor Alemão sobre Mudança Global) (2004): Towards Sustainable Energy Systems. London: Earthscan.

Siglas e abreviações

BAU “Business As Usual”, ou projeção linear de tendências atuais
cap per capita
CSC captura e seqüestro de carbono
CO2 dióxido de carbono
ECBM enhanced coalbed methane recovery
EJ exajoule
EOR “enhanced oil recovery”, ou recuperação melhorada do petróleo
PIB produto interno bruto
Gt gigatoneladas (bilhões de toneladas)
PAG potencial de aquecimento global
AIE Agência Internacional de Energia
IGCC “integrated gasification combined cycle”, gaseificação integrada em ciclo combinado
PIMC Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
km quilómetro
m2 metro quadrado
Mt megatoneladas (milhões de toneladas)
NBQ [Armas] nucleares, biológicas e químicas
OCDE Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Económico
ppm partes por milhão
ppt partes por trilhão
PeD Pesquisa e Desenvolvimento
SO2 dióxido de enxofre
t tonelada métrica
TWh horas-terawatt (bilhões de horas-kilowatt)
CQNUMC Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (=UNFCCC)
W watt

Fundação Heinrich Böll

[Estou supondo que a Fundação já tem um texto institucional pronto em português para inserir neste tipo de publicação.]

The Heinrich Böll Foundation, affiliated with the Green Party and headquartered in the Hackesche Höfe in the heart of Berlin, is a legally independent political foundation working in the spirit of intellectual openness.

The Foundation's primary objective is to support political education both within Germany and abroad, thus promoting democratic involvement, sociopolitical activism, and crosscultural understanding.

The Foundation also provides support for art and culture, science and research, and developmental cooperation. Its activities are guided by the fundamental political values of ecology, democracy, solidarity, and non-violence.

By way of its international collaboration with a large number of project partners – currently numbering about 100 projects in almost 60 countries – the Foundation aims to strengthen ecological and civil activism on a global level, to intensify the exchange of ideas and experiences, and to keep our sensibilities alert for change.

The Heinrich Böll Foundation's collaboration on sociopolitical education programs with its project partners abroad is on a long-term basis. Additional important instruments of

international cooperation include visitor programs, which enhance the exchange of experiences and of political networking, as well as basic and advanced training programs for committed activists.

The Heinrich Böll Foundation has about 180 full-time employees as well as approximately 320 supporting members who provide both financial and non-material assistance.

Ralf Fücks and Barbara Unmüßig comprise the current Executive Board. Dr. Birgit Laubach is the CEO of the Foundation.

Two additional bodies of the Foundation's educational work are: the "Green Academy" and the "Feminist Institute".

The Foundation currently maintains foreign and project offices in the USA and the Arab Middle East, in Afghanistan, Bosnia-Herzegovina, Brazil, Cambodia, Croatia, the Czech Republic, El Salvador, Georgia, India, Israel, Kenya, Lebanon, Mexico, Nigeria, Pakistan, Poland, Russia, South Africa, Serbia, Thailand, Turkey, and an EU office in Brussels. For 2005, the Foundation had almost 36 million €public funds at its disposal.

Heinrich Böll Foundation, Hackesche Höfe, Rosenthaler Str. 40/41, D-10178 Berlin, Germany, Tel.: 030-285 340, Fax: 030-285 31 09, E-mail: info@boell.de, Internet: www.boell.de

“ENERGIA NUCLEAR: MITO E REALIDADE” – A publicação pela Fundação Heinrich Böll de seis trabalhos temáticos sobre a energia nuclear é uma contribuição para os debates sobre o futuro da energia nuclear. A publicação coincide com o XX aniversário do desastre de Tchernobil. Os trabalhos temáticos oferecem um panorama atualizado de fatos e debates recentes sobre o uso da energia nuclear no mundo. O objetivo é oferecer análises bem informadas para os tomadores de decisão, jornalistas, ativistas e o público em geral.

Nuclear Issues Paper Series

Editor: Felix Christian Matthes

Nuclear Power: Myth and Reality. A Political Summary. By G. Rosenkranz
(no prelo)

Nuclear Reactor Hazards. By A. Froggatt

The Nuclear Fuel Cycle. By J. Kreuzsch, W. Neumann, D. Appel, P. Diehl

Nuclear Energy and Proliferation. By O. Nassauer

The Economics of Nuclear Power. By S. Thomas

Nuclear Energy and Climate Change. By F. Ch. Matthes

Edição conjunta com:

NUCLEAR ISSUES PAPERS AT THE WWW www.boell.de/nuclear