



*Texto de Discussão do Setor Elétrico n.º 39*

# **Perspectivas da Matriz Elétrica Mundial Pós-Fukushima**

Nivalde José de Castro  
Guilherme de A. Dantas  
Roberto Brandão

Julho 2011  
Rio de Janeiro

## Sumário

Introdução .....	3
I – Energia Nuclear: características, benefícios e incertezas .....	5
II – Impactos do Acidente de Fukushima na Matriz Elétrica Mundial .....	13
III – As Novas Perspectivas do Planejamento da Expansão do Setor Elétrico ...	18
III.1 – A Necessidade de Repor Centrais Nucleares Existentes .....	21
III.2) Mitigação das Alterações Climáticas e a Energia Nuclear .....	25
III.3) Alternativas Energéticas .....	28
Conclusão .....	31
Bibliografia .....	33

# Perspectivas da Matriz Elétrica Mundial Pós-Fukushima

Nivalde José de Castro<sup>1</sup>  
Guilherme de A. Dantas<sup>2</sup>  
Roberto Brandão<sup>3</sup>

## Introdução

A produção de energia nuclear utiliza insumos com expressiva densidade energética e a produção de energia elétrica em usinas nucleares, em condições normais de funcionamento, apresenta impactos ambientais que podem ser considerados menores em comparação com as opções térmicas e mesmo com relação às hidroelétricas disponíveis. Com base nestes dois argumentos, entre outros, a energia nuclear se tornou uma alternativa de grande relevância para o planejamento energético e para a expansão da oferta de energia elétrica.

As perspectivas da energia nuclear tornaram-se mais relevantes a partir da Crise do Petróleo da década de 1970. O acidente de Chernobyl provocou uma brusca parada nos investimentos em centrais nucleares que foram retomados de forma bastante consistente no início do Século XXI em função da aceleração dos preços do petróleo, “puxando” assim todos os insumos energéticos e devido à necessidade de se reduzir as emissões de gases do efeito estufa.

---

<sup>1</sup> Professor da UFRJ e coordenador do GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico do Instituto de Economia da UFRJ.

<sup>2</sup> Doutorando do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ e Pesquisador-Sênior do GESEL/IE/UFRJ.

<sup>3</sup> Pesquisador-Sênior do GESEL/IE/UFRJ.

Mais recentemente algumas organizações não governamentais que defendem causas ambientalistas passaram a aceitar e apontar a energia nuclear como solução para enfrentar diretamente os dilemas e desafios do setor energético frente à necessidade de diminuir as emissões de gases do efeito estufa. Contudo, o acidente nuclear japonês de Fukushima colocou novamente as centrais nucleares sob forte desconfiança e questionamento, em especial nos países mais desenvolvidos e com estruturas de poder mais democráticas, retroagindo ao período pós Chernobyl. Esta reversão deve em grande medida às incertezas e imprevisibilidade das consequências de um acidente nuclear. Devido ao reduzido número de acidentes ocorridos até hoje, não existe massa crítica de aprendizado suficiente para um melhor dimensionamento dos impactos que podem ser ocasionados por um acidente grave. Por isso é compreensível a persistência e o recrudescimento da oposição à geração de energia nuclear, determinando uma reação do tipo síndrome de Fukushima que irá impactar o cenário do planejamento energético mundial.

O acidente nuclear japonês aumentou as críticas e o questionamento sobre a sustentabilidade das usinas nucleares. É razoável supor, assim, que muitos investimentos em plantas nucleares serão cancelados ou postergados. Em paralelo, algumas plantas em operação, sobretudo as mais antigas, devem ser retiradas de operação de forma definitiva ou para a revisão dos critérios de segurança. O caso mais radical até o momento é o da Alemanha, que desativou imediatamente as centrais mais antigas e decidiu desativar as centrais restantes até o início da próxima década. Como consequência, no curto prazo, quando a capacidade instalada é dada, há uma tendência do aumento do custo de geração devido a um uso mais intenso de centrais termoelétricas movidas a combustíveis fósseis. Concomitantemente, é possível vislumbrar alterações em alguns parâmetros do planejamento da expansão do setor elétrico ao redor do mundo pela restrição a investimentos em novas centrais nucleares. Em um prazo mais longo, deve-se trabalhar com um novo patamar de segurança das

centrais nucleares o que permitirá recolocar esta tecnologia entre as principais opções para a expansão da geração de energia elétrica.

O objetivo central deste texto é analisar os impactos de curto e longo prazo do acidente nuclear de Fukushima na composição da matriz elétrica mundial. Para isso, o estudo divide-se em três seções. Inicialmente, são apresentadas as características, os benefícios e a incerteza inerentes à energia nuclear. Em seguida, examinam-se as consequências do acidente japonês sobre a oferta de energia no curto prazo. A terceira seção analisa as consequências do acidente sobre o planejamento energético do setor elétrico.

## **I – Energia Nuclear: características, benefícios e incertezas**

O núcleo do átomo é composto por nêutrons e prótons. Como os prótons possuem carga positiva enquanto os nêutrons possuem carga neutra, a tendência natural seria existir repulsão entre os prótons e a não existência de um núcleo coeso composto por nêutrons e prótons. É a energia nuclear (energia de ligação das partículas do núcleo) que mantém os nêutrons e os prótons juntos no núcleo. Devido ao seu imenso potencial energético, a energia nuclear tem sido foco de interesse tanto para fins militares como civis.<sup>4</sup>

A geração de energia elétrica em centrais nucleares ocorre baseada no princípio da fissão nuclear. Tal processo consiste na divisão do núcleo de um átomo pesado, com muitos prótons e nêutrons, em dois núcleos menores a partir do impacto de um nêutron. Desta forma, a energia que mantinha o núcleo unido é liberada sob a forma de energia térmica. A fissão nuclear é um processo que

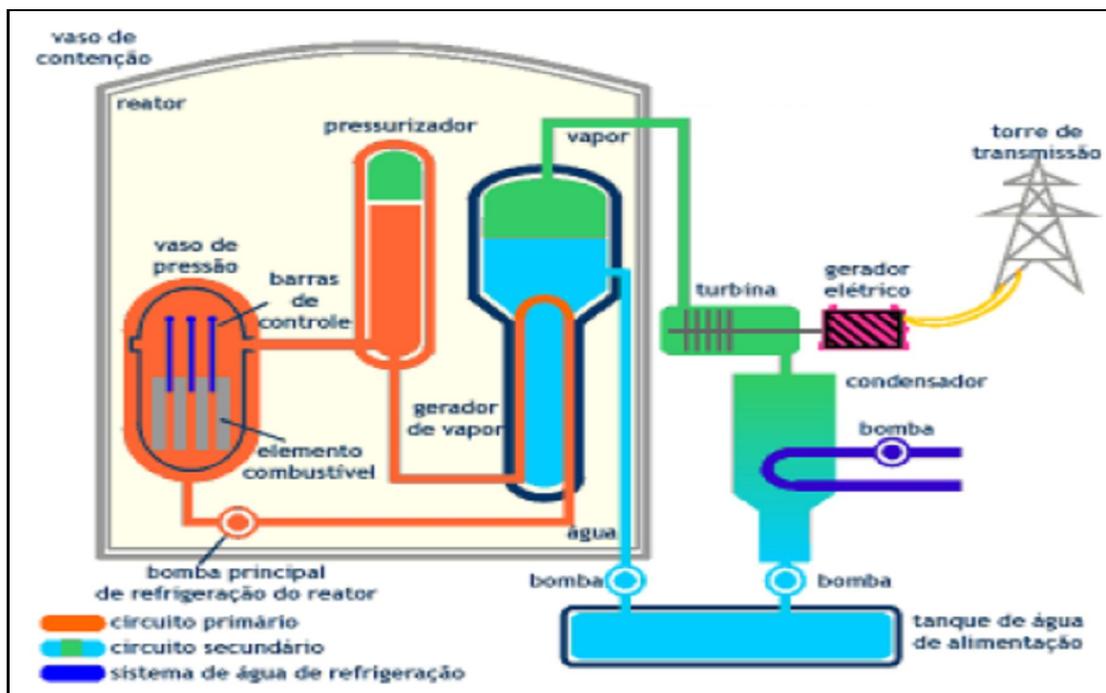
---

<sup>4</sup> A tecnologia nuclear pode utilizar dois processos opostos: a fissão nuclear e a fusão nuclear, sendo este último um processo natural que garante a vida na Terra porque é o processo que ocorre no sol, responsável por mais de 90% da energia na Terra. No entanto, este processo só ocorre com temperaturas muito elevadas, e embora produza quantidades muito superiores de energia comparada ao processo de fissão nuclear, não se aplica à geração de energia elétrica porque ainda não foram desenvolvidas formas de controlar a fusão nuclear.

ocorre sob a forma de cadeia porque a fissão inicial gera dois a três nêutrons, além dos núcleos menores. Estes nêutrons atingem outros núcleos liberando mais energia térmica.<sup>5</sup>

As centrais nucleares podem ser definidas, de forma sucinta, como usinas térmicas de geração elétrica onde a fissão nuclear, que ocorre no reator, é a fonte de calor. A Figura 1 procura ilustrar este processo, onde, guardadas as devidas proporções e especificidades, se pode notar a semelhança com uma central térmica convencional.

**Figura 1**  
**Composição de uma Central Nuclear com Reactores PWR**



Fonte: CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.

<sup>5</sup> A utilização segura da tecnologia nuclear exige o controle da reação de fissão nuclear em cadeia porque caso o contrário tal processo permaneceria ativo enquanto houvesse material físsil. Este controle ocorre via eliminação dos nêutrons disponíveis, elemento desencadeador da fissão. Tal controle se baseia em barras metálicas que contêm boro ou cádmio porque estes elementos químicos são capazes de absorver nêutrons.

O urânio é o insumo energético dos reatores nucleares. No entanto, os isótopos do urânio possuem diferentes capacidades de sofrerem fissão. O  $U_{235}$  é extremamente físsil, ou seja, é um elemento com alta probabilidade de sofrer fissão. Porém, este elemento representa apenas 0,7% do urânio natural. Os outros 99,3% do urânio natural são representados pelo  $U_{238}$  que também sofre fissão, porém com uma probabilidade muito menor. Desta forma, não seria possível construir um reator que utilizasse urânio natural, pois o mesmo não possui massa crítica suficiente. A fim de superar esta restrição, foram desenvolvidos reatores que utilizam urânio enriquecido<sup>6</sup> como combustível e água como moderador e refrigerador. Esta tecnologia é denominada LWR (*Light Water Reactor*) e se subdivide em dois tipos de reatores:

- i. Reator BWR (*Boiling Water Reactor*), desenvolvidos pela GE, que se caracteriza pela produção no reator do vapor utilizado nas turbinas para geração de energia; e
- ii. Reator PWR (*Pressurized Water Reactor*), produzido pela Westinghouse, que utiliza água pressurizada, sendo, atualmente, o reator mais utilizado no mundo.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Um dos pontos mais relevantes da tecnologia nuclear é o ciclo do combustível. Este ciclo se inicia com a prospecção e mineração do urânio e seu posterior beneficiamento com a formação do "yellow cake". Em seguida, no caso de se utilizar o enriquecimento do urânio, se converte em  $UF_6$  gasoso para que o enriquecimento seja possível. Este enriquecimento pode ocorrer via ultracentrifugação, difusão gasosa ou outras tecnologias, dentre as quais, jato centrífugo e laser. A etapa posterior é a reconversão em óxido de urânio e a fabricação de barras do combustível nuclear. No caso de não haver enriquecimento, após o beneficiamento ocorre a fabricação das barras. Então as barras de combustível nuclear são queimadas no reator produzindo energia elétrica e rejeitos. Estes rejeitos podem ser depositados ou reprocessados. Cabe frisar que estes rejeitos possuem 0,9% de  $U_{235}$ , logo possuem maior capacidade de fissão que o próprio urânio natural.

<sup>7</sup> Ainda no âmbito dos reatores térmicos, foi desenvolvida no Canadá a tecnologia HWR que utiliza urânio natural,  $D_2O$  como moderador e água como refrigerador. Esta tecnologia foi adotada pela Índia e pela Argentina. Por fim, cabe destacar os reatores que utilizam grafite C como moderador, seja utilizando urânio natural ou urânio enriquecido como combustível e com utilização de gás como refrigerador. O problema destes reatores é que operam em alta temperatura contrastando com a necessidade da tecnologia nuclear de limitar a temperatura para operar com segurança.

Os reatores do tipo BWR possuem um único circuito de água que refrigera o reator e, ao mesmo tempo, é o gerador de vapor que é expandido na turbina. Nota-se que a água (vapor) utilizada na geração de energia elétrica propriamente dita contém radioatividade, característica que potencializa o risco de uma contaminação radioativa do meio ambiente em caso de acidente. Em contrapartida, os reatores do tipo PWR trabalham com água pressurizada e possuem dois circuitos de água: um circuito primário de refrigeração do reator e um circuito secundário de geração de vapor, como pode ser verificado na Figura 1.

A partir da apresentação das características básicas de funcionamento de uma central nuclear, é necessário examinar os benefícios que este tipo de tecnologia oferece para o setor elétrico.

A expansão da geração elétrica com base nuclear na década de 1970 foi motivada como uma resposta dos países mais desenvolvidos aos choques do petróleo. Um fator que contribuiu para esta opção tecnológica foi o fato de existir um considerável número de países detentores de reservas de urânio<sup>8</sup> com uma geopolítica totalmente distinta do petróleo, o que viria a contribuir para a busca de segurança energética. Em paralelo, se deve ressaltar que as reservas de urânio permitem que se explore este energético por um horizonte temporal mais amplo do que os recursos fósseis, exceto carvão,<sup>9</sup> como pode ser verificado na Tabela 1.

---

<sup>8</sup> Austrália, Cazaquistão, Rússia, África do Sul, Canadá, Brasil são alguns dos países com expressivas reservas de urânio.

<sup>9</sup> A problemática do carvão não é sua disponibilidade e sim seus impactos ambientais.

**Tabela 1**  
**Relação entre Reservas e Produção no Mundo<sup>10</sup>**

(em anos)

<b>Fonte de Energia</b>	<b>Reservas/Produção</b>
Urânio	101
Petróleo	46
Gás Natural	63
Carvão	119

Fonte: BP (2010) e WNA (2010a) e WNA (2010b) .

Outro fator importante a favor da energia nuclear é a expressiva densidade energética do urânio que não apenas contribui para a segurança da oferta, como também para que esta oferta ocorra em bases competitivas. De acordo com a CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, 10 gramas de U<sub>235</sub> possuem energia equivalente àquela contida em 700 kg de óleo ou em 1.200 kg de carvão.

Por outro lado, a geração de energia elétrica com base na rota termonuclear justifica-se pela necessidade crescente de se buscar uma produção de energia elétrica em bases ambientais sustentáveis. Esta questão está diretamente relacionada à necessidade mundial de mitigação das emissões de gases do efeito estufa notadamente nos países mais desenvolvidos e emergentes com maior densidade econômica. Perante este desafio, a energia nuclear surge como uma importante opção energética devido ao seu reduzido fator de emissão de gases do efeito estufa, conforme se pode constatar pelos dados apresentados na Tabela 2.

---

<sup>10</sup> Dados de 2010 para urânio e de 2009 para os combustíveis fósseis.

**Tabela 2**  
**Fatores de Emissões de Diferentes Tecnologias**

(Gramas de CO<sub>2eq</sub> por kWh)

<b>Tecnologia</b>	<b>Gramas de CO<sub>2eq</sub> por kWh</b>
Carvão	800
Óleo	550
Gás Natural (*)	400
Fotovoltaica	100
Eólica	30
Hidroelétrica	20
Nuclear	15

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados União Europeia.

(\*) ciclo combinado

Contudo, os impactos ambientais do setor energético não se restringem somente às alterações climáticas, mesmo que estes sejam os mais relevantes atualmente devido ao seu caráter global. Também é preciso considerar os impactos locais e regionais de cada fonte energética. O Quadro 1 sistematiza informações sobre os impactos ambientais das diferentes fontes de geração de energia elétrica.

## Quadro 1

### Impactos Sócio-Ambientais da Geração de Energia Elétrica

Fontes	Impactos Sócio-Ambientais
Termoeletricidade	Emissão de Gases do Efeito Estufa; Emissão de Material Particulado; Emissão de SOx; Emissão de NOx;
Hidroeletricidade	Alagamento para Construção de Barragens; Alteração nos Regimes dos Rios a Jusante; Assoreamento a Montante da Barragem; Barreiras à Migração dos Peixes; Proliferação de Algas; Perda de Patrimônio Histórico, Arqueológico e Turístico; Remoção de Populações Locais;
Bioeletricidade	Perda de Biodiversidade; Poluição Atmosférica; Mortandade de Peixes; Contaminação de Aquíferos Freáticos.
Energia Eólica	Poluição Sonora; Poluição Estética; Morte de Pássaros.
Energia Solar	Acúmulo de Resíduos Tóxicos no Ambiente.
Pequenas Hidroelétricas	Interferência na Fauna e Flora Locais; Conflitos com o Turismo.
Energia Nuclear	Risco de Acidentes; Incertezas no Gerenciamento dos Resíduos;

Fonte: GOLDEMBERG e LUCON (2007).

Este quadro indica que, em condições normais de funcionamento, a energia nuclear é aquela que apresenta os menores impactos ambientais. Porém, no cenário onde ocorre um acidente, os impactos ambientais atingem proporções imprevisíveis, potencialmente catastróficas.

É justamente devido ao conteúdo radioativo do combustível nuclear e de seus rejeitos, que a questão da segurança é vital e sensível na tecnologia nuclear. Neste sentido, são adotados sistemas passivos de segurança, entre os quais: varetas de combustível; barras de controle constituídas de cádmio ou boro que

controlam a reação de fissão nuclear; vaso de pressão; carcaça de aço que contém o vaso de pressão e o gerador de vapor do circuito secundário; e o edifício do reator e sistemas ativos de segurança, que devem ser acionados para reter efeitos da contaminação do sistema no caso de acidentes.

Uma das principais dificuldades para analisar os prováveis e potenciais impactos sobre a sociedade derivados de um acidente em uma usina nuclear é que mais do que o risco de acidentes, trata-se das incertezas relativas aos danos provocados por um possível acidente. Esta distinção entre **risco e incerteza** é relevante porque enquanto para o risco se pode construir uma distribuição de probabilidades para um determinado evento e desta forma estimar as consequências de um acidente, a imprevisibilidade do acidente diz respeito à impossibilidade de se conhecer a distribuição de probabilidades das consequências do acidente. Em outras palavras, a grande dificuldade de se examinar e determinar os impactos de um acidente em uma central nuclear é a impossibilidade de se mensurar *a priori* os danos que podem ser provocados sobre o meio ambiente.

Esta imprevisibilidade se acentua diante do reduzido número de acidentes registrados até hoje, que torna pequena a massa crítica a partir da qual se poderia buscar uma melhor compreensão das consequências de um acidente. Em suma, embora o reduzido número de acidentes nucleares possa ser interpretado como um indicador de segurança desta rota tecnológica permanece a incerteza relativa ao dimensionamento das consequências de um acidente nuclear. O acidente nuclear das centrais nucleares japonesas de Fukushima é bastante representativo desta problemática. Por exemplo:

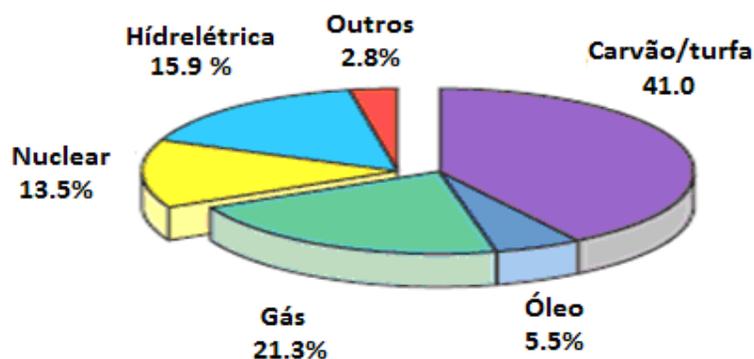
- i. Durante quantas décadas a região no entorno das centrais nucleares ficarão comprometidas e impedidas de vida humana?
- ii. Qual o volume de recursos que serão necessários para o controle das doenças? Ou para a realocação das populações que foram remanejadas?

O fato relevante, e que se constitui em hipótese central deste estudo, é que o acidente nuclear de Fukushima irá alterar e afetar as perspectivas de curto e médio prazo da matriz elétrica mundial, bem como os preceitos e cenários de planejamento da expansão do setor elétrico.

## II – Impactos do Acidente de Fukushima na Matriz Elétrica Mundial

A matriz elétrica mundial é ainda dominada por combustíveis fósseis que representam aproximadamente 70% da geração de eletricidade. Dentre os combustíveis fósseis utilizados destaca-se o carvão com 41%. A geração partir de recursos hídricos e nucleares detém cerca de 30% como é possível constatar por meio dos dados do Gráfico 1 que sintetiza a participação das diferentes fontes na geração mundial de energia elétrica para 2008.

**Gráfico 1**  
**Matriz Energética Mundial: 2008**  
(em %)



Fonte: IEA (2010a).

Esta predominância de fontes térmicas determina dois grandes e graves problemas:

- i. Oferta de energia elétrica poluidora; e
- ii. Forte exposição à volatilidade do preço internacional do petróleo.<sup>11</sup>

Soma-se estes dois problemas a concentração dos insumos fósseis, em especial do petróleo e gás natural, em um número restrito de países, resultando em uma dependência energética por parte da União Europeia, EUA, Japão e China, os maiores importadores de petróleo e gás natural do mundo. Esta característica geoeconômica coloca a variável do suprimento energético dentro de um contexto estratégico de segurança energética que explica, em grande medida, a forte instabilidade política do Oriente Médio onde estão localizadas as principais reservas mundiais destes insumos.

As significativas participações do carvão, gás natural e derivados do petróleo na matriz de geração resultam em expressivas e crescentes emissões de gases do efeito estufa por parte do setor elétrico, abrindo uma forte e consistente discussão sobre a sustentabilidade do uso destas fontes no médio e longo prazo, conforme se pode verificar em BANCO MUNDIAL (2010).

Em oposição ao uso destes insumos energéticos poluidores, a participação da energia nuclear na matriz elétrica mundial se aproximava rapidamente da hidroeletricidade, mas variando muito entre os países. A Tabela 3 apresenta a capacidade instalada de geração nuclear por países para o ano de 2008.

---

<sup>11</sup> Embora os derivados do petróleo representem menos de 10% da oferta mundial de energia elétrica, o preço de outros combustíveis, especialmente do gás natural, costumar estar atrelado ao preço do petróleo.

**Tabela 3**  
**Capacidade Instalada Nuclear no Mundo: 2008**

(em GW e %)

<b>Países</b>	<b>Capacidade Instalada</b> (em GW)	<b>Participação</b> (em % do total mundial)
EUA	101	27
França	63	17
Japão	48	13
Rússia	23	6
Coréia do Sul	20	5
Alemanha	18	5
Canadá	13	3
Ucrânia	13	3
China	11	3
Suécia	9	2
Brasil	2	0,5
Resto do Mundo	51	14
<b>Total</b>	<b>372</b>	<b>100</b>

Fonte: IEA (2010a).

Os dados da Tabela 3, embora relevantes, não são indicativos da importância relativa da geração nuclear para estes países em razão das respectivas matrizes elétricas deterem uma escala distinta. Esta limitação é superada pela Tabela que apresenta a participação da geração nuclear em relação ao total da oferta de cada país.

**Tabela 4**  
**Participação da Geração Nuclear na Oferta de Eletricidade: 2008**  
(em %)

Países	Participação da Geração Nuclear na Oferta Total
França	77,1
Ucrânia	46,7
Suécia	42,6
Coreia do Sul	34,0
Japão	24,0
Alemanha	23,5
EUA	19,3
Rússia	15,7
Canadá	14,4
China	2,0
Resto do Mundo	11,9
Mundo	13,9

Fonte: IEA (2010a).

O grave acidente nuclear das usinas de Fukushima determinou imediatamente dois questionamentos:

- i. Grau de segurança das centrais nucleares; e
- ii. Pertinência da energia nuclear na matriz energética mundial.

A reação de países com estruturas políticas mais democráticas foi rápida e direta desdobrando-se em duas tendências convergentes. A primeira tendência foi de desligamento das centrais nucleares mais antigas que possuam padrões de segurança obsoletos seguido de programa de desmobilização de todas as centrais nucleares em períodos de médio prazo, como ocorreu na Alemanha<sup>12</sup> e

---

<sup>12</sup> Após o acidente japonês, a Alemanha desligou de forma temporária 7 de suas 17 usinas nucleares. Estas usinas são as plantas mais antigas que passarão por testes com o intuito de auferir o nível de segurança destas usinas. Posteriormente, a Alemanha anunciou o fechamento de todo o seu parque nuclear até o fim desta década. Procedimento análogo vem sendo adotado no Japão, onde vem ocorrendo um processo de fechamento de usinas nucleares.

na Suíça. A segunda tendência foi a retirada da opção nuclear do planejamento da expansão da capacidade instalada como foi o caso do Chile e da Itália

No curto prazo, a capacidade geração de energia é um dado fixo devido à impossibilidade de expansão do parque gerador. Desta forma, as opções disponíveis para que os sistemas elétricos possam se reequilibrar frente à quebra da oferta de energia nuclear se resumem basicamente a:

- i. Medidas de racionamento de energia;
- ii. Uso mais intensivo das usinas existentes movidas com outros insumos energéticos.

Este *status* emergencial é o que está ocorrendo no Japão nesta fase pós-crise e que pode servir de indicativo para outros países como Alemanha e Suíça. Como as políticas de restrição da demanda possuem um caráter recessivo, existe uma forte oposição às mesmas, e a implementação deste tipo de estratégia seria ainda mais difícil em um momento que a economia mundial recupera-se da grave crise iniciada em 2008.

Na situação de *gap* entre demanda e oferta de energia elétrica provocada pela redução da disponibilidade da fonte nuclear, a solução emergencial é o uso mais intensivo do parque térmico existente. Contudo, isto significa a utilização de forma contínua de plantas de energia aptas a operarem na ponta do sistema ou eventualmente como semi-base. Plantas deste tipo possuem um custo de geração de energia elétrica superior aquele verificado em usinas de base do sistema. Portanto, uma resultante de curto prazo desta política energética é o aumento no custo da energia derivada do desligamento de centrais nucleares existentes.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Um exemplo deste impacto pode ser observado na Alemanha. O fechamento abrupto de 7 centrais nucleares antigas elevou os preços no mercado *spot* entre 17 e 25%.

No entanto, é preciso ter ciência de que existem limites para o uso mais intensivo do parque termoelétrico em substituição à geração de energia nuclear, sobretudo em países com uma expressiva participação de geração nuclear como a França. Esta assertiva fundamenta-se no fato de usinas nucleares operarem na base do sistema e possuírem elevados fatores de capacidade. Neste sentido, em contraste com parques geradores com grandes quantidades de fontes renováveis de energia, sistemas com considerável geração nuclear têm pouca capacidade instalada ociosa, capaz de ser utilizada como *backup* do sistema.

Desta forma, a possibilidade de mudanças mais expressivas da participação da geração nuclear na oferta de energia elétrica ocorre no âmbito da expansão do sistema. No curto e médio prazo os instrumentos de política energética são limitados e todos apontando para maiores custos e mais emissão de gases de efeito estufa. A próxima seção tem o intuito de analisar os impactos do acidente nuclear japonês sobre a configuração futura da matriz elétrica mundial.

### **III – As Novas Perspectivas do Planejamento da Expansão do Setor Elétrico**

É possível afirmar que os maiores impactos sobre o setor elétrico resultantes do acidente nuclear japonês ocorrerão na expansão da matriz elétrica mundial, ou seja, no médio e longo prazo. Neste âmbito, uma análise global das perspectivas do planejamento da expansão do setor elétrico no início de 2011, pré-crise Fukushima, indicava para expressivos investimentos em uma grande quantidade de novas centrais nucleares em diversos países, basicamente em função da busca de dois objetivos centrais da política energética:

- i. Segurança energética; e
- ii. Mitigação das mudanças climáticas.

Nestes termos, o acidente japonês impõe a necessidade de revisão de preceitos e fundamentos que embasavam as políticas de planejamento lastreadas por investimentos em centrais nucleares para a expansão da capacidade instalada.

Diante da necessidade de expandir a oferta mundial de energia com as restrições impostas pela mitigação das alterações climáticas e a busca de segurança do suprimento, a energia nuclear configurava-se como uma importante e estratégica alternativa de política energética, principalmente para os países desenvolvidos, mas também para países em desenvolvimento, notadamente os que apresentam maiores densidades econômicas. Estes parâmetros explicam por que as projeções e cenários energéticos apontavam para uma expansão da participação da energia nuclear na matriz energética mundial.

Do ponto de vista do aumento da oferta de energia elétrica, os países desenvolvidos terão aumentos marginais na demanda de energia elétrica, por possuírem patamares de consumo bastante elevados, baixas elasticidades renda da demanda de energia elétrica e pequeno crescimento do PIB, em especial depois da crise de 2008. Entretanto, existem compromissos assumidos para a redução dos seus níveis absolutos de emissões de gases do efeito estufa. Estes compromissos tornam necessária a redução da utilização de combustíveis fósseis. Como o setor elétrico é regulado, ele acaba sendo um alvo prioritário das políticas de redução de emissões. Até a crise de Fukushima a política energética priorizava duas estratégias:

- i. Aumento da participação das fontes renováveis de geração de energia elétrica, notadamente energia eólica e em menor grau solar; e
- ii. Construção de novas centrais nucleares.

Esta política energética trazia outro importante benefício: os investimentos nessas fontes diminuía a dependência energética destes países, contribuindo para a promoção da segurança do suprimento.

Os países em vias de desenvolvimento possuem reduzidos níveis de consumo de energia em relação ao mundo desenvolvido. Por isso, é de se esperar que o consumo de energia cresça de forma acentuada nos próximos anos, sobretudo na China e na Índia. Os investimentos em energia nuclear, além de contribuírem para a segurança energética destes países, também são compatíveis com a busca por uma matriz energética menos intensiva em carbono porque, embora estes países não possuam compromissos formais de redução de gases do efeito estufa, eles terão dificuldades em aumentar as emissões de CO<sub>2</sub> proporcionalmente ao aumento da demanda por energia. Isto porque as negociações internacionais em torno do combate às emissões de gases do efeito estufa têm como princípio que a responsabilidade pelo problema é compartilhada por todos os países, embora os compromissos assumidos sejam diferenciados entre os países, a fim de reconhecer o fato de que os países hoje desenvolvidos foram historicamente os grandes responsáveis pelas emissões.

Frente às incertezas abertas pela crise de Fukushima, uma redução nos investimentos em plantas nucleares tende a levar a maiores investimento em outras fontes de geração de energia elétrica. Fontes renováveis de geração e tecnologias de geração a partir de recursos fósseis com captura de carbono são as alternativas existentes, que respeitam os objetivos de combate a mudanças climáticas. Serão expostos e analisados abaixo possíveis cenários de mudanças nos pressupostos relativos ao planejamento do setor elétrico e as consequências destas alterações.

### III. 1 – A Necessidade de Repor Centrais Nucleares Existentes

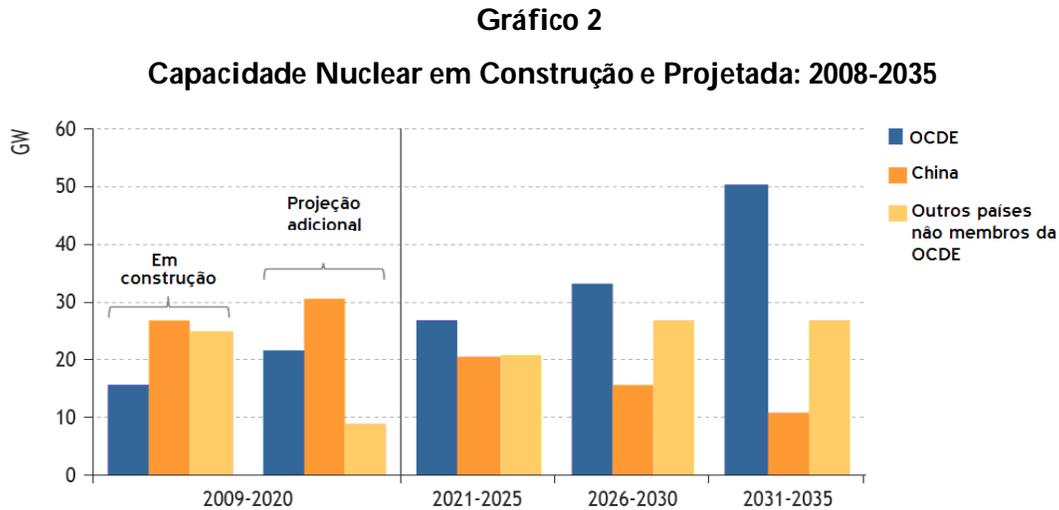
Em seu cenário “Novas Políticas”,<sup>14</sup> a IEA (2010b) estima que a energia nuclear irá manter sua atual participação na oferta de geração de energia elétrica até 2035, isto é, aproximadamente 14% do total de energia elétrica gerada. No entanto, esta manutenção da participação percentual implica na necessidade de expressivos investimentos na construção de novas centrais nucleares. IEA (2010b) projeta uma demanda por energia elétrica mundial de 30.329 TWh para 2035, em contraste com a demanda de 16.819 TWh verificada em 2008. Desta forma, a ampliação da oferta total de energia elétrica para o atendimento da demanda exigirá investimentos em novas plantas nucleares por conta da segurança energética e emissão de gases de efeito estufa.

De acordo com IEA (2010b), a necessidade de garantir a segurança do suprimento em um contexto de alterações climáticas e da emissão de poluentes locais fez ressurgir o interesse na energia nuclear em muitos países em anos recentes, notadamente depois de 2003 quando os preços do petróleo no mercado internacional tornaram muito voláteis e com consistente tendência à elevação. Neste sentido, estimava-se no cenário “Novas Políticas” que a produção de energia nuclear deverá atingir 4.900 TWh em 2035, sendo a China responsável por 40% do aumento da demanda no período compreendido entre

---

<sup>14</sup> A Agência Internacional de Energia publica anualmente o *World Energy Outlook*. Em sua versão 2010, o estudo considera três cenários energéticos para 2035. O cenário de referência é o “Novas Políticas” onde já se contempla as políticas de redução de gases do efeito estufa anunciadas e que já vem sendo adotadas. Neste cenário, as emissões de CO<sub>2</sub> atingiriam o montante de 35,4 bilhões de toneladas em 2035, o que representaria um aumento da temperatura média mundial em 3,5° C. Por sua vez, o cenário “Políticas Correntes” é aquele onde não são adotadas políticas de mitigação das alterações climáticas e as emissões de CO<sub>2</sub> atingem um patamar superior a 40 bilhões de toneladas, ocasionando um aumento da temperatura superior a 6° C. Em contrapartida, o cenário 450 é onde se adotam medidas mais drásticas de redução das emissões de gases do efeito estufa com vistas a estabilizar a concentração destes gases na atmosfera em 450 ppm e desta forma limitar o aquecimento global em 2° C, neste caso as emissões de CO<sub>2</sub> seriam de 21,7 bilhões de toneladas em 2035.

2008 e 2035.<sup>15</sup> O Gráfico 2 apresenta as projeções para a ampliação da capacidade instalada de plantas nucleares entre 2008 e 2035.



Fonte: IEA (2010b).

Merece ser destacado que os investimentos em novas centrais nucleares, assim como novas plantas em geral, não se restringem à expansão da capacidade com vistas ao atendimento da crescente demanda por energia elétrica. Contemplam também a substituição de centrais nucleares em operação há muitos anos que irão se tornar obsoletas e serão substituídas nos próximos anos, necessidade acentuada e corroborada pelo “efeito Fukushima”.

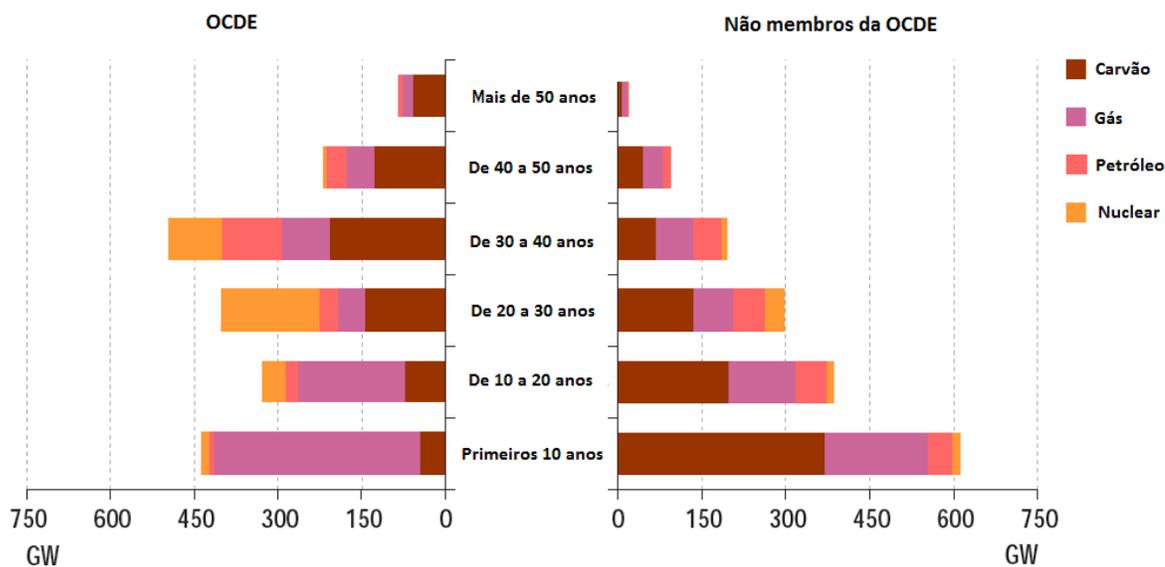
Neste sentido, é essencial e central foco na análise do tempo de vida das centrais térmicas existentes porque esta variável reflete as condições técnicas e o nível de obsolescência destas centrais.

A vida útil de uma central térmica é função de sua tipologia. Por exemplo, termoelétricas de Ciclo Rankine movidas a carvão possuem uma vida útil entre

<sup>15</sup> Vale assinalar que 93% do aumento da demanda energética virá dos países não pertencentes à OECD. A China já é hoje o maior consumidor mundial de energia e em 2035 terá um consumo equivalente a todos os países da OECD.

40 e 50 anos, enquanto que térmicas a gás ou a óleo possuem uma vida útil em torno de 40 anos. Por sua vez, usinas nucleares inicialmente tiveram sua vida útil estimada em 40 anos. Porém, antes do acidente de Fukushima, verificava-se um esforço para extensão da vida útil de centrais nucleares por meio da substituição de alguns equipamentos mais críticos, sempre quando esse procedimento era tecnicamente viável e economicamente atrativo.<sup>16</sup> O Gráfico 3 apresenta a distribuição das usinas térmicas, incluindo as nucleares, em função de seus respectivos tempos de vida.

**Gráfico 3**  
**Idade do Parque Térmico por Região: 2008**



Fonte: IEA (2010b).

De acordo com IEA (2010b), há uma forte concentração mundial de centrais nucleares com idade entre 20 e 40 anos, indicando a necessidade de substituição de parte relevante destas centrais até 2035. Esta exigência tende a se tornar crítica com o acidente nuclear de Fukushima, já que uma das resultantes de curto prazo a ser imposta pela política energética será a imposição de critérios mais rigorosos de segurança, limitando a extensão da vida útil de algumas

<sup>16</sup> Alguns países estavam considerando a extensão da vida útil de usinas nucleares para 60 anos, desde que atendidas todas as exigências de segurança.

usinas. A Tabela 5 complementa as informações do Gráfico 3 sobre a idade média do parque nuclear desagregada por países.

**Tabela 5**  
**Idade Média do Parque Nuclear Mundial: 2010**

(em MW e anos)

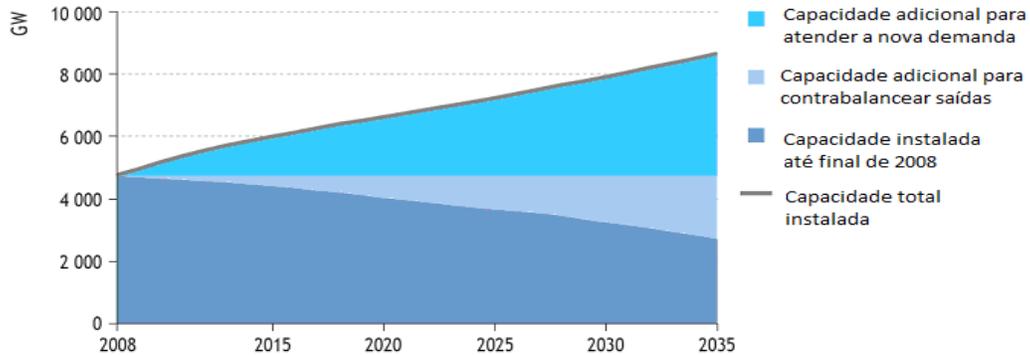
<b>País</b>	<b>Capacidade Instalada (em MW)</b>	<b>Idade das Usinas (em anos)</b>
AFRICA DO SUL	1.880	26
ALEMANHA	21.507	28
ARGENTINA	1.005	30
ARMÊNIA	408	31
BÉLGICA	6.192	29
BRASIL	2.007	15
BULGÁRIA	2.000	19
CANADÁ	13.425	26
CHINA	8.958	9
CORÉIA DO SUL	18.453	17
ESLOVÁQUIA	1.896	18
ESLOVÊNIA	730	28
ESPANHA	7.801	26
EUA	106.291	30
FINLÂNDIA	2.800	31
FRANÇA	66.022	24
HOLANDA	515	37
HUNGRIA	2.000	25
ÍNDIA	4.340	15
JAPÃO	48.847	23
MÉXICO	1.364	18
PAQUISTÃO	462	12
REINO UNIDO	11.902	26
REPÚBLICA CHECA	3.892	16
ROMÊNIA	1.412	9
RÚSSIA	23.242	26
SUÉCIA	9.761	30
SUÍÇA	3.405	32
TAIWAN (CHINA)	5.190	28
UCRÂNIA	13.835	20

Fonte: IAEA (2010).

No cenário “Novas Políticas” elaborado pela IEA (2010b), 35% dos 5.900 GW de potência adicionados entre 2009 e 2035 destinam-se à substituição de usinas geradoras de energia elétrica de todos os tipos. O Gráfico 4 ilustra a evolução do parque gerador mundial para este período temporal.

Gráfico 4

Capacidade Instalada Mundial no Cenário Novas Políticas: 2008-2035  
(em GW)



Fonte: IEA (2010b).

Com base nestes dados é possível afirmar que mesmo sem a adoção de políticas mais agressivas de mitigação das alterações climáticas, haverá a necessidade de serem construídas novas centrais nucleares com capacidade total de 350 GW até 2035 com o objetivo de atender ao crescimento da demanda e repor plantas nucleares que irão se tornar obsoletas neste período.

Desta forma, o acidente nuclear de Fukushima, ao postergar investimentos e reduzir em escala global a opção nuclear, impõe dificuldades e restrições para o planejamento energético e a expansão da oferta de energia elétrica. O grau de complexidade para as áreas de planejamento se agrava ainda mais quando se considera a necessidade de políticas mais agressivas de mitigação das emissões de gases do efeito estufa. Esta questão será tratada na próxima subseção deste estudo.

### III.2) Mitigação das Alterações Climáticas e a Energia Nuclear

A geração de energia com impactos ambientais mínimos é um dos principais desafios dos formuladores de política energética para as próximas décadas, conforme assinalado por BANCO MUNDIAL (2010). E este desafio assume

dimensões ainda maiores diante da necessidade de mitigar as alterações climáticas. De acordo com IPCC (2007), alterações climáticas semelhantes às verificadas a partir da segunda metade do século XX já ocorreram no ecossistema terrestre em outras ocasiões, entretanto nunca em uma escala de tempo tão pequena como a atual. Este relatório considera “muito provável” que estas alterações sejam função do aumento exponencial das emissões antropogênicas de gases do efeito estufa nos últimos 250 anos.<sup>17</sup>

DANTAS (2008) ressalta que as alterações climáticas representam o maior entrave a uma trajetória sustentável de desenvolvimento devido a sua dimensão global. O autor enfatiza que tal fenômeno possui impactos sobre a biodiversidade e a exploração dos recursos naturais, com grande influência sobre o desenvolvimento na Terra, sendo sua mitigação essencial e imprescindível.

Na condição de responsável pela emissão de aproximadamente 70% das emissões antrópicas de gases do efeito estufa, o setor de energia possui função central no processo de mitigação do aquecimento global. Dadas as características técnicas da energia nuclear descritas na seção I, ela se apresenta com uma estratégia alternativa energética de expansão da oferta de energia com redução da intensidade em carbono.

A comparação dos cenários “Novas Políticas” e “450”, apresentados em IEA (2010b), explicitam a importância da energia nuclear para as políticas energéticas de mitigação das emissões dos gases do efeito estufa. Enquanto no primeiro cenário é estimada para a energia nuclear uma participação de 7,6% na oferta mundial de energia em 2035, no cenário 450 esta participação seria de 17%.

---

<sup>17</sup> O processo de urbanização e industrialização verificado a partir de meados do século XVIII com o advento da Revolução Industrial tornou relevante o processo de combustão e isto resultou no desequilíbrio do ciclo do carbono.

O acidente nuclear japonês ao aumentar o nível de questionamento relativo à segurança de usinas nucleares resultará em um aumento das restrições e conseqüentemente das dificuldades em se compatibilizar a expansão da oferta de energia com uma política consistente de combate às mudanças climáticas. Neste sentido, é plausível supor um cenário de dificuldades adicionais nas negociações climáticas nos fóruns internacionais, como a postergação de novos acordos climáticos internacionais como o de Kyoto. Este cenário torna-se ainda mais complexo dada a situação de crise econômica dos países desenvolvidos, *status* que limita a capacidade de investimentos e gastos relacionados ao tema. Contudo, dada a relevância das alterações climáticas e, com base no princípio da precaução, continuará sendo preciso adotar políticas que permitam a expansão da oferta concomitantemente à mitigação do aquecimento global.

As restrições à energia nuclear irão variar em função das condições naturais e das opções de oferta de energia de cada país. Países com maiores riscos sísmológicos e outros fatores que potencializem as chances de um acidente nuclear deverão ter uma atitude mais conservadora assim como países que possuam outros recursos energéticos tenderão a colocar em segundo plano investimentos em energia nuclear. Outro fator determinante será dado pelo grau de democracia dos países, como se pode observar pelas decisões por motivação e influência política como foi o caso da Alemanha, Suíça e Itália.

Em contrapartida, é possível vislumbrar que outros países, como a China, mantenham investimentos em usinas nucleares no planejamento da expansão dos seus setores elétricos, mesmo que haja a postergação de investimentos e os mesmos ocorram adotando critérios mais rígidos e caros de segurança.

De toda forma, o "efeito Fukushima", ao criar restrições para energia nuclear, torna ainda mais complexo o equacionamento da expansão da oferta mundial de energia concomitantemente a mitigação das alterações climáticas.

### III.3) Alternativas Energéticas

As alternativas à opção nuclear para expansão da matriz elétrica com reduzida intensidade em carbono existem, mas ainda possuem um custo superior às fontes convencionais.

A expansão da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e alternativas, que ganhou forte impulso na última década, será necessariamente intensificada. Entretanto, uma solução somente baseada em fontes renováveis capazes de preencher *gap* na oferta oriundo das restrições à energia nuclear não tem condições técnicas para ser adotada. Esta limitação deve-se ao fato da geração nuclear ocorrer na base do sistema elétrico e as fontes renováveis devido ao seu caráter intermitente não são adequadas a uma operação de base.

Dentre as fontes renováveis, destaca-se a energia eólica, que ao final de 2010 já contabilizava uma potência instalada de aproximadamente 194 GW.<sup>18</sup> Esta expansão vem permitindo custos decrescentes devido à escala crescente de geração e de produção de equipamentos e dos ganhos relativos a economia de aprendizado. O potencial eólico remanescente é ainda elevado e com perspectivas de ampliação, especialmente devido a fatores tecnológicos<sup>19</sup> e à possibilidade de geração *offshore*, o que leva a crer que trata-se de uma fonte destinada a ter uma participação crescente na matriz elétrica mundial.

A geração fotovoltaica<sup>20</sup> ainda se situa em um patamar tecnológico de custos elevados. Mesmo assim esta rota tecnológica terminou o ano de 2010 com uma

---

<sup>18</sup> Ver GWEC (2011).

<sup>19</sup> O caso do Brasil é emblemático, pois novo levantamento do potencial eólico realizado em 2010 tomando por base aero-geradores mais potentes e maior altura das torres, resultantes do avanço tecnológico, mais que duplicaram o potencial da energia eólica brasileira.

<sup>20</sup> O princípio da célula fotovoltaica é a utilização de um material semicondutor, que se caracteriza por ter banda de valência e banda de condução. O material normalmente utilizado é o silício que possui 4 elétrons, o mesmo é dopado com o fósforo que possui 5 elétrons e boro que possui 3 elétrons. Desta forma, o elétron excedente na banda dopada com fósforo tende a se transferir para a banda do boro que ficará carregada negativamente enquanto a outra banda

capacidade instalada em torno de 40 GW.<sup>21</sup> Esta tecnologia vem apresentando uma expressiva redução de custos nos últimos anos e é possível se projetar uma trajetória semelhante a que se verificou com a energia eólica.

Ainda no âmbito do aproveitamento dos recursos solares, existe a possibilidade de investimentos em plantas baseadas em concentradores solares para produção de eletricidade. Esta tecnologia é bastante confiável, pois consiste em uma máquina térmica que utiliza calor como fonte quente. Esta tecnologia tende a ser relevante porque a possibilidade de estocagem de energia e/ou operação que contemple combustíveis fósseis como *backup* ou em sistemas híbridos, pode habilitar esta tecnologia para geração de base no longo prazo.

Entretanto, estas fontes não são consideradas alternativas plenas apenas pelos seus custos superiores às fontes convencionais. Outros fatores restritivos merecem ser considerados, como por exemplo, menor densidade energética, caráter intermitente e/ou sazonal e, em alguns casos, as distâncias em relação aos centros de carga. Neste sentido, pode-se afirmar que a participação destas fontes deverá crescer nos próximos anos, mas elas terão um papel complementar na estrutura da matriz elétrica.

Frente às restrições econômicas e técnicas enunciadas anteriormente e às expressivas reservas remanescentes de combustíveis fósseis, sobretudo carvão e gás natural e do papel que estas fontes não renováveis têm em termos de garantia de geração, deve-se verificar nos próximos anos investimentos para o desenvolvimento a nível comercial de tecnologias que permitam utilizar estes recursos de forma sustentável ambientalmente. Em suma, as alternativas seguras de substituição da geração nuclear na base são essencialmente plantas a carvão e a gás natural.

---

ficará carregada positivamente. Em equilíbrio a transferência de elétrons cessa e se forma o campo elétrico. A incidência dos fótons da energia solar com energia superior ao *gap* permite que ao se ligar esta célula a um fio se tenha corrente elétrica.

<sup>21</sup> Ver EPIA (2011).

Neste contexto, já há um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento de plantas de ciclo combinado com gaseificação integrada (IGCC) e com captura e armazenamento de carbono (CCS).<sup>22</sup> Esta rota tecnológica permite uso mais eficiente do carvão, pois ao ser gaseificado o carvão passa a ser utilizado em plantas de ciclo combinado que representam a tipologia de termoelétrica com maior índice de eficiência. Ao mesmo tempo, as plantas do tipo IGCC detêm tecnologia mais adequada para a realização do CCS, pois permite a remoção do CO<sub>2</sub> antes da combustão, o que é mais simples que a captura no exaustor (HOFFMANN, 2010). Porém, esta tecnologia ainda possui custos expressivos e, portanto, ainda não se encontra disponível em escala comercial.

Em suma, as alternativas energéticas para substituir os investimentos em nucleares que não serão realizados ainda possuem custos elevados. Portanto, é preciso que ocorra um maior desenvolvimento tecnológico destas fontes com uma posterior disseminação via ganhos de escala produtiva. Cabe destacar que as tecnologias citadas nesta seção possuem maturidades tecnológicas distintas. Logo, enquanto a tecnologia eólica encontra-se no limiar para tornar-se competitiva com as fontes convencionais e talvez exija mecanismos que incentivem sua inserção no mercado de forma a explorar economias de escala ainda maiores, tecnologias como painéis fotovoltaicos e plantas IGCC com CCS ainda exigem recursos destinados ao desenvolvimento de pesquisas.

---

<sup>22</sup> Sobre carvão, ver, por exemplo, KRUPP e HORN (2009, 163-191).

## Conclusão

A energia nuclear apresenta características técnicas que a colocam como uma alternativa relevante e estratégica na promoção da segurança do suprimento energético. Ao mesmo tempo, em condições normais de funcionamento possui impactos ambientais reduzidos, especialmente no que se refere às emissões de gases do efeito estufa.

Portanto, diante destas três vantagens competitivas a energia nuclear vinha recuperando-se do “efeito Chernobyl” e tendo destaque no planejamento da expansão da matriz elétrica de muitos países, em particular a partir de 2003, quando os preços do barril de petróleo no mercado internacional ficaram extremamente voláteis e com tendência a altas expressivas e contínuas.

Entretanto, se em condições normais de funcionamento os impactos ambientais de uma usina nuclear são menores que àqueles verificados em plantas termoeletricas, no caso de acidente as consequências danosas são imprevisíveis e catastróficas. Neste sentido, um acidente das proporções de Fukushima aumenta o nível de questionamento a energia nuclear, resultando no fechamento de usinas antigas, cancelamento de alguns projetos e a postergação de outros investimentos que serão realizados sob padrões mais rígidos e caros de segurança.

No curto prazo, as restrições à geração nuclear possui como corolário o uso mais intensivo de usinas térmicas movidas a combustíveis fósseis com impactos sobre os custos da energia e sobre o meio ambiente. Por sua vez, no horizonte do planejamento da expansão da oferta, ocorrerá a revisão de muitos projetos nucleares. Desta forma, o cancelamento da construção de algumas usinas e a postergação de outros, exigirá a substituição por outras fontes. Esta substituição será um grande desafio para as áreas de planejamento porque permanece o

desafio de se expandir a matriz elétrica priorizando fontes com baixa intensidade em carbono.

Nestes termos, assumindo como pressuposto que a energia elétrica de base nuclear será restringida, será necessário convergir para uma matriz com mix de energias renováveis e não renováveis, notadamente gás natural e carvão.

As opções para a substituição da energia nuclear incluem fontes renováveis e alternativas de energia elétrica e principalmente a utilização de combustíveis fósseis de maneira sustentável, como por exemplo, CCT (*Clean Coal Technology*).

Nos próximos anos, por conta dos desafios que o “efeito Fukushima” impôs, em especial aos países do grupo desenvolvido, investimentos serão realizados em duas direções que irão determinar uma a evolução tecnológica no sentido de obter: (i) maior eficiência em energias renováveis e (ii) menores emissões de gases de efeito estufa para as energias não renováveis, estando ambas as tendências associadas e submetidas ao objetivo de serem economicamente competitivas.

Neste sentido, deverão ser adotados instrumentos e políticas públicas que permitam a redução de custos destas fontes, aprimoramentos tecnológicos e busca de ganhos de escala.

Também é provável um avanço em termos de melhores segurança de centrais nucleares que deve, mais à frente, recolocar a geração nuclear como uma das alternativas para a expansão da geração de energia elétrica em função de três características: baixas emissões de gases de efeito estufa, aumento do segurança energética e garantia de suprimento por geração na base.

## Bibliografia

BANCO MUNDIAL. *Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2010: Desenvolvimento e mudanças climáticas*. São Paulo. Ed UNESP- Banco Mundial, 2010.

BRITISH PETROLEUM, BP. *BP Statistical Review of World Energy*. Junho de 2010.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. *Energia Nuclear*. Apostila Educativa. Rio de Janeiro.

DANTAS, Guilherme de A. *O Impacto dos Créditos de Carbono na Rentabilidade da Co-Geração Sucroalcooleira Brasileira*. Dissertação de Mestrado. ISEG/Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

DEPARTMENT OF ENERGY, DOE. *International Energy Outlook 2009*. Wasghinton, 2009.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION, EPIA. *Global Market Outlook for Photovoltaic until 2015*. Bruxelas, 2011.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

HOFFMANN, Bettina Susanne. *O Ciclo Combinado com Gaesificação Integrada e a Captura de CO<sub>2</sub>: uma solução para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?* Dissertação de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. *Nuclear Power Reactors in the World*. Viena, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Key World Energy Statistics 2010*. IEA. Paris, 2010a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2010*. IEA. Paris, 2010b.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, GWEC. *Global Wind Report: annual market update 2010*. Bruxelas, 2011.

KRUPP, F; HORN, M. *Reinventar a Energia: Estratégias para o futuro energético do planeta*. Alfragide. Estrela Polar, 2009

MOREIRA, N. H. *Perspectivas da matriz energética brasileira*. In: Ciclo de palestras de Furnas (apresentação), Abril 2008.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE A MUDANÇA DO CLIMA (IPCC). Sumário para os Formuladores de Política – Quarto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho I do IPCC. Paris, 2007.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, WNA. *Supply of Uranium*. Londres, 2010a.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, WNA. *World Uranium Mining*. Londres, 2010 b.