



Confederação Nacional da Indústria

CNI. A FORÇA DO BRASIL INDÚSTRIA



ENERGIA NUCLEAR

QUESTÕES PARA O DEBATE NO BRASIL

Brasília
2016

ENERGIA NUCLEAR
QUESTÕES PARA O DEBATE NO BRASIL

Sandra Pol3nia Rios / Pedro da Motta Veiga

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Robson Braga de Andrade
Presidente

Diretoria de Desenvolvimento Industrial

Carlos Eduardo Abijaodi
Diretor

Diretoria de Comunicação

Carlos Alberto Barreiros
Diretor

Diretoria de Educação e Tecnologia

Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti
Diretor

Diretoria de Políticas e Estratégia

José Augusto Coelho Fernandes
Diretor

Diretoria de Relações Institucionais

Mônica Messenberg Guimarães
Diretora

Diretoria de Serviços Corporativos

Fernando Augusto Trivellato
Diretor

Diretoria Jurídica

Hélio José Ferreira Rocha
Diretor

Diretoria CNI/SP

Carlos Alberto Pires
Diretor



Confederação Nacional da Indústria

CNI. A FORÇA DO BRASIL INDÚSTRIA

ENERGIA NUCLEAR

QUESTÕES PARA O DEBATE NO BRASIL

Sandra Polónia Rios / Pedro da Motta Veiga

© 2016. CNI – Confederação Nacional da Indústria.

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

Gerência Executiva de Infraestrutura – GEINFRA

FICHA CATALOGRÁFICA

C748e

Confederação Nacional da Indústria.

Energia nuclear : questões para o debate no Brasil / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2016.

93 p. : il.

1.Energia Nuclear. 2. Políticas Públicas. 3. Geração de Energia. I. Título.

CDU: 539.141

CNI

Confederação Nacional da Indústria

Sede

Setor Bancário Norte

Quadra 1 – Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 – Brasília – DF

Tel.: (61) 3317-9000

Fax: (61) 3317-9994

<http://www.portaldaindustria.com.br/cni/>

Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC

Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992

sac@cni.org.br

LISTA DE QUADROS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DOS DEPÓSITOS E DAS INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO DE URÂNIO NO BRASIL.....	87
FIGURA 2 – ETAPAS DO CICLO DE PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR.....	88
FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE EXPLORAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE URÂNIO NO BRASIL	90
FIGURA 4 – ORGANOGRAMA DA POLÍTICA NUCLEAR BRASILEIRA.....	99

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NUCLEAR NO MUNDO EM GW (1995-2015)	34
GRÁFICO 2 – GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO EM TWH (1995-2015)	35
GRÁFICO 3 – NÚMERO DE REATORES NUCLEARES EM CONSTRUÇÃO POR REGIÕES DO MUNDO	36
GRÁFICO 4 – PRINCIPAIS PAÍSES PRODUTORES DE ENERGIA NUCLEAR EM 2013 (PARTICIPAÇÃO NO TOTAL MUNDIAL)	39
GRÁFICO 5 – CAPACIDADE INSTALADA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR EM 2013 – PRINCIPAIS PAÍSES (EM GW)	39
GRÁFICO 6 – PARTICIPAÇÃO (%) DA ENERGIA NUCLEAR NA GERAÇÃO DOMÉSTICA DE ELETRICIDADE DOS PRINCIPAIS PRODUTORES – 2013	40
GRÁFICO 7 – CUSTOS DE PRODUÇÃO (OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E COMBUSTÍVEL) DA ELETRICIDADE GERADA POR DIFERENTES FONTES DE ENERGIA – 1995-2014	58
GRÁFICO 8 – COMPOSIÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL – MAIO 2016	79
GRÁFICO 9 – FATOR DE CAPACIDADE (FC) DE DIFERENTES FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL (2014)	79
GRÁFICO 10 – CONTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA – CAPACIDADE INSTALADA (2014)	80
GRÁFICO 11 – COMPOSIÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA – OFERTA (2014)	80
GRÁFICO 12 – COMPOSIÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – MUNDO (2012)	81
GRÁFICO 13 – COMPOSIÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA – PREVISÃO PNE 2030	85
GRÁFICO 14 – CUSTO NIVELADO – LCOE (US\$/MWH)	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CUSTOS DE INVESTIMENTO – US\$ POR KWE – DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (2015)	53
TABELA 2 – CUSTOS DE INVESTIMENTO – US\$ POR KWE – DA ENERGIA NUCLEAR EM DIFERENTES PAÍSES (2015).....	54
TABELA 3 – CUSTOS NIVELADOS DA GERAÇÃO NUCLEAR PARA NOVAS USINAS EM DIFERENTES PAÍSES – 2015 - PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DOS COMPONENTES DE CUSTOS NO LCOE (US\$ / MWH) SOB TRÊS HIPÓTESES DE TAXAS DE JUROS	60
TABELA 4 – CUSTOS NIVELADOS DA GERAÇÃO NUCLEAR PARA NOVAS USINAS EM DIFERENTES PAÍSES – 2015 - CUSTOS COM FATORES DE CAPACIDADE DE 50% E 85% (US\$ / MWH) -	61
TABELA 5 – CUSTOS NIVELADOS DE ENERGIA NUCLEAR, GÁS NATURAL E CARVÃO, EM DÓLARES DE 2013, PARA 17 PAÍSES MEMBROS DA OCDE – VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS (US\$ / MWH) – ANOS SELECIONADOS (TAXA DE JUROS DE 5% A.A.).....	61
TABELA 6 – CUSTOS NIVELADOS DE ENERGIA NUCLEAR, GÁS NATURAL E CARVÃO, EM DÓLARES DE 2013, PARA 17 PAÍSES MEMBROS DA OCDE – VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS (US\$ / MWH) – ANOS SELECIONADOS (TAXA DE JUROS DE 10% A.A.)	62
TABELA 7 – AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS RISCOS DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	65
TABELA 8 – EMISSÕES GERADAS (TONELADAS DE CO2E/GWH) POR DIFERENTES TECNOLOGIAS	68
TABELA 9 – RESERVAS DE URÂNIO NO BRASIL (MIL TONELADAS)	86
TABELA 10 – PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO CUSTO NIVELADO DA GERAÇÃO NUCLEAR	96

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO	15
PANORAMA INTERNACIONAL.....	16
ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL	20
1 INTRODUÇÃO	29
2 PANORAMA DA GERAÇÃO NUCLEAR NO MUNDO	33
2.1 A PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA OFERTA ENERGÉTICA GLOBAL	33
2.2 CAPACIDADE INSTALADA; EVOLUÇÃO E DETERMINANTES	35
2.3 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA CAPACIDADE INSTALADA	38
2.4 POLÍTICAS NUCLEARES EM PAÍSES SELECIONADOS.....	41
3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA NUCLEAR: O DEBATE INTERNACIONAL	51
3.1 OS TERMOS DO DEBATE INTERNACIONAL SOBRE A ENERGIA NUCLEAR.....	51
3.2 A DIMENSÃO ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR: CUSTOS E COMPETITIVIDADE	52
3.3 CUSTOS E BENEFÍCIOS “EXTERNOS” DA ENERGIA NUCLEAR.....	65
4 ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: EVOLUÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS	77
4.1 A PARTICIPAÇÃO DA FONTE NUCLEAR MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	78
4.2 AS USINAS NUCLEARES NO BRASIL	83
4.3 O COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL	85
4.4 A COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL	92

4.5 OS CUSTOS DE INVESTIMENTO NA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL	94
4.6 A ORGANIZAÇÃO INSTITUCIONAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL	97
4.7 A QUESTÃO DO FINANCIAMENTO	102
4.8 O IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DA GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL	104
5 O FUTURO DA GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL: QUESTÕES PARA O DEBATE	107
5.1 CONTRIBUIÇÃO DA GERAÇÃO NUCLEAR PARA A SEGURANÇA ENERGÉTICA	107
5.2 COMPETITIVIDADE ECONÔMICA DA FONTE NUCLEAR NO BRASIL.....	109
5.3 SEGURANÇA SOCIOAMBIENTAL: OS DESAFIOS NO BRASIL.....	111
5.4 OS PRINCIPAIS TEMAS NA AGENDA DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A GERAÇÃO NUCLEAR.....	112
CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS	117



SUMÁRIO EXECUTIVO

Foto: Shutterstock

A crise hídrica que atingiu o Brasil no biênio 2013-2014 e seus impactos sobre a oferta de energia aprofundaram o debate sobre a matriz de energia elétrica e o papel das fontes térmicas na segurança energética do país. Essa experiência deixou clara a falta de uma estratégia de longo prazo que garanta a diversidade de fontes e a segurança energética no país.

Os elevados custos com despacho contínuo das fontes térmicas convencionais tornam conveniente a avaliação do papel da energia nuclear na composição da matriz de energia elétrica no Brasil. Sendo uma fonte térmica capaz de operar na base do sistema, a geração nuclear pode contribuir para dar estabilidade a este, mitigando o caráter intermitente das fontes renováveis do sistema.

Apesar de ser uma fonte de produção de eletricidade relativamente limpa e potencialmente barata, a geração nuclear é alvo de grandes controvérsias tanto no contexto doméstico quanto no cenário internacional. Mas além desses riscos, a intensificação do uso da geração nuclear suscita debates, particularmente em um país como o Brasil, que conta com uma vasta base de recursos naturais energéticos.

Para contribuir com esse debate, a Confederação Nacional da Indústria apresenta este documento, que analisa a experiência internacional com o uso e as políticas voltadas para a energia nuclear e identifica as principais questões para o futuro da energia nuclear no Brasil.

O documento chama a atenção para a importância da participação da iniciativa privada na viabilização do desenvolvimento da geração de energia nuclear no Brasil e aponta as mudanças regulatórias que seriam necessárias para esse fim.

Panorama Internacional

CRESCE A PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NOS ÚLTIMOS 40 ANOS, MAS O CRESCIMENTO NÃO É LINEAR

Houve forte crescimento da participação da energia nuclear na geração de eletricidade entre 1973 (3,3%) e 2013 (10,6%). No entanto, a importância da energia nuclear como fonte de energia no mundo se retraiu nos últimos anos. Esses movimentos são muito sensíveis à percepção de risco por parte da opinião pública, que tende a se acentuar após acidentes de grande repercussão em centrais nucleares.

A queda observada reflete principalmente os efeitos do acidente de Fukushima, em março de 2011, e o subsequente desligamento temporário, pelo Japão, de seus reatores nucleares, além da antecipação do descomissionamento de oito reatores na Alemanha no mesmo ano. No entanto, a partir de 2012, a geração de energia nuclear no mundo voltou a crescer – embora moderadamente.

EXPANSÃO DA CAPACIDADE INSTALADA É INFLUENCIADA POR DIVERSOS FATORES, ECONÔMICOS, TECNOLÓGICOS E REGULATÓRIOS, MAS A PERCEPÇÃO DA SOCIEDADE SOBRE RISCOS E BENEFÍCIOS É DOMINANTE

Atualmente, 442 reatores nucleares operam em 30 países. Existem hoje 65 novos reatores em construção no mundo, a maioria está localizada na Ásia. Tal expansão equivale a 20% da capacidade instalada atual de geração nuclear.

A evolução da capacidade instalada depende da entrada em operação de novas usinas, da modernização e do tempo de vida útil das usinas existentes e do descomissionamento de unidades, temporária ou definitivamente. Esses movimentos são influenciados por fatores econômicos, tecnológicos e regulatórios, bem como pela percepção da sociedade em relação aos benefícios e custos da opção nuclear.

GRANDE PARTE DA GERAÇÃO NUCLEAR ESTÁ NOS PAÍSES DA OCDE, MAS O CRESCIMENTO RECENTE ESTÁ LOCALIZADO NA ÁSIA

Grande parte da energia nuclear gerada no mundo tem origem em países da OCDE, embora esta participação tenha se reduzido substancialmente ao longo das quatro últimas décadas. Em 1973, os países da OCDE respondiam por 92,8% da produção de energia nuclear. Em 2013, essa participação havia se reduzido para 79,1%.

Os Estados Unidos são o maior produtor de energia nuclear, respondendo por 33,2% do total mundial. França, Rússia, Coreia do Sul e China ocupam lugar de destaque no *ranking* dos principais produtores. Entretanto, a França lidera com folga o *ranking* dos principais países em termos de participação da geração nuclear como fonte energética, com 74,7%.

Dezesseis países dependem da geração nuclear para suprimento de pelo menos 25% da carga. Além de quatro dos dez maiores produtores de energia nuclear (França, Suécia, Ucrânia e Coreia do Sul), diversos outros países europeus (Bélgica, República Tcheca, Finlândia, Hungria, Eslováquia, Bulgária, Suíça e Eslovênia) superam aquele patamar de participação.

AS POLÍTICAS NUCLEARES SÃO INFLUENCIADAS POR MUITOS FATORES: SEGURANÇA ENERGÉTICA, BAIXA OSCILAÇÃO DE PREÇOS, DESENVOLVIMENTO DE CADEIAS DE VALOR, CONTROLE DO CICLO DE PRODUÇÃO E PERCEPÇÃO DE RISCOS À SAÚDE E MEIO AMBIENTE

As políticas nucleares são condicionadas por uma série de fatores e objetivos: segurança energética, garantia de oferta sem oscilações de quantidade e preço que caracterizam outras fontes, desenvolvimento de cadeia de suprimento de equipamentos e controle do ciclo de produção do combustível nuclear e/ou geopolíticos.

O acidente na operação da central nuclear de Fukushima, no Japão, em março de 2011, reavivou as críticas ao uso da energia nuclear e voltou a atuar como um fator de limitação ao crescimento da utilização deste tipo de energia. Em função dos riscos reais ou presumidos associados à operação de usinas nucleares, alguns países, como a Alemanha, o Japão e até mesmo a França, estão revisando, nos últimos anos, suas políticas pró-energia nuclear.

O acidente de Fukushima também ensejou revisões regulatórias e aperfeiçoamentos tecnológicos voltados para aumentar a segurança operacional das usinas e a capacidade de resposta dos equipamentos e funcionários a eventos naturais com impactos potenciais sobre reatores ou a problemas gerados pelo próprio funcionamento das usinas.

Mas, recentemente, outro fator ganhou peso no debate internacional: a energia nuclear foi identificada como alternativa energética relevante no âmbito das discussões sobre mudança climática, por ser considerada uma fonte limpa. O interesse no aproveitamento da energia nuclear renasceu em diversos países por força da demanda crescente de energia, dos efeitos negativos sobre o clima provocado pela queima de combustíveis fósseis e das incertezas associadas à importação de combustíveis.

O DEBATE INTERNACIONAL SOBRE VANTAGENS E DESVANTAGENS (OU BENEFÍCIOS E CUSTOS) DA ENERGIA NUCLEAR SE DESENVOLVE ESSENCIALMENTE EM TORNO DE TRÊS QUESTÕES:

- *os custos de geração da energia nuclear e a competitividade desta tecnologia vis à vis de fontes concorrentes, renováveis e não renováveis;*

Embora os níveis absolutos do custo nivelado da geração nuclear variem significativamente entre países, a competitividade desta energia depende significativamente dos custos de investimento, aí incluídos os custos de financiamento da construção de uma nova usina nuclear. A energia nuclear é competitiva e confiável, no nível da operação, mas é altamente sensível ao custo do investimento e ao nível de utilização do capital investido (o fator de capacidade).

- *os “custos externos” da geração de energia nuclear (custos que se associam à saúde e meio ambiente), especialmente em comparação com as alternativas energéticas a esta tecnologia;*

A questão do “risco regulatório” do investimento em energia nuclear remete, em boa medida, às preocupações com os impactos ambientais potenciais da geração deste tipo de energia. Estes impactos se distribuem ao longo de toda a cadeia produtiva da energia nuclear, relacionando-se às várias etapas de produção do combustível nuclear e ao transporte do combustível para as usinas, à segurança operacional destas e à disposição dos rejeitos radioativos após utilização na geração de energia.

As preocupações com a segurança operacional das usinas ganham relevância, em geral, após a ocorrência de um acidente nuclear. Embora só tenham ocorrido três acidentes relevantes na história da geração de energia nuclear, tal ocorrência tem impactos significativos e duradouros na opinião pública mundial e, em muitos países, nos tomadores de decisões políticas.

- *os mecanismos regulatórios e de mercado para minimizar custos de geração e “custos externos” associados à energia nuclear.*

Segurança socioambiental: o ambiente regulatório em que opera o setor conta com um conjunto de instrumentos voltados para harmonizar normas e padrões internacionais relacionados à segurança e a estabelecer princípios e procedimentos no setor. Este quadro regulatório internacional ganhou impulso na sequência do acidente de Chernobyl e sua expressão maior é a Convenção sobre Segurança Nuclear (CNS) em vigência desde 1996.

Entretanto, a CNS não tem poder de sanção e seus padrões e diretrizes são tomadas como recomendações pelos governos dos países-membros. Portanto, as instâncias domésticas de regulação têm papel preponderante. Há dois principais modelos regulatórios da produção de energia nuclear: no primeiro, não há separação nítida entre as funções públicas de regulação e inspeção de segurança e as de desenvolvimento e promoção desta tecnologia. No segundo, adota-se o princípio da independência da autoridade regulatória encarregada de garantir a segurança nuclear *vis à vis* de outras instituições que desempenham funções de apoio, desenvolvimento e promoção da energia nuclear.

Participação da iniciativa privada: dado o alto custo de capital e os riscos financeiros envolvidos na construção de uma usina nuclear, o foco da discussão sobre a forma de estruturação dos projetos nucleares tem sido o modelo de financiamento. No que se refere aos modelos de financiamento da construção de usinas nucleares, a experiência internacional registra uma variedade significativa de estruturas, implementadas em diferentes países.

Energia nuclear no Brasil

A PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR NA CAPACIDADE INSTALADA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA É DE 1,4%

O Brasil tem atualmente duas centrais nucleares em funcionamento e uma terceira em construção. Essas duas centrais respondem por 1,4%

da capacidade instalada e por 2,5% da produção de energia elétrica no país (dados de 2014).

A forte dependência da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica no Brasil (62%) contrasta com o padrão mundial, em que essa fonte responde apenas por 17% do total, enquanto os combustíveis fósseis representam 67,2%¹. No mundo, a energia nuclear participa com 10,9% do suprimento de energia elétrica.

O vasto potencial hídrico no Brasil, a abundância de recursos naturais e a disponibilidade de condições climáticas favoráveis à utilização de fontes de energia renováveis concorrem para que o país tenha optado pelo desenvolvimento de uma matriz elétrica fortemente dependente desses recursos.

Se há inegáveis vantagens em termos de custos de produção e baixa geração de gases de efeito estufa, há, por outro lado, as desvantagens inerentes à instabilidade na geração decorrente da variação climática, além dos custos ambientais inevitáveis na construção de usinas hidroelétricas com grandes reservatórios.

AS USINAS NUCLEARES NO BRASIL: UMA HISTÓRIA SUJEITA A MARCHAS E CONTRAMARCHAS

A decisão de construir a primeira usina nuclear no Brasil – Angra 1 – foi tomada em 1969 e as obras para a sua construção tiveram início em 1972. Em 1975 foi assinado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, que previa a construção de oito usinas nucleares no país, das quais apenas duas foram adiante. Em 1981 teve início a construção de Angra 2 e três anos depois, em 1984 começou a construção de Angra 3.

Nota-se que o período de tempo decorrido entre o início da construção de cada uma das usinas e o início de sua operação comercial aumentou de forma expressiva: foram necessários 13 anos para Angra 1 e 20 anos para Angra 2. Angra 3, que começou a ser construída em 1984, tem previsão de entrada em operação para 2020: 36 anos terão se passado, caso esse prazo venha de fato a ser cumprido.

1. *Informações relativas ao ano de 2012.*

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2007, prevê, em seu cenário mais conservador, a construção de quatro novas usinas, após Angra 3, até 2030.

O BRASIL TEM EXPRESSIVAS RESERVAS DE URÂNIO, DOMÍNIO DA TECNOLOGIA DE ENRIQUECIMENTO E COMPROVADA EXPERIÊNCIA NO SETOR

Do ponto de vista da disponibilidade do minério, o Brasil tem situação bastante favorável. Com apenas 25% do território prospectado, o Brasil possui a sétima maior reserva do mundo. O volume das reservas brasileiras de urânio pode ser significativamente ampliado com novos trabalhos de prospecção e pesquisa mineral.

Embora domine a tecnologia de enriquecimento de urânio, o Brasil não dispõe de capacidade industrial em todas as etapas do ciclo do combustível nuclear. Atualmente, o processo de conversão é realizado no Canadá e o enriquecimento do urânio brasileiro é efetuado na Europa e enviado em contêineres para a Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), que está localizada no Município de Resende, no Rio de Janeiro.

O objetivo do governo brasileiro é diminuir a dependência do exterior para o enriquecimento de urânio. O PNE 2030 considera que, em uma perspectiva de longo prazo, a oferta de combustível nuclear, no caso da instalação de novas centrais geradoras, não constitui necessariamente uma restrição, uma vez que a importação de urânio enriquecido é sempre uma possibilidade.

DESDE 1º DE JANEIRO DE 2013, A ELETRICIDADE PRODUZIDA PELAS USINAS ANGRA 1 E ANGRA 2 É COMERCIALIZADA COM TODAS AS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA DO SIN, EM REGIME DE COTAS-PARTES.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define anualmente as proporções destas cotas-partes e os montantes anuais de energia a serem alocados, de acordo com os mercados consumidores de cada distribuidora. Além disso, a ANEEL estabelece um valor de receita fixa anual correspondente à energia contratada, faturada junto às distribuidoras.

Entretanto, o atual modelo de comercialização da energia gerada pelas centrais nucleares no Brasil dificulta a sua plena integração ao regime de sistema de preços no setor. Tendo sua tarifa definida em termos de cotas-partes e sendo a energia gerada repartida entre as distribuidoras, a geração nuclear não integra plenamente o regime de comercialização de energia de reserva, que se dá pela via dos leilões promovidos pela ANEEL.

A energia nuclear gerada no Brasil tem condições de desempenho (fator de capacidade) que a tornam fonte propícia para integrar o regime de energia de reserva, contribuindo para aumentar a segurança no fornecimento de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN). O ideal seria integrá-la ao sistema de leilões da ANEEL.

EMBORA A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL ATINJA A FAIXA DE PREÇOS PRATICADA PELAS TERMELÉTRICAS CONVENCIONAIS, OS CUSTOS DOS INVESTIMENTOS NO PAÍS SÃO ELEVADOS, EM COMPARAÇÃO AO QUE PREVALECE NO RESTO DO MUNDO.

As estimativas realizadas pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) indicam que o custo nivelado no Brasil não seria muito distante daqueles que prevalecem em outros países que desenvolvem programas de energia nuclear.

Entretanto, escala de operação, custo do capital e tempo de construção são variáveis essenciais que afetam os custos e que concorrem para onerar os investimentos no Brasil.

A construção de Angra 3 encontra-se novamente paralisada, à espera da conclusão das investigações sobre denúncias de corrupção, cancelamento de contratos suspeitos, novos cálculos para as necessidades de financiamento e para os preços. Ainda assim, a Eletronuclear acredita que seja possível concluir a obra no prazo de 2020.

O DESENVOLVIMENTO DA FONTE NUCLEAR EXIGE INSTITUIÇÕES FORTES E MODELO REGULATÓRIO ADEQUADO PARA GARANTIR A SEGURANÇA E VIABILIZAR OFERTA A PREÇOS COMPETITIVOS COM SEGURANÇA ENERGÉTICA.

A Constituição Federal determina que todas as atividades relacionadas à energia nuclear são de competência exclusiva da União.

Há no modelo institucional e regulatório brasileiro duas características que são apontadas por muitos analistas como entraves para o desenvolvimento da energia nuclear no país:

- a. A primeira refere-se ao papel da CNEN, que exerce simultaneamente múltiplas funções – regulação, licenciamento e fiscalização das instalações nucleares no Brasil, além de ter a missão de promover e incentivar o uso da energia nuclear no Brasil.
- b. A segunda está relacionada ao monopólio estatal na exploração e produção da energia nuclear no Brasil. Há razoável grau de consenso entre especialistas quanto à necessidade de contar com a contribuição da iniciativa privada para o desenvolvimento da geração nuclear no Brasil. Menor grau de consenso há sobre a solução jurídico-institucional para lidar com essa questão.

O FINANCIAMENTO É UMA ETAPA SEMPRE DIFÍCIL EM GRANDES PROJETOS DE INFRAESTRUTURA, MAS É PARTICULARMENTE COMPLEXO EM PROJETOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR

No caso do Brasil, considera-se que são necessários pelo menos dez anos entre a decisão de investir e o início da operação da usina, passando pelo licenciamento e construção. Além disso, o país tem histórico de atrasos nos cronogramas e aditivos nos projetos iniciais que implicam em expressivo crescimento dos custos, comprometendo muitas vezes a rentabilidade dos projetos.

A estrutura de financiamento concebida para a retomada de Angra 3 em 2010 era fortemente dependente da participação do BNDES e do aporte de capital próprio da Eletrobrás. O agravamento da crise econômica nos últimos anos, as dificuldades vividas pelo Sistema Eletrobrás e o redimensionamento dos recursos disponíveis para crédito do BNDES sugerem que será necessário buscar novo modelo de financiamento.

Há alguns estudos desenvolvidos recentemente com propostas alternativas de modelos de negócios que permitem viabilizar a expansão da geração nuclear no Brasil. As diferentes propostas reconhecem a conveniência de se estimular a participação da iniciativa privada nesses projetos, seja na fase de mineração, seja na construção e operação das centrais nucleares.

A DECISÃO DE PROMOVER A EXPANSÃO DA GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL NÃO PODE PRESCINDIR DE UM APROFUNDAMENTO DO DEBATE SOBRE VANTAGENS E RISCOS DESSA FONTE DE GERAÇÃO DO PONTO DE VISTA SOCIOAMBIENTAL NO PAÍS.

A questão mais relevante relacionada aos impactos ambientais da geração nuclear, contudo, localiza-se no gerenciamento dos rejeitos radioativos, que podem afetar a saúde das pessoas e o meio ambiente. Os riscos são resultantes de fugas eventuais a partir do armazenamento e repositório.

No Brasil, a Eletronuclear é a responsável pelo gerenciamento dos rejeitos gerados em suas usinas, o que inclui desde a guarda dos materiais radioativos, até a sua disposição final em instalações apropriadas e operadas pela CNEN.

Está prevista a construção de um Repositório Nacional de Rejeitos Radioativo de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN). A CNEN tem a incumbência legal de construí-lo até 2018.

O Brasil ainda não tem uma política de reprocessamento de combustível irradiado. O país precisa avançar na definição sobre o destino dos combustíveis irradiados. Enquanto essa política não é definida, é importante que o país avance na construção do RBMN.

OS PRINCIPAIS TEMAS NA AGENDA DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL

A discussão sobre a participação da fonte nuclear no futuro da geração de energia elétrica no Brasil desenvolvida neste relatório levou à identificação de uma série de questões que precisam ser tratadas se o país, de fato, pretender avançar no desenvolvimento dessa fonte de energia.

A agenda a seguir não pretende ser exaustiva, mas tem o objetivo de sintetizar alguns dos principais desafios que precisam ser enfrentados para que o país possa contar com segurança com a fonte nuclear para compor sua matriz de energia elétrica.

- **Programa de geração nuclear de longo prazo:** a construção de centrais nucleares tem elevado custo de investimentos e requer longo período de tempo. O país precisa ter clareza sobre a contribuição que se espera da fonte nuclear para a geração de energia elétrica, de modo a definir o número de usinas a serem construídas, sua distribuição no território nacional e as possibilidades de economia de escala em sua construção.
- **Viabilização da participação da iniciativa privada:** do ponto de vista econômico, o principal desafio a vencer para uma maior participação da fonte nuclear na matriz de energia elétrica no Brasil é o elevado custo de construção, que, combinado à escassez de recursos públicos para o financiamento, dificulta o seu equacionamento. É fundamental rever o ambiente regulatório para viabilizar a participação da iniciativa privada, tanto em algumas fases da produção de combustível nuclear, quanto na construção e operação das usinas. Um passo fundamental nessa direção é a aprovação de uma Proposta de Emenda Constitucional que altere os artigos 21 e 177 da Constituição Federal.
- **Política para o ciclo do combustível nuclear:** o país tem abundantes recursos minerais e domina o ciclo do combustível nuclear. Entretanto, não dispõe de capacidade industrial para o processamento doméstico de todo o combustível necessário à operação de Angra 1 e Angra 2. A entrada em operação de Angra 3 e a eventual construção de novas usinas aumentarão a demanda por combustível nuclear. A questão da autossuficiência na oferta do combustível é importante, embora não seja condição *sine qua non*, para dar garantia de produção às centrais nucleares. No entanto, poderia contribuir para que o país se torne um ator importante no mercado internacional de combustíveis.

- **Revisão da estrutura institucional:** uma estrutura institucional transparente com efetiva separação de atribuições das funções de regulação, licenciamento e fiscalização daquelas relacionadas ao fomento e difusão do uso da energia nuclear é fundamental para conferir maior transparência e segurança para a opinião pública e investidores.
- **Política para os rejeitos radioativos:** a disposição definitiva dos rejeitos radioativos continua sendo a principal questão pendente no que se refere aos impactos socioambientais da atividade de geração nuclear no Brasil. Dois elementos são importantes nessa questão: a construção de um repositório para armazenamento de material de baixa e média radioatividade e uma política para reprocessamento de combustível.
- **Revisão do mecanismo de comercialização:** a competitividade é critério essencial para o apoio ao investimento na fonte nuclear como fonte alternativa para a operação na base da matriz energética brasileira. Para manter a modicidade tarifária, é importante que a energia gerada por fontes nucleares possa concorrer com outras fontes térmicas nos leilões da ANEEL. Entretanto, para isso é importante definir um novo modelo de negócios para o setor.



1 INTRODUÇÃO

Fonte: /Shutterstock

A crise hídrica que o Brasil viveu no biênio 2013-2014 e seus impactos sobre a oferta de energia aprofundaram o debate sobre a matriz de energia elétrica e o papel das fontes térmicas na segurança energética do país. A indústria brasileira já enfrentava, desde meados da década de 2000, o desafio de lidar com o expressivo crescimento dos custos de energia elétrica, muito acima da inflação, afetando suas condições de competitividade, em particular nos setores intensivos em eletricidade.

De fato, como resposta à escassez de oferta de energia elétrica resultante da crise hídrica, as centrais térmicas foram acionadas ininterruptamente, tendo como resultado o substancial aumento nas tarifas, aprofundando os problemas de competitividade da indústria nacional.

Esse episódio, que sugere que está em marcha uma transição no regime hídrico no país, evidenciou a forte dependência em relação à hidroeletricidade na geração de energia elétrica no Brasil. O esgotamento da estratégia de construção de usinas hidroelétricas com grandes reservatórios agrava o problema. Essa experiência deixou clara a falta de uma estratégia de longo prazo que garanta a diversidade de fontes e a segurança energética no país.

Os elevados custos com despacho contínuo das fontes térmicas convencionais tornam conveniente a avaliação do papel da energia nuclear na composição da matriz de energia elétrica no Brasil. Sendo uma fonte térmica capaz de operar na base do sistema, a geração nuclear pode contribuir para dar estabilidade a este, mitigando o caráter intermitente das fontes renováveis do sistema.

Apesar de ser uma fonte de produção de eletricidade relativamente limpa e potencialmente barata, a geração nuclear é alvo de grandes controvérsias tanto no contexto doméstico quanto no cenário internacional. Os três grandes acidentes com centrais nucleares – Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima – acenderam o debate sobre os riscos dessa opção e fomentaram a reavaliação da contribuição dessa fonte em vários países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Mas, além desses riscos, que têm grande repercussão e reduzida probabilidade, a intensificação do uso da geração nuclear suscita debates, particularmente em um país como o Brasil, que conta com uma vasta base de recursos naturais energéticos. Questões como custos de investimentos, características regulatórias e impactos socioambientais estão entre os temas em debate.

Para contribuir com esse debate, a Confederação Nacional da Indústria apresenta este documento, que pretende analisar a experiência internacional com o uso e as políticas voltadas para a energia nuclear e identificar as principais questões para o futuro da energia nuclear no Brasil.

A segunda seção deste trabalho descreve o panorama da geração nuclear no mundo, a sua participação na oferta de energia e as características dos marcos regulatórios em países com experiência nesse setor. Uma breve discussão sobre as vantagens e desvantagens do uso da energia nuclear é apresentada na terceira seção. A quarta seção traz uma descrição da evolução do uso e das políticas públicas para a geração nuclear no Brasil, identificando os principais gargalos e desafios. Na quinta seção são discutidos os principais objetivos da participação da energia nuclear em um país com as características do Brasil e é apresentada uma agenda de temas que devem compor o debate de políticas públicas para que o País possa contar com segurança com a contribuição da fonte nuclear para compor sua matriz de energia elétrica. A sexta seção conclui.



2 PANORAMA DA GERAÇÃO NUCLEAR NO MUNDO

Fonte: Shutterstock

2.1 A participação da energia nuclear na oferta energética global

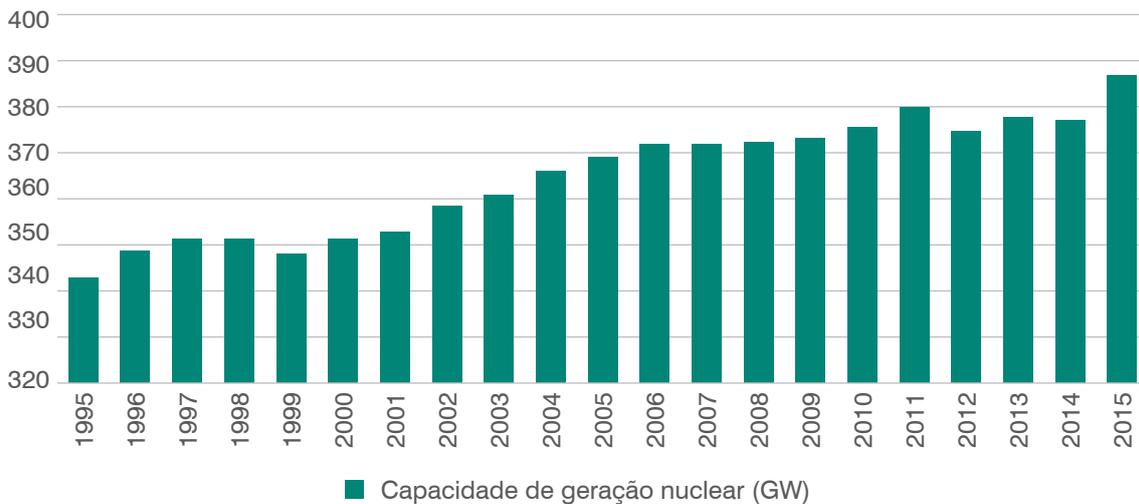
Em 1973, a energia nuclear respondia por apenas 0,9% da oferta primária de energia no mundo, participação que atinge 4,8%, em 2013 – ainda muito atrás das principais fontes (petróleo, com 31,1%; carvão, com 28,9% e gás natural, com 21,4%). Neste último ano, a energia nuclear ocupava a quarta posição (atrás do carvão, do gás natural e da hidroeletricidade) entre as fontes de energia utilizadas na geração de eletricidade no mundo, com participação equivalente a 10,6% do total, contra apenas 3,3%, em 1973.

Registrou-se, pois, forte crescimento da participação da energia nuclear tanto na oferta primária de energia, quanto na geração de eletricidade, quando se considera o período entre 1973 e 2013. No entanto, o exame da evolução destes indicadores revela que a importância da energia nuclear como fonte de energia no mundo se retraiu nos últimos anos. De fato, em 2006, esta fonte energética respondia por 6,2% da oferta primária de energia (contra os já citados 4,8%, em 2013).

A queda observada reflete principalmente os efeitos do acidente de Fukushima, em março de 2011, e o subsequente desligamento temporário, pelo Japão, de seus reatores nucleares, além da antecipação do descomissionamento de oito reatores na Alemanha no mesmo ano. Em consequência, a geração de energia nuclear sofreu, apenas entre 2010 e 2012, uma queda da ordem de 10%. No entanto, a partir de 2012, a geração de energia nuclear no mundo voltou a crescer – embora moderadamente.

Os Gráficos 1 e 2 abaixo sintetizam a evolução da capacidade instalada e de geração de energia nuclear no mundo, entre 1995 e 2015. No que se refere à capacidade instalada global, observa-se sensível crescimento entre 1999 e 2011, logo ligeiro declínio e relativa estabilização desde 2012. A capacidade total instalada variou de 341,4 GW em 1995 para 386,7 GW em 2015, ou seja, teve um aumento bastante modesto, da ordem de 13%, nos vinte anos considerados.

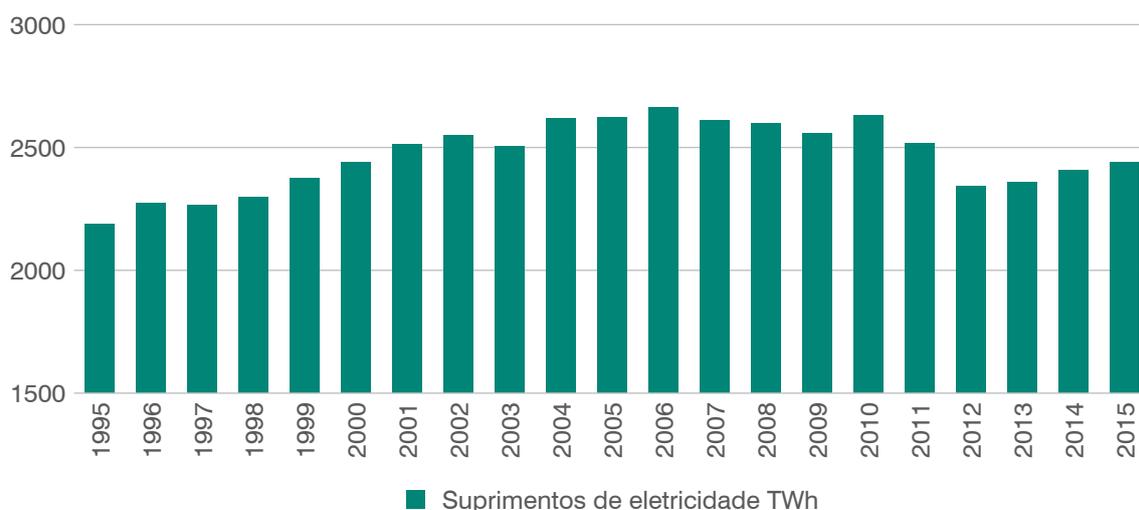
Gráfico 1 - Capacidade instalada de geração nuclear no mundo em GW (1995-2015)



Fonte: Fonte: IAEA

Já a evolução do suprimento de energia nuclear seguiu perfil similar ao do aumento de capacidade geradora, mas se diferencia deste no período posterior a 2010, em que registra queda mais acentuada em 2011 e 2012, iniciando discreta recuperação em 2013. No período entre 1995 e 2015, a geração de energia nuclear cresceu apenas 11%, passando de 2.191 TWh para 2.441 TWh.

Gráfico 2: Geração de energia nuclear no mundo em TWh (1995-2015)



Fonte: Fonte: IAEA

2.2 Capacidade instalada; evolução e determinantes

Atualmente, 442 reatores nucleares operam em 30 países², com capacidade instalada total de 384.000 MW e fator de capacidade médio de 76%. Em 2014, esses reatores forneceram 2.411 bilhões de kWh, 11% do consumo mundial de eletricidade.

A evolução da capacidade instalada (e, indiretamente, também da geração de energia nuclear) depende da entrada em operação de novas usinas, da modernização e do tempo de vida útil das usinas existentes e do descomissionamento de unidades, temporária ou definitivamente. Por sua vez, todos estes movimentos são influenciados, em muitos países, por fatores econômicos, tecnológicos e regulatórios, bem como pela percepção da sociedade em relação aos benefícios e custos da opção nuclear.

Por exemplo, seria difícil entender o padrão de evolução da capacidade instalada de geração nuclear desde os anos 70 do século passado, sem levar em conta os impactos sociais e regulatórios dos três acidentes mais significativos da história da energia nuclear (Three Mile Island, nos EUA, em 1979, Chernobyl, na Ucrânia, em 1986, e Fukushima, no

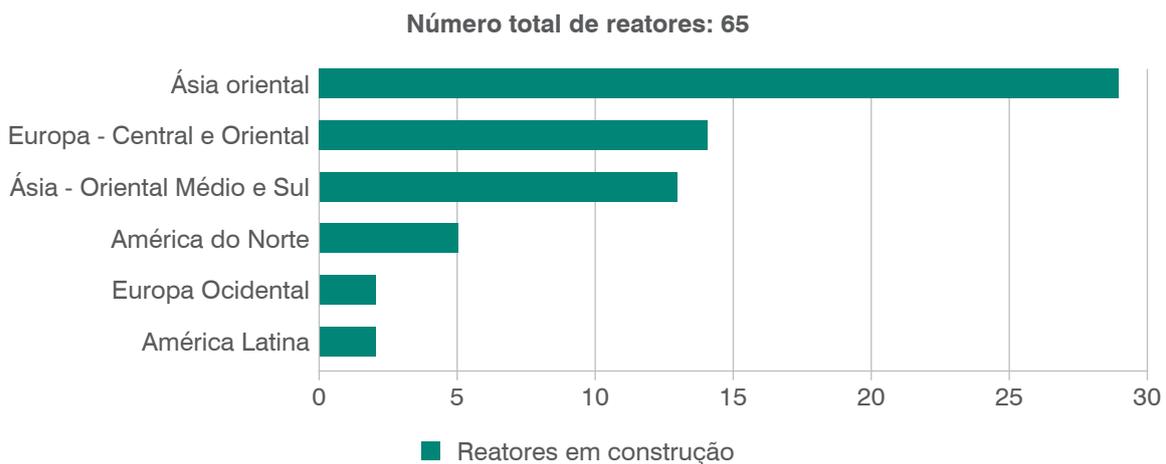
2. Em função da existência, principalmente na União Europeia, de redes elétricas de abrangência regional que viabilizam a exportação de energia, o número de países que utilizam energia nuclear supera o dos que a produzem.

Japão, em 2011). No caso de Fukushima, um dos efeitos do acidente foi o de reduzir drasticamente o início de construção de novas usinas nucleares: em 2010, 16 novas usinas tiveram sua construção iniciada, em 2011 (ano do acidente), este número caiu para quatro, recuperando-se parcialmente em 2012, quando sete novos projetos foram iniciados.

Em consequência, o crescimento da capacidade instalada tem-se dado, nos últimos anos, em ritmo muito inferior aquele observado em períodos de forte expansão dos projetos nucleares, como nos anos 80 do século passado ou nos anos anteriores ao acidente de Fukushima (IEA, 2013)³.

Atualmente, existem 65 novos reatores em construção no mundo, a maioria localizados na Ásia. Tal expansão equivale a 20% da capacidade instalada atual de geração nuclear. A China lidera a atividade, com 23 centrais em construção, totalizando 22.738 MW de capacidade, seguida da Rússia, com nove centrais e 7.731 MW de potência instalada. A Índia possui seis centrais em construção com 3.907 MW de capacidade. Quase dois terços dos reatores em construção encontram-se na Ásia e cerca de um quarto deles na Europa Central e Oriental – incluindo Rússia (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Número de reatores nucleares em construção por regiões do mundo



Fonte: IAEA

3. Os investimentos em capacidade de geração de energia nuclear caíram de US\$ 36 bilhões, em 2010, para US\$ 7,3 bilhões, em 2011, voltando a crescer em 2012 (para US\$ 13,6 bilhões), mas ainda em nível muito inferior a 2010.

Diversos países detentores de geração nuclear preveem a instalação de novos reatores, além daqueles em construção: Argentina, Armênia, Brasil, Bulgária, China, República Tcheca, Índia, Paquistão, Romênia, Rússia, Eslováquia, Coreia do Sul, África do Sul, Emirados Árabes Unidos, Ucrânia, Reino Unido, Estados Unidos. Ao todo, cerca de 160 reatores com capacidade total de 186 mil MW se encontram em fase de planejamento e outros 300 foram propostos no mundo todo.

Além disso, capacidade expressiva de geração tem sido criada mediante a modernização das usinas existentes, que reflete tendência razoavelmente disseminada de extensão da vida útil das centrais nucleares existentes. Nos Estados Unidos, cerca de 75 reatores, projetados para operar durante 25 a 40 anos, tiveram renovação de licença para estender a vida útil de 40 para 60 anos. Tal extensão dada via de regra aos 30 anos de operação do reator, justificaria o custo de reposição dos equipamentos e dos sistemas de controle. Na França, a Autorité de Sûreté Nucléaire – ASN estendeu a 40 anos a vida útil de 34 reatores da Electricité de France - EdF, de 900 MW de potência.

Por outro lado, uma quantidade considerável de reatores foi fechada, em especial nos Estados Unidos, por razões econômicas, regulatórias ou políticas. O mesmo aconteceu no Leste da Europa, na Alemanha e no Japão. Não obstante, há equilíbrio entre centrais que entram em serviço e centrais descomissionadas. De 1996 a 2015, 75 reatores saíram de operação e 80 entraram em serviço. Até 2030, a World Nuclear Association (WNA) estima que pelo menos 60 centrais atualmente em operação serão desativadas, especialmente pequenas unidades. A Alemanha lidera o movimento, com 28 centrais desativadas e 15.576 MW de potência e mais da metade do número de reatores descomissionados situa-se na Europa Ocidental.

Além dos movimentos de construção, de modernização e extensão do ciclo de vida e de desativação dos reatores, a capacidade instalada e a oferta de energia nuclear são também impactadas pela evolução tecnológica do setor, ditada por objetivos como o aumento da segurança das usinas e a redução de seu custo (e tempo) de construção.

Os modelos diferentes de reatores são classificados em gerações. Os reatores de primeira geração, construídos nos anos 50 e 60 do século passado, já foram desativados. Os de segunda geração, datam dos anos 70 e são os mais comuns entre os que se encontram em operação, muitos deles beneficiados por um ciclo de vida estendido em relação àquele para o qual foram originalmente projetados. Reatores de terceira ou “terceira mais” geração são evoluções tecnológicas incrementais a partir dos de segunda geração e foram projetados para ter um ciclo de vida de 60 anos. Já os reatores de quarta geração – ainda em fase de testes e protótipos - apresentam inovações significativas em relação aos modelos de gerações anteriores e pretendem responder às críticas feitas à energia nuclear com relação à geração de rejeitos, impactos ambientais, proliferação de armas atômicas e probabilidades de acidentes.

2.3 Distribuição geográfica da capacidade instalada

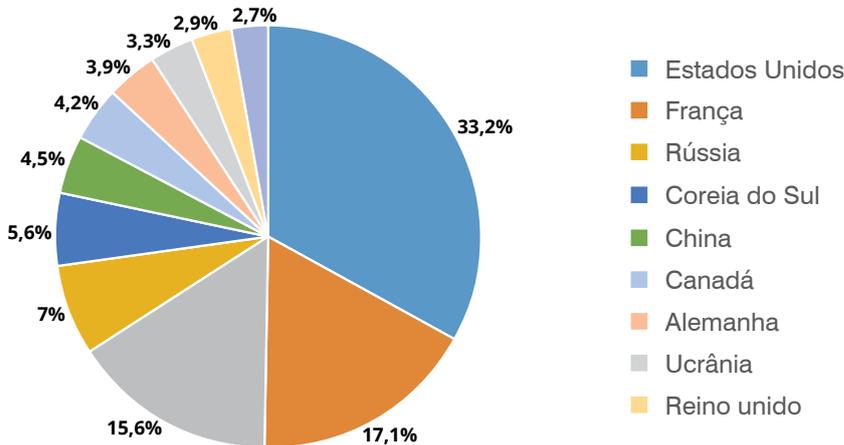
Atualmente, grande parte da energia nuclear gerada no mundo tem origem em países da OCDE, embora esta participação tenha se reduzido substancialmente ao longo das quatro últimas décadas. De fato, em 1973, os países da OCDE respondiam por 92,8% da produção de energia nuclear, cabendo à Europa não OCDE e Eurásia (que inclui Rússia e outros países da ex-URSS) 5,9%. Já em 2013, a participação da OCDE, embora ainda amplamente majoritária, havia se reduzido para 79,1%. Em contrapartida, Europa não OCDE e Eurásia já respondiam por 11,5% e China e Ásia por 7,8% do total (IEA, 2015).

Apesar da forte redução observada na participação da OCDE, o peso deste conjunto de países no mundo era, tanto em 1973 quanto em 2013, muito maior no caso da produção de energia nuclear do que da produção do conjunto de fontes de energia. Em 2013, a participação da OCDE na produção de energia era de apenas 39,2% (61,3%, em 1973).

Entre os países produtores de energia nuclear, destacam-se os EUA, com produção de 822 TWh, em 2013, correspondente a 33,2% do total mundial. França, Rússia, Coreia do Sul e China ocupam lugar de desta-

que no *ranking* dos principais produtores (Gráfico 4). Juntos, os 10 principais produtores respondiam, em 2013, por cerca de 85% da produção mundial de energia nuclear.

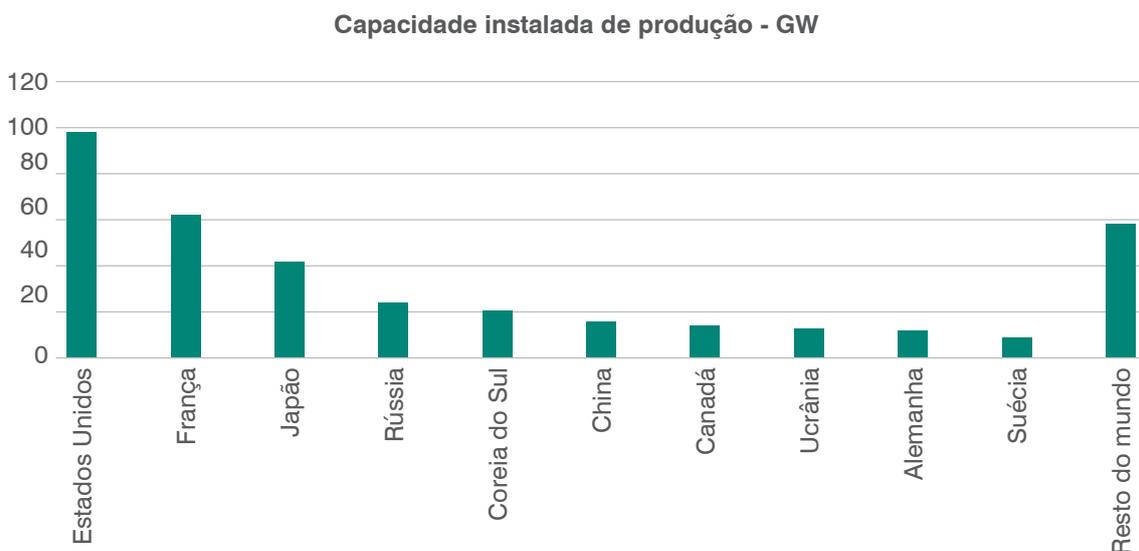
Gráfico 4 - Principais países produtores de energia nuclear em 2013 (participação no total mundial)



Fonte: OECD / IEA

Também no que se refere à capacidade instalada (Gráfico 5), os EUA ocupam a primeira posição no *ranking*, seguidos por França, Japão, Rússia, Coreia do Sul e China. Os dez primeiros países do *ranking* representaram 84% da capacidade instalada global.

Gráfico 5 - Capacidade instalada de produção de energia nuclear em 2013 – principais países (em GW)

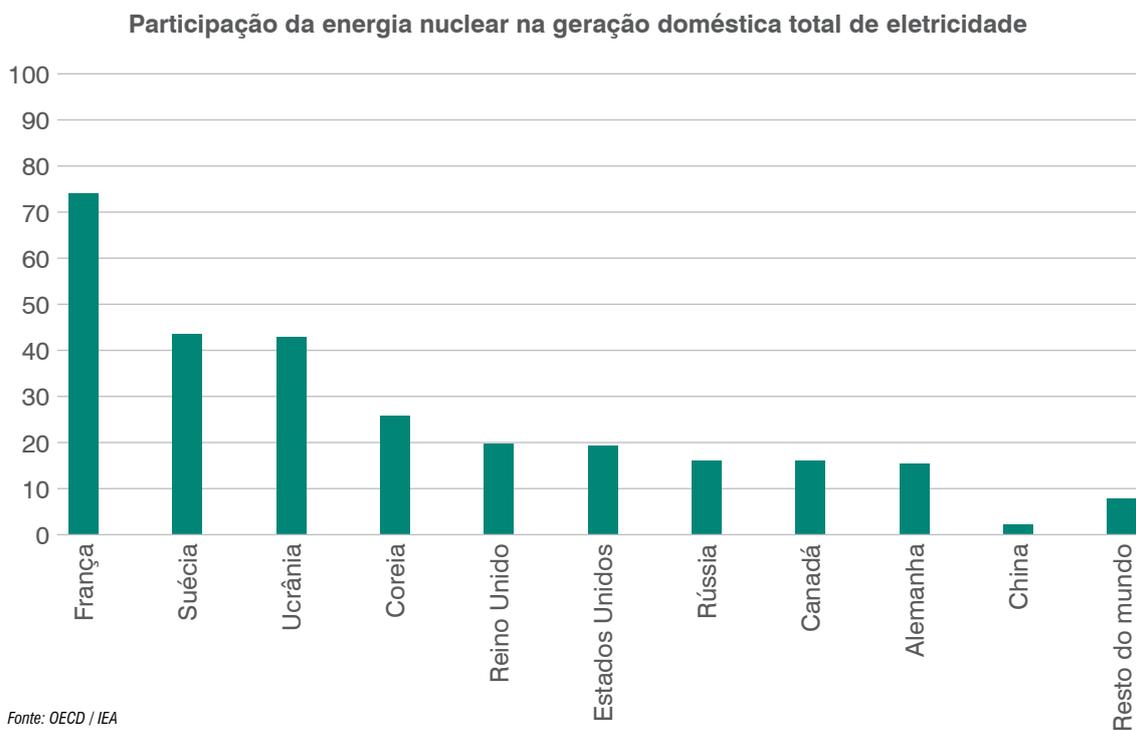


Fonte: OECD / IEA

Rússia, China e Índia são responsáveis hoje por mais de 15% da geração nuclear do mundo e têm planos ambiciosos de expansão de sua capacidade de geração. Estes três países “possuem juntos 93 reatores em operação e mais 40 em construção, ou seja, mais de 60% dos reatores em construção atualmente são nesses países” (FGV, 2016).

No que se refere à participação da energia nuclear na geração de energia dos principais países produtores daquela fonte energética, a França lidera o *ranking* dos principais países, com 74,7% (Gráfico 6). Seguem-se Suécia e Ucrânia, países em que aquela participação alcança 43%. Os demais países (à exceção da China) entre os “dez mais” têm níveis de participação da energia nuclear entre 15% e 25% do total. A China, décima colocada no *ranking*, tinha, em 2013, apenas 2,1% de sua geração de energia originada na fonte nuclear. Já os EUA, maiores produtores e detentores da maior capacidade instalada em energia nuclear, aparecem em sexto lugar no *ranking* dos países com maior participação desta fonte na geração total de energia. No resto do mundo, a participação da fonte nuclear na energia gerada situa-se próxima a 8%⁴.

Gráfico 6 - Participação (%) da energia nuclear na geração doméstica de eletricidade dos principais produtores - 2013



4. Antes do acidente de Fukushima, cerca de 20% da energia gerada no Japão provinha da fonte nuclear. Com a volta gradual da operação dos reatores desligados em 2011, espera-se que, em 2030, aquele nível de participação volte a ser atingido (FGV, 2016).

No mundo, dezesseis países dependem da geração nuclear para suprimento de pelo menos 25% da carga. Além de quatro dos dez maiores produtores de energia nuclear (França, Suécia, Ucrânia e Coreia do Sul), diversos outros países europeus (Bélgica, República Tcheca, Finlândia, Hungria, Eslováquia, Bulgária, Suíça e Eslovênia) superam aquele patamar de participação.

2.4 Políticas nucleares em países selecionados

As políticas nucleares nacionais são condicionadas por uma série de fatores e objetivos. Em geral, associam preocupações com a segurança energética e a garantia de provisão sem as oscilações de quantidade e preço que caracterizam outras fontes, tanto não renováveis quanto renováveis. Para alguns países, objetivos industriais – desenvolvimento de uma cadeia de suprimento de equipamentos e controle do ciclo de produção do combustível nuclear – e/ou geopolíticos adquirem relevância com pesos variados.

Até o final dos anos 70, o número de usinas nucleares registrou intenso crescimento. A ocorrência de graves acidentes, em países tão diferentes quanto os EUA (Three Mile Island, em 1979) e a então URSS (Chernobyl, em 1986), e os altos custos de construção das usinas nucleares interromperam este crescimento. Durante quase 30 anos os investimentos foram paralisados e a energia nuclear tornou-se um alvo prioritário dos grupos ambientalistas no mundo, mas especialmente nos países desenvolvidos.

No entanto, mais recentemente, a energia nuclear voltou à agenda internacional de produção de energia elétrica. Além dos fatores relacionados à segurança energética que são tradicionalmente invocados para apoiar o uso da energia nuclear – abundância de matéria prima (urânio), alto fator de capacidade e suprimento de energia elétrica não sujeito às flutuações observadas na oferta de fontes renováveis, além do baixo custo operacional – ela foi identificada como alternativa energética relevante no bojo das discussões sobre mudança climática, por ser considerada uma fonte limpa, cuja operação acarreta a emissão de baixos volumes de carbono.

O interesse no aproveitamento da energia nuclear renasceu em diversos países por força da demanda crescente de energia, dos efeitos negativos sobre o clima provocados pela queima de combustíveis fósseis e das incertezas associadas à importação de combustíveis.

A ocorrência de um grave acidente na operação da central nuclear de Fukushima, no Japão, em março de 2011 – causado por um terremoto e um consequente tsunami – reavivou as críticas ao uso da energia nuclear e voltou a atuar como um fator de limitação ao crescimento da utilização deste tipo de energia. Outros problemas ambientais, resultantes da operação de reatores nucleares – como os rejeitos produzidos no processo nuclear, por exemplo – voltaram a ganhar destaque nos debates.

Por outro lado, o acidente de Fukushima também ensejou revisões regulatórias e aperfeiçoamentos tecnológicos voltados para aumentar a segurança operacional das usinas e a capacidade de resposta dos equipamentos e funcionários a eventos naturais com impactos potenciais sobre reatores ou a problemas gerados pelo próprio funcionamento das usinas.

Em função dos riscos reais ou presumidos associados à operação de usinas nucleares, alguns países, como a Alemanha, o Japão e até mesmo a França, estão revisando, nos últimos anos, suas políticas pró-energia nuclear.

O Japão, por exemplo, considera reduzir sua dependência em relação à energia nuclear, o mesmo ocorrendo com a França, país em que a energia nuclear responde por 75% da oferta doméstica de energia. Neste caso, o objetivo seria reduzir esta participação a 50% até 2025.

Alemanha, Bélgica e Suíça decidiram desativar ou não estender o período de vida de suas centrais nucleares, ao passo que Tailândia e Itália optaram por adiar ou abandonar planos de iniciar um programa nuclear (OECD / IEA, 2013).

Outros países, no entanto, movidos por preocupações econômicas e/ou de segurança energética aprofundaram sua opção pela ampliação da capacidade instalada de energia nuclear, entre os quais China (onde a energia nuclear responde por 2% da geração de energia elétrica), Índia (3%), Rússia (16%) e – na OCDE – a Coreia do Sul (30%). No caso da

China, o processo de aprovação de novas plantas nucleares chegou a ser suspenso após o acidente de Fukushima, mas o programa de construção de usinas foi retomado posteriormente, embora com condicionais quanto à tecnologia utilizada (terceira geração apenas) e às áreas de localização das usinas (somente regiões costeiras).

Estados Unidos e Reino Unido também mantiveram seus planos de expansão do parque nuclear, sendo que, no caso do Reino Unido, estes planos são beneficiados por apoio estatal a projetos energéticos com baixo nível de emissões de CO₂.

A seguir, apresenta-se um resumo das políticas nucleares de alguns países.

EUA

Os Estados Unidos são o maior país produtor de energia nuclear, respondendo por cerca de 30% da produção mundial de eletricidade de origem nuclear. Os 99 reatores instalados e em operação no país foram, em sua grande maioria, construídos entre 1967 e 1990, e produziram 19% da oferta total de energia elétrica doméstica.

Estes reatores são operados atualmente por 30 empresas privadas. Na realidade, desde a década de 50 do século passado, o setor privado participa da produção de eletricidade a partir da energia nuclear nos EUA e hoje este é o país com maior participação privada no setor. O setor privado desempenha as atividades de construção e operação das usinas nucleares.

O envolvimento do governo inclui a responsabilidade pelo licenciamento nuclear e ambiental, financiamento de P&D, planejamento energético e, desde 1982, também pelos rejeitos gerados nas usinas nucleares do país (FGV, 2016).

A regulação da energia nuclear nos EUA é feita pela NRC (Comissão Reguladora Nuclear), agência governamental independente, estabelecida em 1974, responsável pela regulação e licenciamento de toda atividade nuclear no país. Em 2003, a NRC criou, “visando a acelerar o processo de instalação de novas usinas, uma certificação da tecnologia” através da qual “o modelo de reator que (...) aprovado após extensa análise

pode ser construído em qualquer lugar dos EUA (após avaliação específica do local)” (FGV, 2016).

Nos últimos anos, os custos relativamente mais baixos da geração a gás natural geraram dúvidas sobre a viabilidade econômica de algumas unidades em operação e inibiu a implantação de novos reatores. Ainda assim, encontram-se em construção cinco novas usinas nucleares.

JAPÃO

Desprovido de fontes de energia suficientes, o país é muito dependente de importações. Cerca de 84% das necessidades de energia do Japão são atendidas por importações, o que o torna altamente dependente da evolução do contexto e dos mercados internacionais de energia. Isso levou o país a incluir a opção nuclear no leque de suas prioridades energéticas.

Já em 1966, o primeiro reator nuclear para fins comerciais entrou em operação. Desde 1973, a fonte nuclear tem sido prioridade estratégica nacional e o país possui a terceira maior capacidade instalada de energia nuclear no mundo (FGV, 2016). Os 50 principais reatores do país supriam 26% da demanda nacional de energia elétrica antes do acidente de Fukushima e estimava-se que esse aporte atingisse pelo menos 40% em 2017.

O acidente de 2011 alterou significativamente o panorama vigente até então e teve impactos importantes sobre o quadro regulatório do setor e sobre os níveis de geração de energia nuclear no país.

No caso da regulação, a principal mudança introduzida foi a criação da Autoridade de Regulação Nuclear (NRA), “órgão independente responsável por reformular as exigências regulatórias do país e revisar as diretrizes de segurança buscando incorporar as lições aprendidas com o acidente de Fukushima”. Antes do acidente, a regulação era feita por três agências, uma das quais – a Agência de Segurança Nuclear e Industrial (NISA) - também se dedicava a promover o uso da energia nuclear (FGV, 2016). Relatório da Comissão Nacional Parlamentar - *Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission* – observou que a instância reguladora não supervisionava adequadamente a segurança nuclear e que teria havido “captura” dos reguladores pelos interesses dos regulados.

A geração de energia nuclear foi interrompida em todo o país após o acidente, mas “até março de 2016, quatro unidades já haviam sido religadas, após terem sido inspecionadas e avaliadas” (FGV, 2016). Há ainda 43 reatores potencialmente aptos a reiniciar a operação, 24 deles em processo de aprovação para reinício da operação. Por ora, não está prevista a implantação de novas centrais. Segundo o mais recente plano de expansão, a participação nuclear será de 20 a 22% da oferta em 2030. Caberá à Nuclear Regulation Authority (NRA) decidir se as centrais nucleares existentes atendem aos novos requisitos regulatórios, que são os mais estritos do mundo.

Devido ao descomissionamento de centrais nucleares, a participação de combustíveis fósseis na geração aumentou de 62% para 88% nos últimos quatro anos e a tarifa do consumidor residencial aumentou 13,7% nesse período.

Em abril de 2013, o Ministro de Comércio e Indústria (Ministry of Economy Trade and Industry - MITI) informou que as geradoras japonesas gastaram 9,2 trilhões de ienes adicionais (US\$ 93 bilhões) na importação de combustíveis fósseis desde o acidente de Fukushima.

ALEMANHA

A energia nuclear ganhou fôlego na Alemanha com a crise do petróleo, nos anos 70 do século passado. No entanto, o apoio à utilização desta fonte energética reduziu-se significativamente já em meados dos anos 80, após o acidente de Chernobyl, de tal forma que nenhuma nova usina nuclear foi comissionada depois de 1989 (FGV, 2016).

O governo de coalizão formado após as eleições federais de 1998 incluiu em seu programa a desativação dos reatores. No ano 2000, o Governo Federal e as concessionárias de energia acordaram abolir o uso da energia nuclear na geração de energia elétrica. O fim da construção de novas centrais nucleares foi legalmente determinado.

Com a eleição de novo governo em 2009, a desativação foi cancelada, mas logo reintroduzida em 2011, com o fechamento imediato de oito reatores. Apesar disso, até o acidente de Fukushima (março de 2011), a

Alemanha abastecia $\frac{1}{4}$ da sua demanda de eletricidade a partir da fonte nuclear, utilizando 17 reatores.

O acidente de Fukushima deu novo impulso à política de substituição da fonte nuclear por fontes renováveis, cujo custo total é estimado em um trilhão de euros. Fixaram-se datas para o fechamento de todas as centrais nucleares alemãs. A política de substituição da energia nuclear por geração com base em combustíveis fósseis e fontes renováveis subsidiadas é conhecida como Energiewende.

A transição para uma nova matriz energética levará ao fechamento do último reator em 2022. Cerca de 80% da energia elétrica terão origem em fontes renováveis em 2050, mas, no curto prazo, estima-se que aumentará a participação do carvão – responsável por metade da energia elétrica gerada no país – na matriz energética alemã. Além disso, França, Polônia e Rússia esperam aumentar a exportação de energia para a Alemanha, principalmente de origem nuclear e, no caso da Rússia, também de gás natural.

Em termos de marco regulatório, “o Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMUD) é o responsável pelo estabelecimento de diretrizes para o setor, enquanto o Instituto Federal de Proteção contra a Radiação (BfS), órgão governamental independente, realiza o licenciamento de atividades relacionadas à indústria nuclear” (FGV, 2016).

FRANÇA

A França possui poucas reservas de combustíveis fósseis e já aproveitou a maior parte da sua fonte hidrelétrica. O programa nuclear nacional foi desenvolvido como uma resposta à crise do petróleo dos anos 70 do século passado. A fonte nuclear é central na política francesa de energia – movida por preocupações de segurança energética – e no portfólio de recursos energéticos do país, respondendo por $\frac{3}{4}$ da geração de energia elétrica – com previsão de redução desta participação para 50%, em 2025⁵. Em consequência, a França é hoje o segundo maior gerador de energia nuclear no mundo e o país em que a energia nuclear detém a maior participação na geração de eletricidade.

5. Na França, cerca de 17% da oferta de energia provém de combustível nuclear reciclado.

A França é também o maior país exportador líquido de eletricidade no mundo devido ao seu custo muito baixo de geração nuclear, tendo auferido em 2015 cerca de € 3 bilhões com essas exportações. Além disso, o país é bastante ativo no desenvolvimento de tecnologia nuclear, também exportando reatores, produtos combustíveis e serviços ligados ao setor. Na atualidade, a Comissão de Energia Atômica – CEA coordena o desenvolvimento de reator de IV geração objetivando a operação na França e a exportação em 2035-2040.

No que diz respeito ao quadro regulatório, foi criado, em 2006, “um órgão governamental independente, a ASN (Autoridade de Segurança Nuclear), responsável pela regulação e segurança nuclear”. Já a pesquisa nuclear é feita pelo IRSN (Instituto de Proteção Radiológica e Segurança Nuclear). Duas empresas têm papel central na implementação do programa nuclear francês, ambas estatais: a Areva, fundada em 2001 e responsável pela mineração de urânio, construção de reatores e desenvolvimento de novas tecnologias, e a EDF (Electricité de France), que é a maior concessionária de energia elétrica nuclear do mundo e responsável pela operação dos reatores franceses (FGV, 2016).

ÍNDIA

Na Índia, grande parte da geração de energia provém da queima de combustíveis fósseis, especialmente carvão e petróleo, produtos que são, em grande medida, importados pelo país.

No entanto, não sendo signatária do Tratado de Não-Proliferação Nuclear por força do seu programa armamentista, a Índia permaneceu 34 anos excluída do comércio de reatores e materiais nucleares, o que prejudicou seu avanço no campo da energia nuclear para fins pacíficos até 2009, mas a levou a desenvolver o ciclo de combustível para explorar suas reservas de tório (em lugar do uso do urânio como matéria prima).

Preocupações com os impactos ambientais e relacionados à segurança energética desta composição da matriz de energia têm incentivado o desenvolvimento de um programa nuclear ambicioso, que pretende alcançar uma capacidade instalada de 14.600 MW em operação em 2020. Estima-se que o programa em curso possa suprir 25% da demanda de eletricidade a partir da fonte nuclear em 2050.

CHINA

A geração de energia elétrica na China é predominantemente de fonte fóssil (com destaque para o carvão) com graves consequências sobre a qualidade do ar – como tem sido amplamente reconhecido pelo governo de Beijing. O parque gerador se destaca pela presença de duas grandes usinas hidrelétricas: Três Gargantas, de 18,2 GW, e Rio Amarelo, de 15,8 GW.

A participação nuclear na geração foi de apenas 2,4% da produção total em 2014. O esforço para aumentar a participação da energia nuclear no país se deve cada vez mais à contaminação atmosférica causada pelas usinas movidas a carvão.

Há 28 reatores nucleares em operação, 23 em construção e outros 23 por começar a construção. Há novos reatores em fase de planejamento, incluindo alguns dos mais avançados do mundo. Esse acréscimo elevará a capacidade instalada a pelo menos 58 GW em 2020-2021 e a 150 GW em 2030, atendendo, neste ano, a 10% do consumo total de eletricidade.

O país é razoavelmente autossuficiente em projetos e construção de reatores, bem como em outras fases do ciclo de combustível. Além disso, a China tem investido na adaptação e aperfeiçoamento de tecnologia nuclear ocidental.

TURQUIA

A Turquia é um *newcomer* no mundo da energia nuclear. Em 2010, o país assinou um acordo com a Rússia para a construção e operação de uma usina nuclear em Akkuyu. O que parece chamar a atenção no programa nuclear turco é a tentativa de inovar no que se refere a modelos de negócios no setor – uma questão que sabidamente permanece em aberto e é tema de muitas controvérsias.

Assim, o acordo acima referido prevê a adoção de modelo de financiamento BOO (*Build, Operate and Own*) com uma empresa estatal russa, comprometendo-se a Turquia a adquirir parte da energia gerada por um preço fixado durante determinado período.

Outro acordo para a construção de uma usina nuclear na Turquia, assinado posteriormente com o Japão, opta por modelo diverso, em que a empresa estatal turca de eletricidade adquire parte do capital da companhia criada para construir e operar a planta nuclear.



3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ENERGIA NUCLEAR: O DEBATE INTERNACIONAL

Fonte: Shutterstock

3.1 Os termos do debate internacional sobre a energia nuclear

O debate internacional sobre vantagens e desvantagens (ou benefícios e custos) da energia nuclear se desenvolve essencialmente em torno de três questões:

- os custos de geração da energia nuclear (seu nível, composição e evolução) e a competitividade desta tecnologia *vis à vis* de fontes concorrentes, renováveis e não renováveis;
- os “custos externos” ou externalidades – positivas e negativas – da geração de energia nuclear (custos que se associam à saúde e meio ambiente), especialmente em comparação com as alternativas energéticas a esta tecnologia;
- os mecanismos regulatórios e de mercado para minimizar custos de geração e “custos externos” associados à energia nuclear.

3.2 A dimensão econômica da geração de energia nuclear: custos e competitividade

As estruturas de custos das diferentes alternativas para a geração de energia elétrica variam significativamente. Em algumas, o custo do combustível tem elevada participação nos custos totais de geração e a evolução daquele afeta de perto a competitividade da fonte energética, na comparação com as alternativas. Em outras, entre as quais a energia nuclear, o custo de capital é determinante e os custos operacionais e do combustível são pouco expressivos. Fatores que incidem sobre o custo de capital, sobre o período de funcionamento da central e sobre o fator de capacidade da central ganham então relevância na determinação da competitividade da energia nuclear⁶.

De forma a levar em conta estes fatores, a avaliação da competitividade da geração de energia nuclear – bem como de outras fontes de energia elétrica – é feita recorrendo-se à metodologia dos “custos nivelados de eletricidade” (*levelized cost of electricity* – LCOE), que fornece um valor aproximado do custo unitário de diferentes tecnologias ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a construção da unidade de produção até sua operação e seu descomissionamento (NEA / IEA, 2015). Representa “a receita média requerida, por unidade de energia gerada, para que os investimentos em construção, operação, manutenção e custos de capital sejam recuperados”⁷.

3.2.1 Custos de investimento: variável crítica da competitividade nuclear

A composição de custos da geração de energia nuclear é dominada pela elevada participação do custo de implantação de uma usina, em geral estruturas de grande porte cuja construção requer o emprego de

6. O período de funcionamento de uma usina nuclear é estimado, no estudo OCDE / IEA / NEA (2015) em 60 anos e “o fator de capacidade é a razão entre a energia de fato produzida por uma usina e sua capacidade nominal de produção” (FGV, 2016).

7. Análises mais recentes da competitividade das diferentes fontes de eletricidade também usam a metodologia do “custo evitado nivelado de eletricidade” (*levelized avoided cost of electricity* – LACE), “uma medida do que custaria ao sistema atender à carga se não pudesse contar com a contribuição da energia produzida pelo projeto avaliado” (FGV, 2016) ou “o custo da geração e capacidade deslocadas por unidade marginal de nova capacidade de determinado tipo, fornecendo uma estimativa do valor para o sistema da construção desta nova capacidade” (EIA, 2015).

materiais especiais e a incorporação de sofisticados equipamentos de segurança e de controle, além de se estender por vários anos.

Isso significa que o principal componente de custos da geração de energia nuclear – o custo de capital – é altamente sensível não apenas ao custo de materiais, equipamentos e mão de obra necessária para a construção da central, mas também às condições de financiamento da implantação da usina e às regulações “horizontais” (taxação) e setoriais (regulações ambientais e de segurança) que impactam a formação daqueles custos⁸.

Em 2015, os custos de capital de uma usina nuclear – excluídos custos financeiros⁹ –encontravam-se entre os mais elevados entre uma ampla gama de tecnologias de geração de eletricidade, de acordo com estudo conjunto NEA/IEA (Tabela 1). Os dados baseiam-se em uma amostra de onze novas usinas a serem comissionadas até 2020 e localizadas em nove países da OCDE (na Europa, América do Norte e Ásia) e na China. O custo mediano em dólares da geração de um quilowatt de eletricidade foi, para a energia nuclear, de US\$ 5.026, nível superado apenas pela alternativa termo-solar e geotérmica, entre aquelas consideradas na Tabela.

Tabela 1 - Custos de investimento – US\$ por kWe – de diferentes tecnologias de geração de energia elétrica (2015)

Tecnologia	Custo de capital (exclui custo de financiamento) - US\$/kWe		
	Mínimo	Mediana	Máximo
Gás natural - CCGT	627	1.014	1.289
Gás natural - OCGT	500	699	933
Carvão	813	2.264	3.067
Nuclear	1.807	5.026	6.215
Solar fotovoltaica	937	1.436	2.563
Solar térmica	3.571	6.072	8.142
Eólica onshore	1.200	1.841	2.999
Eólica offshore	3.703	4.998	5.933
Hídrica	598	2.493	8.687
Geotérmica	1.493	5.823	6.625
Biomassa e biogás	587	4.060	8.867

Fonte: NEA/IEA (2015)

8. De acordo com Finon e Roques (2006), a parcela dos custos de construção no custo total de geração da energia nuclear situa-se entre 65% e 80%, cabendo aos custos operacionais entre 10% e 20% e ao custo de combustível algo entre 5% e 10%. Estas participações são respectivamente de 20% a 30%, de 5% a 10% e de 60% a 80%, no caso da produção de gás natural com turbina de ciclo combinado.

9. Os custos de capital sem os encargos financeiros são denominados overnight costs e compostos, no caso das plantas nucleares, em 80% por custos de EPC – engineering – procurement – construction. Os demais 20% são alocados a contingências e a custos de testes de sistemas e treinamento de pessoal incorridos para a implantação do sítio (WNA, 2012).

Chama a atenção o fato de que o custo mínimo de geração nuclear (US\$ 1.807) corresponde a 29% do valor máximo (US\$ 6.215) de produção de eletricidade a partir da mesma fonte energética. Este dado revela que o principal item de custo da geração de energia nuclear pode ser fortemente influenciado por fatores relacionados a características nacionais, como custo de materiais e mão de obra, quadro regulatório e político, possibilidade de geração de economias de escala no programa de implantação de usinas nucleares, entre outros.

A Tabela 2 abaixo confirma esta observação. Os custos de capital – excluídos custos financeiros – para a geração de um quilowatt de eletricidade variam de US\$ 1.807, na China, e US\$ 2.201 na Coreia do Sul, a US\$ 6.215, na Hungria, e US\$ 6.070, no Reino Unido. Os custos são mais altos nos países europeus, entre US\$ 5.000 e US\$ 6.200, situando-se pouco acima de US\$ 4.000 nos EUA – e pouco abaixo disso no Japão – e entre US\$ 1.800 e US\$ 2.600 na China e Coreia do Sul. Esta heterogeneidade de valores se observa mesmo quando a tecnologia de geração nuclear utilizada é a mesma e a capacidade líquida de geração pouco difere entre as usinas consideradas.

Tabela 2 - Custos de investimento – US\$ por kWe – da energia nuclear em diferentes países (2015)

País	Capacidade líquida (MWe)	Custo de capital (exclui custo de financiamento) - US\$/kWe	Custo de investimento - US\$/kWe		
			3%	7%	10%
Bélgica	1.000 - 1.600	5.081	5.645	6.498	7.222
Finlândia	1.600	4.896	5.439	6.261	6.959
França	1.630	5.067	5.629	6.479	7.202
Hungria	1.180	6.215	6.756	7.535	8.164
Japão	1.152	3.883	4.313	4.965	5.519
Coreia do Sul	1.343	2.021	2.177	2.400	2.580
Eslováquia	2.535	4.986	5.573	6.472	7.243
Reino Unido	3.300	6.070	6.608	7.399	8.053
Estados Unidos	1.400	4.100	4.555	5.243	5.828

Fonte: NEA/IEA (2015)

Na mesma linha, mas com base em dados diferentes, a International Energy Agency (IEA, 2015b) estima diferenças significativas entre diferentes países e regiões, no que se refere ao custo médio de capital *overnight*. Assim, este custo na China é estimado em US\$ 3.500/ kW, ou seja, um terço inferior ao dos países da União Europeia, que cifra US\$ 5.500/ kW. Com base nos dados do estudo da IEA, os custos nos Estados Unidos são 10% inferiores aos da União Europeia, porém 30% superiores aos da China e Índia, e 25% acima dos da Coreia do Sul.

Sendo altamente intensiva em capital, a geração de energia nuclear é muito sensível ao custo financeiro do investimento. Na Tabela 2 acima, observam-se as variações no custo total de investimento de acordo com três hipóteses de custo real anual de financiamento (3%, 7% e 10%). Na grande maioria dos casos, o custo de investimento associado à geração de um quilowatt – sem custos financeiros – aumenta em mais de 40% quando se considera uma taxa real de juros de 10% a.a. – na comparação com o resultado gerado por uma taxa de juros de 3% a.a.

Em comparação, dados reunidos por NEA/IEA (2015a) indicam que o impacto do custo financeiro sobre o custo de investimento na geração de um quilowatt de eletricidade a partir de fontes alternativas à nuclear é nitidamente inferior. No caso de gás natural, o acréscimo no custo de investimento associado à geração de um quilowatt de eletricidade (considerando a comparação entre taxas de juros reais de 3% e 10% a.a.) em 17 novas centrais em 12 países (sendo 11 membros da OCDE) manteve-se sempre entre 9% e 19%, com elevada frequência de casos entre 10% e 15%. Já no caso do carvão, sob as mesmas hipóteses de custo financeiro, o acréscimo produzido por este no custo de capital situa-se, na maioria das usinas consideradas, entre 21% e 22%, com um mínimo de 14,6% e um máximo de 64,4% (África do Sul).

Estes dados sugerem que o custo de geração de energia nuclear é altamente dependente do custo de capital – e, em especial das condições de financiamento da implantação de uma central, cuja relevância (para o estabelecimento do custo total de geração) está diretamente relacionada ao longo tempo requerido para a implantação de um sítio nuclear¹⁰.

Ao longo dos anos, observou-se um aumento sustentado do custo de capital na construção de usinas nucleares (Kessides, 2009). Entre 1965 e 1970, o tempo médio de construção de usinas nucleares no mundo (foram 48 no período) era de 60 meses. Em 1983-1988, um período de *boom* de construção de novas usinas (151 usinas), o tempo médio de construção aumentou para 98 meses. Até o final do século, o tempo médio de construção continuou crescendo, alcançando 116 meses entre 1995 e 2000 (28 usinas), voltando a se reduzir para 82 meses (18 usinas), na sequência (2001-2005).

Sem que se possa atribuir exclusivamente ao aumento do tempo de construção o crescimento do custo de capital, parece não haver dúvidas de que, no longo prazo, este atingiu novos patamares. Assim, segundo a U.S. Energy Information Administration – EIA, o custo de investimento de usinas nucleares, sem encargo financeiro nos Estados Unidos, a valores constantes de 2002, variou de US\$ 1.500/ kW no começo da década de 1960 para US\$ 4.000 em meados de 1970. O estudo NEA/IEA (2015b) avalia em US\$ 4.100 o custo de capital (sem encargos financeiros) das usinas nucleares incluídas na amostra, a dólares de 2013.

Na França, a Cour des Comptes (instituição equivalente ao Tribunal de Contas da União) ressaltava em 2012 que o custo *overnight* de investimento de novas usinas nucleares, a preços de 2010, subira de € 1.070/ kW por ocasião da construção do primeiro dos 50 reatores PWR em Fessenheim (comissionado em 1978) para € 2.060/ kW quando Chooz 1 e 2 foram construídos no ano 2000. Calcula em € 3.700/ kW o custo de investimento do reator PWR em funcionamento em Flamanville.

10. “Para um período de construção (de uma usina nuclear) de cinco anos, estudo da Universidade de Chicago (2004) mostra que os pagamentos de juros durante a construção podem alcançar 30% dos gastos totais. Este percentual aumenta para 40% se os pagamentos de juros se aplicam a um período de construção de sete anos” (WNA, 2012).

Casos recentes, citados por Atyias (2011a), sugerem que, mais do que uma tendência inexorável de aumento do tempo de construção – e, por esta via, do custo de capital das novas usinas – o que se tem observado é um “alto grau de incerteza em relação ao custo de construção” de novas usinas.

Nos casos citados pelo autor (França e Finlândia), inspeções de segurança durante a construção de novas usinas geraram exigências que determinaram atrasos significativos na construção, aumentando o custo estimado de geração de energia em 50%, em um dos casos, e em 100%, no outro¹¹.

3.2.2 Os demais custos: uma posição relativamente confortável para a energia nuclear

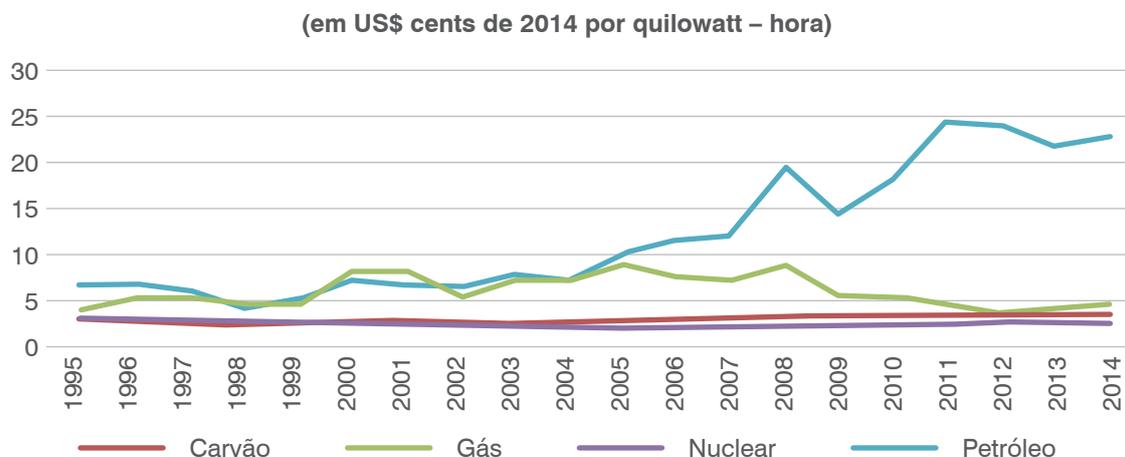
No custo de operação reside a vantagem competitiva da geração nuclear. O Gráfico 7 apresenta a evolução, entre 1995 e 2014, dos custos de produção – que incluem custos de operação, de manutenção e de combustível – a valores de 2014 para diferentes tecnologias de geração de eletricidade.

Considerando-se estes componentes de custos, a energia nuclear é a que se encontra melhor posicionada em todos os anos a partir de 2000 e a que registra menor variação nos valores reais durante todo o período – refletindo sobretudo a estabilidade dos custos de combustível, em contraste, por exemplo, com o caso do petróleo.

Em 2014, o custo de produção por quilowatt hora da energia nuclear era 27% inferior ao do carvão, 47,6% ao do gás natural e representava cerca de 10% do custo de geração de eletricidade tendo o petróleo como combustível. O custo unitário de operação e manutenção da energia nuclear supera nitidamente os de carvão e gás em todo o período, mas esta desvantagem é mais do que compensada pela diferença – dessa vez em favor da energia nuclear – observada no custo do combustível, em 2014 (US\$ 0,76 por kWh, contra US\$ 2,52 para o carvão e US\$ 4,01 para o gás natural).

11. As duas usinas citadas no estudo tinham custo de geração de energia estimado, antes do início da construção, em US\$ 2800/US\$ 2.900/ kWh.

Gráfico 7 - Custos de produção (operação, manutenção e combustível) da eletricidade gerada por diferentes fontes de energia – 1995 – 2014



Fonte: NEI (2015)

No caso da energia nuclear, outro componente de custos é a disposição final de resíduos (*back-end*), que corresponde a menos de 10% do custo total por kWh gerado¹². O descomissionamento da usina equivale a 15% do custo de capital. Descontado ao longo dos 60 anos do ciclo de vida das usinas nucleares, este custo contribui apenas residualmente para o custo total de operação e de geração.

Outro componente de custo a ser considerado, refere-se ao insumo utilizado para a geração nuclear, o urânio. Trata-se de combustível com enorme concentração energética, a geração eletronuclear requerendo volumes relativamente pequenos – na comparação com tecnologias concorrentes – para a produção de energia. A título de comparação, vale observar que, para gerar 1.000 MW por ano, são necessárias 2,2 milhões de toneladas de carvão ou 1,1 milhão de toneladas de gás natural ou ainda 1,4 milhão de toneladas de petróleo.

A trajetória da demanda de urânio depende em grande medida da capacidade instalada e operativa dos reatores nucleares e seus preços variavam, entre 1995 e 2014, muito menos do que os de gás natural e petróleo, embora um pouco mais do que os de carvão (EIA, 2015).

Os reatores existentes demandam cerca de 68.000 toneladas de urânio por ano. Trata-se de urânio extraído das minas e proveniente de fon-

12. No estudo NEA/IEA (2015a), o valor do custo de *back end* é fixado em US\$ 2,33 / MWh, enquanto os custos de *front end* (mineração, enriquecimento e condicionamento do combustível) é estimado em US\$ 7 / MWh.

tes secundárias, como estoques existentes. Estima-se que as reservas atuais de urânio (5,9 milhões de toneladas) usadas em reatores convencionais possam durar 90 anos. A Austrália possui 29% das reservas mundiais, o Cazaquistão 12%, Rússia 9% e o Canadá 8%. O Brasil conta com 5% das reservas. Em 2013, avaliavam-se em 90.000 toneladas os estoques mantidos nos Estados Unidos e na Europa.

Especialistas acreditam que o mercado de urânio crescerá expressivamente nos próximos anos. O *Global Nuclear Fuel Market Report* (WNA, 2013) destaca que, em seu cenário de referência (pós-acidente de Fukushima), haveria crescimento da demanda por urânio equivalente a 31% no período 2013-2023, sendo que a maior parte deste incremento (25,6%) se daria no terceiro decênio do século (2021-2030).

A Tabela 3 sintetiza dados relativos à estrutura de custos de geração de energia nuclear, sob três hipóteses de taxas de juros (3%, 7% e 10% ao ano)¹³.

O que em primeiro lugar chama a atenção é a heterogeneidade dos custos nivelados de geração de eletricidade (LCOE) segundo os países. Essa heterogeneidade, identificada anteriormente no que se refere ao custo de investimento, volta a aparecer no LCOE, acentuando-se à medida que se passa da hipótese de taxa de juros baixa para as mais elevadas. A Coreia do Sul é, entre os países incluídos, aquele com custos nivelados mais baixos, variando entre US\$ 29,63 / MWh, na hipótese de taxa de juros de 3% a.a., e US\$ 51,37/MWh, na hipótese de juros de 10% a.a. Já o Reino Unido tem os mais altos custos revelados entre os países incluídos na tabela: US\$ 64,38 / MWh, – com 3% de juros ao ano – e US\$ 135,72/MWh, com juros anuais de 10%. A heterogeneidade também é perceptível nos demais itens de custos, como os de operação e manutenção e os de combustível e resíduos.

Os custos absolutos de operação e manutenção não se alteram em função da variação nas taxas de juros, mas sua participação é afetada pelo impacto que tal alteração tem em outros componentes de custos (investimentos, modernização – *refurbishment*, em inglês – e descomis-

13. Para efeito de elaboração dos LCOE, o estudo estima um custo do carbono em US\$ 30/MWh. No caso da energia nuclear, o custo do carbono é igual a zero.

sionamento). Nesse caso, a participação dos custos de operação e manutenção cai à medida em que crescem a dos custos de investimentos.

Tabela 3 - Custos nivelados da geração nuclear para novas usinas em diferentes países – 2015 - participação percentual dos componentes de custos no LCOE (US\$ / MWh) sob três hipóteses de taxas de juros –

País	Custo de investimento			Custos de renovação e de descomissionamento			Custos de combustível e resíduos	Custos operacionais e de manutenção	LCOE		
	3%	7%	10%	3%	7%	10%			3%	7%	10%
França	26,91	59,92	92,53	0,4	0,06	0,01	9,33	13,33	49,98	82,64	115,21
Japão	20,62	45,92	70,9	0,42	0,07	0,02	14,15	27,43	62,63	87,57	112,5
Coreia do Sul	10,41	22,2	33,15	0	0	0	8,58	9,65	28,63	40,42	51,37
Reino Unido	31,59	68,42	103,46	0,54	0,09	0,02	11,31	20,93	64,38	100,75	135,72
Estados Unidos	30,75	54,86	79,16	1,26	0,52	0,26	11,33	11	54,34	77,71	101,76

Fonte: NEA/IEA (2015)

Também se destaca, na Tabela 3, a elevada participação do custo de investimento na formação dos custos nivelados de eletricidade e sua sensibilidade à taxa de financiamento. Na hipótese mais favorável (taxa de juros anuais de 3% a.a.), a participação do custo de investimento no LCOE de novas usinas nucleares nos países incluídos na Tabela 4 representa entre 33% (Japão) e 56,6% (EUA) do LCOE total. No caso menos favorável (taxa de juros de 10% a.a.), esta participação aumenta para uma faixa que vai de 63% (Japão) a 80,31% (França).

A sensibilidade do custo nivelado de produção de eletricidade através da energia nuclear aos custos de capital se expressa também pela variação daquele custo de acordo com o fator de capacidade da usina nuclear. Para as mesmas taxas de juros consideradas no estudo NEA/IEA (2015), pode-se observar, na Tabela 4, o crescimento acentuado do LCOE quando o fator de capacidade de energia nuclear é reduzido de 85% para 50%. De acordo com o estudo citado, para um conjunto de países mais amplo do que o incluído na Tabela abaixo, e com taxa de juros de 7% a.a., o custo nivelado de geração de energia nuclear aumenta 54% quando se reduz o fator de capacidade de 85% para 50%.

Tabela 4 - Custos nivelados da geração nuclear para novas usinas em diferentes países – 2015 - custos com fatores de capacidade de 50% e 85% (US\$ / MWh) -

País	LCOE a 50% de fator de capacidade			LCOE a 85% de fator de capacidade		
	3%	7%	10%	3%	7%	10%
França	69,09	124,63	179,98	49,98	82,64	115,21
Japão	96,56	138,96	181,34	62,63	87,57	112,5
Coreia do Sul	41,9	61,95	80,55	28,63	40,42	51,37
Reino Unido	98,25	160,08	219,53	64,38	100,75	135,72
Estados Unidos	76,75	116,48	157,36	54,34	77,71	101,76

Fonte: NEA/IEA (2015)

3.2.3 Um balanço da competitividade da energia nuclear

Os dados aqui reunidos indicam que, embora os níveis absolutos de LCOE da geração nuclear variem significativamente entre países, a competitividade desta energia, entre as alternativas energéticas para a geração de eletricidade, depende significativamente dos custos de investimento, aí incluídos os custos de financiamento da construção de uma nova usina nuclear. Competitiva e confiável, no nível da operação, a energia nuclear é altamente sensível ao custo do investimento e ao nível de utilização do capital investido (o fator de capacidade).

É o que se infere também das Tabelas 5 e 6, que sintetizam, para as três fontes energéticas em competição direta para a provisão de “carga de base” de eletricidade – energia nuclear, carvão e gás natural (CCGT) – os valores mínimos e máximos de LCOE para os anos selecionados.

Tabela 5 - Custos nivelados de energia nuclear, gás natural e carvão, em dólares de 2013, para 17 países membros da OCDE – valores mínimos e máximos (US\$ / MWh) – anos selecionados (taxa de juros de 5% a.a.).

	1992	1998	2005	2010	2015
Gás natural	63-138	37-118	50-77	83-114	63-136
Carvão	58-132	37-83	29-66	73-130	71-101
Nuclear	52-196	40-85	28-61	34-88	34-81

Fonte: NEA/IEA (2015)

Com taxas de juros de 5% a.a., a opção nuclear é nitidamente a mais competitiva. Em todos os anos considerados, registra o menor mínimo e apenas em um ano (1998), seu máximo supera discretamente o de uma fonte concorrente, o carvão. A distância entre a opção nuclear e seus concorrentes se amplia nos dois últimos anos da Tabela (2010 e 2015), no que se refere tanto ao nível mínimo quanto ao máximo.

Tabela 6 - Custos nivelados de energia nuclear, gás natural e carvão, em dólares de 2013, para 17 países membros da OCDE – valores mínimos e máximos (US\$ / MWh) – anos selecionados (taxa de juros de 10% a.a.)

	1992	1998	2005	2010	2015
Gás natural	72/145	38/126	54/81	90/129	71/143
Carvão	74/155	52/113	47/88	79/153	85/119
Nuclear	72/140	65/118	40/87	83/132	51/136

Fonte: NEA/IEA (2015)

O quadro muda significativamente ao se adotar a hipótese de taxas de juros de 10% a.a. Aqui, o LCOE mínimo da energia nuclear é o menor apenas em 2005 e 2015 – neste último ano, graças à Coreia do Sul, que, como se viu, tem os menores custos entre países da OCDE – e seu valor máximo é o menor apenas em 1992. A perda de competitividade, com a mudança de patamar dos juros, é evidente¹⁴.

Salvo no caso de acesso direto a combustíveis fósseis de baixo custo, a geração nuclear tende a ser competitiva com as demais fontes energéticas destinadas ao atendimento termelétrico da carga de base. O custo do combustível das centrais nucleares é uma fração relativamente pequena do custo total de geração, embora o custo de investimento seja superior ao das centrais a carvão e muito maior do que os das movidas a gás natural.

Além disso, a localização influi diretamente na competitividade porque países diferentes têm sistemas regulatórios diversos e mecanismos variados de incentivos, entre outros fatores tipicamente nacionais que podem reduzir ou aumentar a competitividade de uma ou mais fontes de energia. Em qualquer caso, o que se pode afirmar é que nenhuma tecnologia de geração de energia elétrica pode ser considerada a mais barata e competitiva em quaisquer circunstâncias.

Em princípio, no entanto, parece claro que um balanço da competitividade da energia nuclear, em termos estritamente econômicos, deveria listar, entre suas vantagens:

14. Tais resultados têm por premissa o custo esperado para o comissionamento de usinas nucleares, a carvão e a gás em 2020 e supõem o custo do carbono a US\$ 30 por tonelada.

- a abundância de matéria prima (o urânio), com amplas reservas ainda inexploradas no mundo, gerando um custo de combustível relativamente baixo e pouco sujeito a oscilações de preço;
- o custo relativamente baixo de operação da geração nuclear;
- a possibilidade de localização da fonte de geração próxima aos centros de consumo, reduzindo custos de transmissão;
- a possibilidade – e mesmo a necessidade, em termos econômicos – de operar com altos fatores de capacidade, em contraste com o que ocorre com fontes renováveis.

Este conjunto de fatores define a energia nuclear como forte concorrente quando se trata da provisão de carga de base de energia, pouco sujeita às oscilações de preços e quantidades, que caracterizam tanto os combustíveis fósseis, quanto as fontes renováveis de energia.

No entanto, a experiência mundial com a energia nuclear revela que, mais do que em outras opções tecnológicas para a geração de energia elétrica, a questão do custo do investimento – e do financiamento deste investimento – é uma variável crítica para a competitividade da energia nuclear.

Por essa razão, mais além das taxas de juros e outras condições de financiamento para o investimento, há outros fatores que podem impactar de forma expressiva os custos de investimento, adquirindo enorme influência sobre o nível total de custos e a competitividade de uma central nuclear:

- o tempo de construção de uma central nuclear¹⁵;
- o aumento dos preços de equipamentos ou de certos requisitos técnicos de segurança; e
- a extensão do ciclo de vida da usina nuclear, que dilui em número maior de anos o custo de capital e reduz os custos unitários da eletricidade produzida pela usina.

A competitividade da energia nuclear também depende dos preços de combustíveis e insumos utilizados por tecnologias concorrentes e, em especial, pelas geradoras que utilizam gás natural. Quando os preços do gás caem significativamente, como ocorreu recentemente, aumenta a atratividade desta fonte e reduz-se a da energia nuclear – todos os demais fatores permanecendo iguais.

15. Segundo a NEA, o tempo médio esperado para a construção de uma usina nuclear de grande porte (excluindo-se o tempo de planejamento e licenciamento) é de cinco a sete anos. Atualmente, em países asiáticos, como a China e a Coreia do Sul, o tempo médio de construção vai de quatro a seis anos, enquanto na Europa ele pode alcançar entre seis e oito anos. Em comparação, grandes centrais termoeletricas a carvão podem ser construídas em cerca de quatro anos, enquanto o tempo para a construção de unidades de gás natural é de aproximadamente três anos. Conforme <http://www.oecd-nea.org/news/press-kits/economics.htm> (acessado em 16 de maio de 2016).

Além disso, é importante observar que a posição competitiva das diferentes fontes energéticas, como a nuclear, também se altera no tempo, em função de evoluções tecnológicas que impactem as trajetórias das várias fontes, de ganhos de escala e aperfeiçoamentos nos métodos de produção de equipamentos e gestão das unidades geradoras¹⁶, mudanças regulatórias com impactos em custos e preços etc.

No caso da energia nuclear, a busca de ganhos de escala através da construção em série de unidades padronizadas de geração, o aperfeiçoamento do processo de licenciamento, a redução do tempo de construção e o aumento da segurança das instalações – reduzindo custos de manutenção – têm sido apontadas como diretrizes relevantes para a redução dos custos de geração e, em especial, dos custos de investimento (IAEA, 2015; WNA, 2012).

O estabelecimento de um preço para o carbono, como parte dos esforços internacionais para reduzir emissões e mitigar o aquecimento global, é um fator que também teria impacto relevante sobre a competitividade da energia nuclear. Neste caso, a competitividade da energia nuclear seria fortemente beneficiada na comparação com o carvão e, de forma menos intensa, em relação ao gás natural (NEA/OCDE, 2011).

O Quadro 1 abaixo, extraído do site da NEA/OCDE, sintetiza de forma bastante clara os riscos associados a investimentos em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica. Como esperado, os principais riscos econômicos relacionados ao investimento em energia nuclear têm origem no alto custo de capital, algo estreitamente associado ao longo tempo de construção e ao tamanho das centrais nucleares, e à regulação (risco regulatório, tema que será abordado adiante).

16. Por exemplo, ganhos de eficiência nos reatores diminuem o consumo de combustível: de 1980 a 2008 a geração nuclear cresceu 3,6 vezes enquanto o consumo de urânio aumentou 2,5 vezes.

Tabela 7 - Avaliação qualitativa dos riscos de diferentes tecnologias de geração de energia elétrica

Tecnologia	Tamanho da unidade	Tempo de construção	Custo de capital/kW	Custos de operação	Custo de combustível	Emissões de CO ₂	Risco regulatório
Gás Natural CCGT	Média	Curto	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Carvão	Grande	Longo	Alto	Baixo	Médio	Alto	Alto
Nuclear	Muito grande	Longo	Alto	Baixo	Baixo	Nulo	Alto
Hidro	Muito grande	Longo	Muito alto	Muito baixo	Nulo	Nulo	Alto
Eólica	Pequena	Curto	Alto	Médio	Nulo	Nulo	Médio

Fonte: NEA - <http://www.oecd-nea.org/news/press-kits/economics.htm> (acessado em 16 de maio de 2016).

3.3 Custos e benefícios “externos” da energia nuclear

A questão do “risco regulatório” do investimento em energia nuclear remete, em boa medida, às preocupações com os impactos ambientais potenciais da geração deste tipo de energia. Estes impactos se distribuem ao longo de toda a cadeia produtiva da energia nuclear, relacionando-se às várias etapas de produção do combustível nuclear e ao transporte do combustível para as usinas, à segurança operacional destas e à disposição dos rejeitos radioativos após utilização na geração de energia.

As preocupações com a segurança operacional das usinas ganham relevância em geral após a ocorrência de um acidente nuclear. Embora só tenham ocorrido três acidentes relevantes na história da geração de energia nuclear, tal ocorrência tem impactos significativos e duradouros na opinião pública mundial e, em muitos países, nos tomadores de decisões políticas.

Não por acaso, o acidente de Fukushima, em 2011 – produzido por um terremoto seguido de um tsunami – levou o Japão a suspender temporariamente a operação de todas as suas usinas nucleares, acelerou a opção da Alemanha por eliminar a energia nuclear de sua matriz energética e redefiniu (para baixo) o cenário de expansão do parque de geração de energia nuclear no mundo pelo menos até 2020.

Ao contrário do risco operacional, o risco associado à disposição e tratamento de rejeitos radioativos produzidos pela geração de energia nuclear é inerente à atividade. A opção pelo “ciclo fechado” de com-

bustível nuclear – em que o urânio enriquecido utilizado é reprocessado para ser novamente empregado como combustível – “reduz significativamente a quantidade de rejeitos enviados para a disposição final e reduz a demanda de urânio minerado da natureza, porém pode facilitar a fabricação de bombas atômicas” (FGV, 2016).

O volume de rejeitos radioativos produzidos anualmente no enriquecimento do combustível e em sua utilização nas usinas é de 0,4 milhão de toneladas, correspondentes a um milésimo do total de rejeitos tóxicos e perigosos gerados anualmente.

Os resíduos nucleares são, em 90% de seu volume, considerados “rejeitos de baixo nível”, em função de seu nível de radioatividade e do período de tempo em que o resíduo permanece perigoso. Embora representando a quase totalidade do volume gerado, estes rejeitos respondem por apenas 1% da radioatividade de todos os resíduos nucleares. Já os rejeitos ditos de “alto nível” requerem encapsulamento e isolamento permanente em relação ao ambiente humano. Trata-se do combustível utilizado diretamente na produção de energia e, embora pequeno em volume, este tipo de rejeitos concentra até 99% da radioatividade presente nos resíduos nucleares e são necessários dez mil anos para que os seus níveis de radioatividade voltem aos níveis do urânio pré-enriquecimento¹⁷. Alguns países europeus (França, Finlândia e Suécia) preveem a construção de depósitos subterrâneos de armazenamento deste tipo de rejeitos, que deverão começar a operar entre 2020 e 2025.

A disposição dos rejeitos de alto nível e longa vida tem sido uma questão suscetível de gerar muita controvérsia. Em função da sensibilidade do tema, a NEA/OCDE criou, há quinze anos, o *Forum on Stakeholder Confidence* (FSC), uma instância voltada para promover o diálogo entre instituições responsáveis pelo gerenciamento de resíduos nucleares e representantes da sociedade civil e lidar com a “dimensão societal” da questão e as preocupações a ela relacionadas.

Em certa medida, reencontram-se aqui preocupações associadas não apenas aos riscos identificados, mas a riscos potenciais que sequer fo-

17. NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA; ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OCDE. Press kit: economics of nuclear power. Disponível em: <<http://www.oecd-nea.org/news/press-kits/economics.htm>>. Acesso em: 16 maio 2016.

ram mapeados e que tendem a ser percebidos como elevados tendo em vista a disparidade temporal entre o ainda relativamente curto período de uso da energia nuclear como fonte de eletricidade e a longevidade dos efeitos radioativos dos rejeitos gerados por esta atividade.

Tais preocupações, associadas à adesão europeia ao “princípio de prudência”, alimentam atitudes de rejeição a inovações como os organismos geneticamente modificados e estão também na origem de medidas como a eliminação da energia nuclear da matriz energética alemã, por exemplo. Elas traduzem forte preocupação com a “equidade intergeracional” das políticas públicas e, no caso concreto da política energética, “preferência pelo desenvolvimento tecnológico de fontes com impactos já relativamente conhecidos, previstos e controláveis (fontes alternativas) em detrimento da manutenção das tecnologias existentes que envolvem uma grande imprevisibilidade quanto às consequências dos impactos potenciais (nuclear)” (Ferreira, 2014).

Embora tais preocupações mantenham-se vivas no debate sobre energia nuclear e opções de política energética, a avaliação da relação custo/benefício ambiental desta tecnologia recebeu, nos últimos anos, o impacto da prioridade concedida ao tema da mudança climática e das emissões de gases de efeito estufa – causadoras daquele fenômeno.

De fato, à luz do critério de emissões de gases de efeito estufa, diversos estudos corroboram a hipótese de que a energia nuclear é, entre as fontes não renováveis de energia, a mais “limpa”. WNA (2011) sintetizou as estimativas de emissão de CO₂e/GWh ao longo do ciclo de vida de diversas fontes de energia, a partir de resenha de mais de vinte estudos publicados entre 1997 e 2009 por universidades, instituições internacionais e nacionais.

A Tabela 7 sintetiza os resultados destes estudos, que colocam a média das estimativas de emissões pela energia nuclear muito próxima daquelas da hidroeletricidade e da eólica – as mais baixas da Tabela – suas mínimas no menor nível e sua máxima na segunda melhor posição, superada apenas – e por pouco – pela energia eólica. Na média, enquanto a usina a carvão emite quase um quilo por kWh gerado, a usina a óleo emite 733 g/kWh, a usina a gás natural – o mais próximo concorrente

da energia nuclear - emite 499 g/kWh, a usina nuclear emite apenas 29g por kWh.

Tabela 8 - Emissões geradas (toneladas de CO₂e/GWh) por diferentes tecnologias

Tecnologia	Toneladas de CO ₂ e/GWh		
	Média	Mínimo	Máximo
Carvão	888	756	1310
Óleo	733	547	935
Gás natural	499	362	891
Solar fotovoltaica	85	13	731
Biomassa	45	10	101
Nuclear	29	2	130
Hídrica	26	2	237
Eólica	26	6	124

Fonte: WNA (2011)

IAEA (2015) apresenta estimativas de emissões de carbono baseadas na metodologia da avaliação do ciclo de vida e aplicadas a centrais nucleares com reatores LWR (*light water reactors*), que representam cerca de 85% dos reatores em operação no mundo. As emissões médias apresentadas no estudo para este tipo de reator situam-se entre 5 e 20 gCO₂e/kWh, refletindo diferenças metodológicas e hipótese variadas adotadas pelos trabalhos referidos.

Outro estudo (NETL, 2015) para o caso dos EUA, também baseado no ciclo de vida das unidades de produção de energia, calculou o valor médio de emissões de gases de efeito estufa (não apenas dióxido de carbono) geradas por diferentes fontes energéticas no país (em gCO₂/kWh), chegando ao número de 611. No caso do carvão, o valor sobe para 1.205, do petróleo para 1.180 e do gás natural passa a 523. Já a energia nuclear geraria apenas 40 gramas de CO₂/kWh, pouco abaixo da energia solar (42) e pouco acima da hidroeletricidade (31).

Também baseado na metodologia do ciclo de vida aplicada a fontes energéticas na Austrália, o estudo de Hardisty (2012) compara a intensidade de emissões de gases de efeito estufa da energia nuclear com as de fontes renováveis. A comparação revela uma situação em que a energia nuclear não destoa do desempenho das fontes renováveis, no que se refere àquelas emissões.

Portanto, nos estudos citados, mas também em outros, a energia nuclear emerge como uma tecnologia capaz de gerar eletricidade com baixa emissão de carbono e, também relevante, de outros gases de efeito estufa e/ou geradores de impactos negativos sobre o meio ambiente. De fato, ao contrário de outras fontes – petróleo, carvão e gás natural – a energia nuclear não emite outros gases causadores de aquecimento global, como o metano, nem óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, elementos causadores da chuva ácida.

A percepção do bom desempenho da energia nuclear em termos de emissões de gases de efeito estufa levou o IPCC - Relatório de Avaliação 5 do IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, publicado em 2009, a confirmar que a energia nuclear “pertence ao conjunto de opções para reduzir as emissões de gases de efeito estufa” e é capaz de ajudar a reduzir os custos totais de mitigação (IEA, 2015).

Em seu cenário de referência para que seja atingida a meta de limitar o aumento da temperatura em 2o C até o final do século, a IEAE (2015) prevê ser necessário que a capacidade nuclear seja mais do que duplicada até 2050, o que implicaria no aumento da participação da energia nuclear no *mix* global de eletricidade dos atuais 11% para 17%.

No entanto, uma avaliação conduzida em 2013 (IEA, 2013) revelava que a capacidade instalada prevista para 2025 encontrava-se entre 15% e 32% abaixo daquela projetada pelo cenário de referência. Ainda sob o impacto do acidente de Fukushima, em 2011, a adição de capacidade evoluía muito lentamente e a trajetória de expansão da energia nuclear parecia distanciar-se daquela requerida para alcançar os objetivos de limitar a 2o C o aumento de temperatura no final do século.

A avaliação fortemente positiva da energia nuclear em função de critérios de mitigação climática enfrenta resistências por parte de uma variada gama de atores. Talvez a mais relevante manifestação de resistência sejam precisamente as decisões de distanciar-se da energia nuclear ou reduzir significativamente seus compromissos com essa opção adotadas, desde 2011, por países muito comprometidos com o combate à mudança climática, como a Alemanha.

Organizações ambientalistas, algumas com viés nitidamente antinuclear, também produziram trabalhos que questionam tecnicamente a opção nuclear, mesmo quando se leva em conta o baixo nível de emissões de gases de efeito estufa produzidos por esta tecnologia. Na realidade, a alternativa que estes trabalhos privilegiam opõe a energia nuclear às fontes renováveis – em especial as novas fontes, como solar, eólicas, etc. – mesmo sabendo-se que estes dois grupos de tecnologia desempenham funções diferentes nas matrizes energéticas, em função de suas características próprias. A opção dos combustíveis fósseis é *a priori* descartada por razões óbvias.

Um estudo contratado por diversas ONGs ambientalistas europeias ao WISE-Paris, em 2015, fornece uma boa apresentação dos argumentos críticos ao uso da energia nuclear como elemento da estratégia de transição para tecnologias de baixo carbono.

A própria ideia de que a energia nuclear geraria, ao longo de todo o seu ciclo de vida (da mineração do urânio à disposição de rejeitos e ao descomissionamento da usina), emissões muito limitadas de gases de efeito estufa é questionada. O estudo citado como referência (Sovacool, 2008) concluiu que essas emissões variariam entre 1,4 e 288 gCO₂e/kWh, com mediana de 66 gCO₂e/kWh – número adotado para comparações e resultado atribuível, em boa medida, às emissões no ciclo de produção e enriquecimento do combustível. Ainda assim, a energia nuclear não se sai mal na comparação apresentada no estudo, competindo apenas com as fontes renováveis consideradas mais virtuosas do que a opção nuclear.

O estudo (Marignac e Besnard, 2015) questiona a contribuição atual e potencial da energia nuclear para a mitigação climática, reservando-lhe um papel absolutamente secundário – e, ao que parece, a ser desempenhado pela capacidade já instalada de produção, sem maiores acréscimos – no enfrentamento do aquecimento global.

A estes argumentos se juntam aqueles que invocam os conhecidos riscos ambientais associados à energia nuclear e que não se relacionam com a discussão climática: proliferação nuclear, acidentes causados por falhas operacionais, falta de solução para o tratamento de rejeitos e riscos de contaminação radioativa etc.

3.3.1 Minimizando custos de geração e “custos externos” associados à energia nuclear

O ciclo de vida da energia nuclear envolve uma série de riscos com potencial para gerar significativos custos sociais e privados. Estes riscos se distribuem em todas as suas etapas e relacionam-se à segurança das instalações e operações, bem como ao resultado econômico do investimento em energia nuclear (os riscos e custos privados).

Estes riscos relacionam-se a certas características de todo projeto nuclear, como a intensidade de capital e o longo tempo de implementação dos projetos – que determinam, em grande medida o perfil dos riscos ditos financeiros – além do fato de que o ciclo de vida da energia nuclear é uma sequência de etapas e operações de alta complexidade técnica, que embute riscos sociais diversos.

Riscos privados e custos sociais não são independentes uns dos outros e decisões tomadas para a administração de um tipo de risco podem ter impactos importantes sobre a natureza e a magnitude de outros tipos. O exemplo mais óbvio, fornecido por Atyias (2011b) é o das regulações que buscam mitigar riscos ligados à segurança das instalações e que podem encarecer a construção e operação da central nuclear, aumentando riscos financeiros.

Mas há outros exemplos: o modelo de negócios escolhido para a construção e operação de uma usina nuclear – ou seja, o modelo de partilha de riscos econômicos adotados – pode gerar incentivos excessivos para reduzir gastos com equipamentos e procedimentos de segurança, aumentando o potencial de riscos relacionados a um déficit na área de segurança (Atyias, 2011b). Nessa eventual configuração, a ausência de uma autoridade regulatória independente e com poder de *enforcement* na esfera da segurança nuclear apenas aumentaria os riscos gerados pelo modelo de negócios adotado.

Não é por acaso, portanto, que o setor de energia nuclear opera em um ambiente institucional de “alta densidade” regulatória e que parte destas regulações pode se tornar fonte de um tipo específico de risco, o chamado “risco regulatório”.

REGULAÇÃO E SEGURANÇA NUCLEAR

No que se refere aos temas de segurança nuclear e radioativa, o ambiente regulatório em que opera o setor tem um componente internacional relevante. Trata-se de um conjunto de instrumentos voltados para harmonizar normas e padrões relacionados à segurança e a estabelecer princípios e procedimentos no setor. Este quadro regulatório internacional ganhou impulso na sequência do acidente de Chernobyl, em 1986, e sua expressão maior é a Convenção sobre Segurança Nuclear (CNS, do acrônimo em inglês), adotada em 1994 e com vigência a partir de 1996.

A CNS busca estabelecer padrões internacionais de segurança e acen-tua responsabilidades públicas, como “o estabelecimento de uma autoridade regulatória para a implementação de um quadro legal e regula-tório no campo da segurança nuclear” e a garantia de separação entre a agência com funções regulatórias e aquelas entidades públicas que desenvolvem e usam a energia nuclear (Atyias, 2011b).

Assim como a principal agência multilateral que define padrões no cam-po da segurança nuclear (a Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA no acrônimo em inglês), a CNS não tem poder de sanção e seus padrões e diretrizes são tomadas como recomendações pelos governos dos países-membros.

Isso significa que a esfera mais relevante de regulação da atividade nuclear é efetivamente a nacional, onde se definem e implementam as políticas nucleares dos diferentes países. Analisando as políticas nacionais, Atyias (2011b) identifica dois grandes modelos regulatórios da produção de energia nuclear: no primeiro, não há separação nítida entre as funções públicas de regulação e inspeção de segurança dos projetos e instalações nucleares e as de desenvolvimento e promoção desta tecnologia. Neste caso, uma mesma instituição governamental desempenha estas diferentes funções públicas, na hipótese de que não haveria conflito de interesse no desempenho destas funções por um mesmo ente.

Segundo o autor, até 2006 os programas de energia nuclear de países tão diversos quanto França, Coreia do Sul, Índia e China, pareciam ser

organizados a partir deste modelo e desta visão, embora com variantes e especificidades institucionais em cada país.

No segundo modelo, adota-se o princípio da independência da autoridade regulatória encarregada de garantir a segurança nuclear e sua separação *vis à vis* de outras instituições públicas que desempenham funções de apoio, desenvolvimento e promoção da energia nuclear. Este modelo – em vigência nos EUA desde os anos 70 do século passado - viria ganhando espaço em países como França, Coreia do Sul e Japão e teria recebido impulso significativo das repercussões públicas do acidente de Fukushima, em 2011.

Analisando os casos das políticas nucleares de Turquia, Índia e China (Atyias, 2015) observa que a constituição de uma autoridade regulatória de segurança nuclear efetivamente independente e com capacidade de *enforcement* requer mais do que a criação de uma agência que preencha formalmente tais requisitos. No caso da Índia, por exemplo, o órgão regulatório encarregado da segurança nuclear “não tem o poder para definir e implementar as regras relativas à segurança nuclear e radioativa”, o que reduz seu poder de intervenção e sua independência. Como observa o mesmo autor, “há muitas maneiras pelas quais a independência *de facto* da autoridade regulatória pode vir a ser comprometida pelos esforços das autoridades políticas e das companhias reguladas”.

Outros requisitos regulatórios importantes, no que se refere à segurança nuclear e à autoridade pública encarregada deste tema, envolvem a transparência e *accountability*. Em um tema que suscita intensas controvérsias na opinião pública, a falta de transparência reforça suspeitas em relação aos riscos envolvidos na construção e operação de usinas nucleares.

REGULAÇÃO E RISCOS DO INVESTIMENTO

O elevado custo de capital que caracteriza a construção de usinas nucleares, o longo tempo de construção destas e os riscos que caracterizam a energia nuclear em todo o seu ciclo de vida tornam a questão da partilha dos riscos econômicos associados a projetos neste setor uma questão central. Na realidade, essa questão se coloca de forma aguda

a partir do momento em que os mercados de energia são liberalizados, através da abertura à competição e de privatizações¹⁸.

No modelo que dominava estes mercados quando as primeiras usinas nucleares foram construídas, o preço da eletricidade era ou definido diretamente pelos governos ou regulados por entidades públicas. Neste cenário, em que os mercados eram dominados por empresas públicas ou monopólios privados verticalmente integrados, “os riscos enfrentados pelas centrais de energia nuclear eram ou financiados diretamente através do orçamento público ou repassados aos consumidores via tarifas” (Atyias, 2011a).

As políticas de liberalização dos mercados de energia levaram ao abandono das estruturas verticalmente integradas em muitos países e redistribuíram boa parte dos riscos até então assumidos pelo Estado ou pelos consumidores entre os vários atores presentes no mercado.

Portanto, se um país pretende desenvolver política de energia nuclear no marco de um mercado de energia relativamente liberalizado, a abordagem desta questão não pode ser evitada. Dado o alto custo de capital e os riscos financeiros envolvidos na construção de uma usina nuclear, o foco da discussão sobre a forma de estruturação dos projetos nucleares tem sido o modelo de financiamento.

Isso não significa, no entanto, que a estruturação financeira adequada de um projeto nuclear seja condição suficiente para o êxito econômico deste projeto: problemas no gerenciamento do projeto e no processo de construção da usina podem neutralizar, do ponto de vista econômico-financeiro, os benefícios de uma estruturação adequada do financiamento daquele projeto (Atyias, 2011, sec. 4).

No que se refere aos modelos de financiamento da construção de usinas nucleares, a experiência internacional registra uma variedade significativa de estruturas, implementadas em diferentes países. Em certos casos, modelos marcadamente diversos foram utilizados em projetos nucleares em um mesmo país, como na Turquia.

18. As políticas adotadas nesta área definem a distribuição de riscos entre agentes públicos e privados envolvidos na construção de uma usina nuclear, mas seus impactos potenciais vão mais além, como já apontado, “transbordando” para a esfera social através de implicações do modelo escolhido para a segurança nuclear.

Atyias (2011a) distingue quatro modelos de financiamento, com a ressalva de que, na prática, elementos de diferentes modelos podem vir a se combinar na estruturação de projetos nucleares.

O primeiro – e mais tradicional – modelo é o das “empresas públicas verticalmente integradas”, em que os riscos de construção são assumidos pela empresa pública, mas estes riscos são mitigados por dois fatores: (i) a posição de força da empresa pública produtora de energia frente a seus consumidores, em função do baixo grau de competição na oferta que garante à produtora um *pool* de consumidores cativos; e (ii) a fórmula de remuneração pelos serviços de construção, de tipo *cost-plus*, que garante o construtor frente aos riscos de aumento de custos derivados de atrasos, de exigências regulatórias etc.

O segundo modelo baseia-se na mitigação de riscos através da garantia de compra de energia pelo Estado ou suas empresas e agências de regulação do mercado de eletricidade. Esta garantia, ao estabelecer o compromisso de compra de determinado volume de energia a preços pré-determinados (não necessariamente fixos) reduz o risco de preço para os produtores de energia nuclear.

O terceiro modelo combina financiamento privado e provisão de garantias públicas para a dívida da empresa construtora. Este modelo foi adotado pelos EUA, em 2005, e pelo Reino Unido, em 2012. A participação estatal limita-se à provisão de garantias para uma parcela significativa (80%, no caso dos EUA) do investimento.

No quarto modelo, o projeto nuclear tem origem em iniciativa de um consórcio de consumidores de energia, que se tornam sócios majoritários do mesmo. Dois contratos distribuem os riscos. De um lado, a construção é contratada em regime de *turnkey* a uma empresa produtora de reatores nucleares – que fica com o risco da construção. De outro, um contrato de compra válido por um prazo longo (até 60 anos) é assinado entre a empresa proprietária da usina e consumidores – muitos dos quais podem ser sócios daquela empresa.



4 ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: EVOLUÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS

Fonte: /Shutterstock

A crise hídrica que atingiu o Brasil em 2013 – e cujos efeitos se fizeram notar com forte intensidade na oferta de energia no país até 2015 – estimulou o debate sobre o papel das diferentes fontes na matriz energética brasileira. Para mitigar o risco de racionamento, a geração termelétrica convencional foi acionada continuamente nos anos recentes, elevando as tarifas dos consumidores finais, gerando incertezas e afetando a competitividade do setor industrial brasileiro, particularmente dos segmentos intensivos em energia.

Às alterações no regime hídrico brasileiro somam-se os compromissos do país com a mitigação da emissão de gases de efeito-estufa (GEE) assumidos na COP21 (21ª Conferência da ONU sobre Mudança Climática). Além dos impactos sobre os custos da energia, o acionamento contínuo das termelétricas alimentou o debate sobre os efeitos negativos desse processo sobre um dos principais ativos do país: a natureza “limpa” de sua matriz energética, do ponto de vista das emissões de GEE.

A trajetória da energia nuclear no Brasil é marcada por altos e baixos. O interesse do país por essa fonte de energia surgiu nos anos 1950 com os trabalhos que culminaram na criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 1956. Desde então, o planejamento, os investimentos e a utilização da

energia nuclear para a geração de eletricidade tem alternado períodos de ascensão e engajamento com outros de paralisia e desinteresse.

Os questionamentos sobre o uso da tecnologia nuclear como fonte de energia não são exclusividade da experiência brasileira, como já se viu nas seções anteriores. Entretanto, no caso do Brasil esse debate é potencializado por características específicas do país, que vão além daquelas inerentes às vantagens e desvantagens dessa fonte de energia.

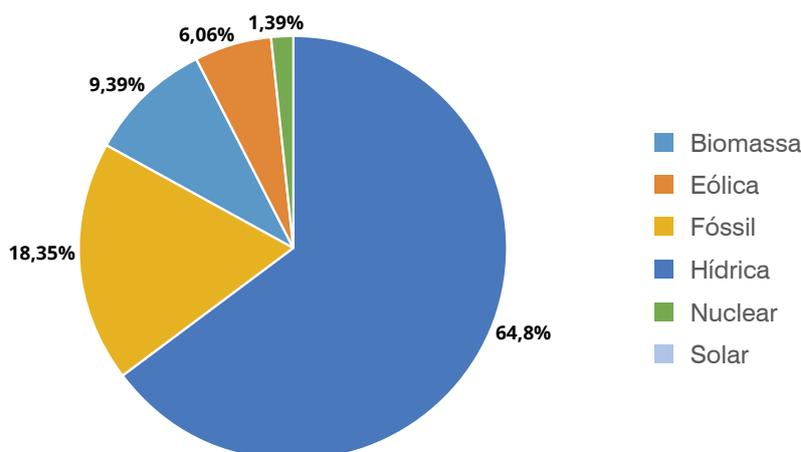
Entre as características brasileiras presentes nas discussões sobre o papel da fonte nuclear na matriz energética brasileira, destacam-se: (i) a vasta disponibilidade e diversidade de recursos naturais que podem ser usados como fonte de energia; (ii) a escassez de poupança doméstica e o elevado custo do capital que encarecem a construção das usinas; e (iii) o arcabouço institucional e a regulação do setor, que dificultam a participação do setor privado e geram incertezas para os investimentos e operações das usinas.

4.1 A participação da fonte nuclear matriz de energia elétrica no Brasil

O Brasil tem atualmente duas centrais nucleares em funcionamento e uma terceira em construção. Essas duas centrais respondem por 1,4% da capacidade instalada para produção de energia elétrica no país. Com uma capacidade instalada total de 143 GW (ANEEL), a matriz elétrica brasileira tem na hidroeletricidade sua principal fonte de suprimento, representando 64,8% do total. As demais fontes renováveis – biomassa, eólica e solar – respondem juntas por 15,3% da capacidade total.

A capacidade instalada, todavia, representa apenas o que o sistema pode produzir. As fontes de energia apresentam fatores de capacidade diferentes, o que significa que a capacidade instalada não necessariamente reflete a contribuição de cada fonte para a produção efetiva em cada ano. As fontes de energia renováveis são, em geral, mais suscetíveis a variações climáticas que interferem na capacidade de despacho ao longo do tempo, tornando suas contribuições para a produção de eletricidade mais instáveis.

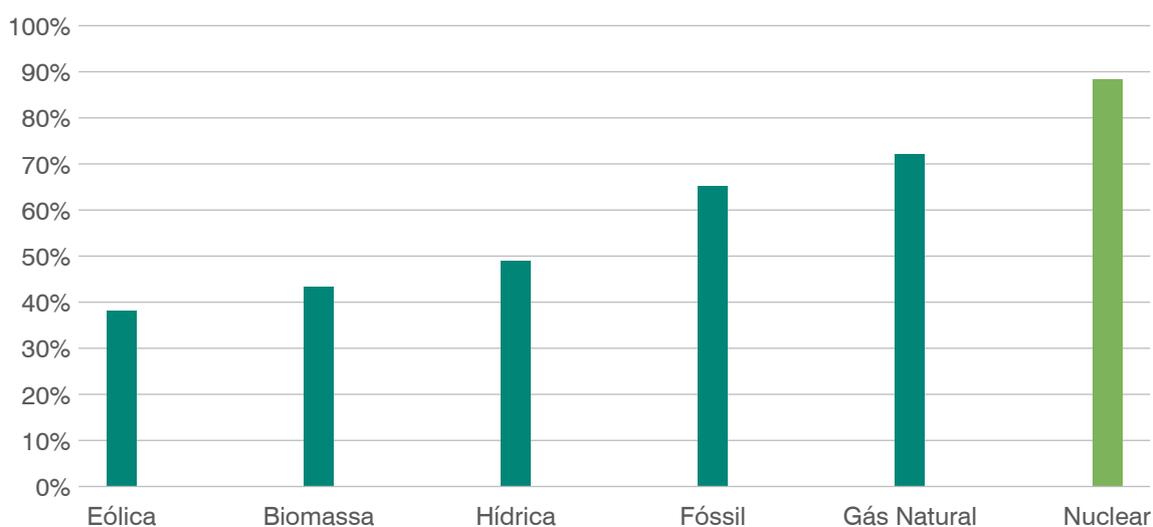
Gráfico 8 – Composição da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil – maio 2016



Fonte: Banco de Informações de Geração (BIG) - ANEEL

O fator de capacidade (FC) é a razão entre a energia de fato produzida por uma usina e sua capacidade nominal de produção (MME, 2015). Em 2014, o FC da geração hidráulica pública no Brasil ficou em 49% e apresentou queda expressiva em relação aos anos anteriores (52% em 2013 e 57% em 2012). Já na geração térmica fóssil, o FC vem aumentando, tendo atingido 65% em 2014, vindo de 55% em 2013 e apenas 37% em 2012. Todavia, são as usinas de geração nuclear as que apresentam o FC mais elevado: 88%.

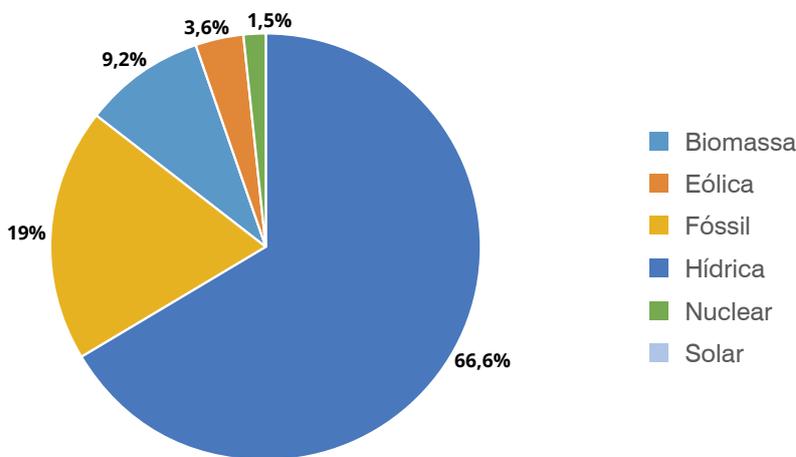
Gráfico 9 – Fator de capacidade (FC) de diferentes fontes de energia elétrica no Brasil (2014)



Fonte: MME, Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo (2014)

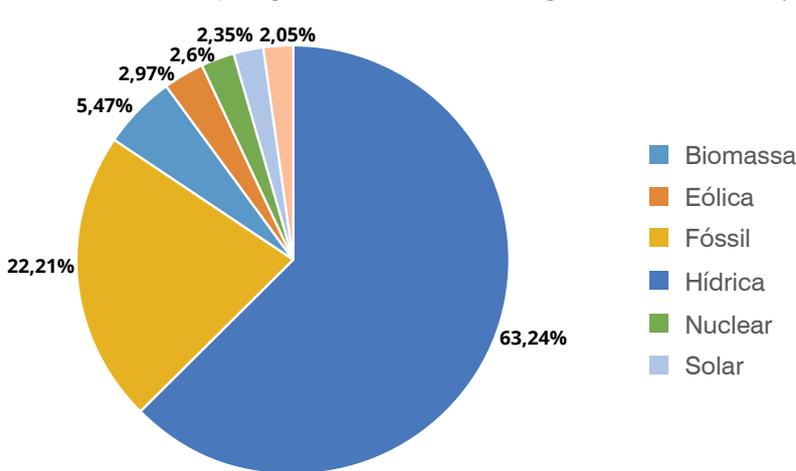
A avaliação da contribuição das diferentes fontes de energia para a geração de eletricidade no país não pode desconsiderar o FC. Para fins de comparação, os gráficos 3 e 4 mostram a contribuição das fontes de energia para a capacidade instalada e para a produção efetiva de geração elétrica no Brasil em 2014. Nota-se aqui que a participação da fonte nuclear, que é de 1,4% na capacidade instalada, aumenta para 2,5% na oferta de energia elétrica naquele ano, enquanto a fonte hídrica cai de 68% para 65,2% e a eólica de 3,5% para 2%.

Gráfico 10 – Contribuição das fontes de energia elétrica – capacidade instalada (2014)



Fonte: MME, Resenha Energética Brasileira (2015)

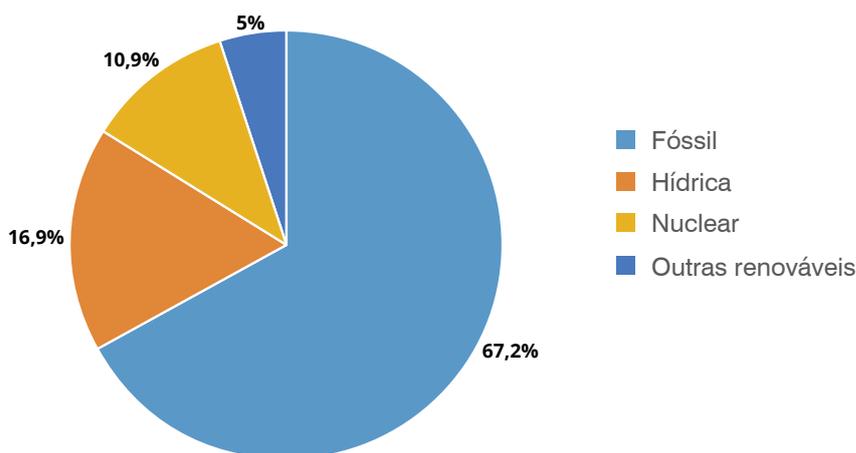
Gráfico 11 – Composição das fontes de energia elétrica – oferta (2014)



Fonte: MME, Resenha Energética Brasileira (2015)

A forte dependência da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica no Brasil contrasta com o padrão mundial, em que essa fonte responde apenas por 17% do total, enquanto os combustíveis fósseis representam 67,2%¹⁹. No mundo, a energia nuclear participa com 10,9% do suprimento de energia elétrica.

Gráfico 12 – Composição da geração de energia elétrica – Mundo (2012)



Fonte: EPE, Anuário Estatístico de Energia Elétrica – 2015

O vasto potencial hídrico no Brasil, a abundância de recursos naturais e a disponibilidade de condições climáticas favoráveis à utilização de fontes de energia renováveis concorrem para que o país tenha optado pelo desenvolvimento de uma matriz elétrica fortemente dependente desses recursos. Se há inegáveis vantagens em termos de custos de produção e baixa geração de gases de efeito estufa, há, por outro lado, as desvantagens inerentes à instabilidade na geração decorrente da variação climática, além dos custos ambientais inevitáveis na construção de usinas hidroelétricas com grandes reservatórios.

Apesar de o país ter optado pelo desenvolvimento de uma matriz elétrica predominantemente hidroelétrica, a intenção de incorporar a energia nuclear no planejamento energético do Brasil é relativamente antiga. A história da energia nuclear no Brasil tem suas origens nos anos 1950 e é marcada por marchas e contramarchas. Os trabalhos técnicos que se iniciaram naquela década deram origem à criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1956.

19. Informações relativas ao ano de 2012.

BOX 1: Breve histórico do Programa Nuclear Brasileiro

- **1956:** Criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), responsável pela regulação de atividades nucleares no país e por desenvolver a política nacional de energia nuclear.
- **1971:** Criação da Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN), posteriormente denominada NUCLEBRAS, responsável por promover toda atividade nuclear no país.
- **1972:** Iniciada a construção de Angra 1.
- **1975:** Firmado o acordo de cooperação Brasil-Alemanha, cujo objetivo era o intercâmbio de tecnologias e capacitação de pessoal. Fazia parte do Programa Pro-Nuclear, que teve duração até 1986.
- **1978:** Início do Programa Nuclear Autônomo Brasileiro, que desenvolveu uma tecnologia própria para o enriquecimento do urânio.
- **1981:** Iniciada a construção de Angra 2 – o prazo para finalização da obra era 1986.
- **1984:** Iniciada a construção de Angra 3.
- **1985:** Início da operação comercial de Angra 1.
- **1986:** As obras de Angra 3 são paralisadas.
- **1988:** Criação da Indústrias Nucleares Brasileiras (INB), responsável pela cadeia produtiva do urânio no Brasil. Sua maior acionista é a CNEN.
- **1989:** Extinta a NUCLEBRAS.
- **1997:** Criação da Eletronuclear (subsidiária da Eletrobrás), cuja finalidade é operar e construir as usinas nucleares no Brasil.
- **2001:** Início da operação comercial de Angra 2.
- **2007:** É tomada a decisão de finalizar a usina de Angra 3.
- **2010:** Obras de Angra 3 são reiniciadas.
- **2015:** Obras de Angra 3 são novamente paralisadas.
- **2020:** Prazo estimado pela ANEEL para a entrada em operação de Angra 3.

Reproduzido de FGV Energia, Cadernos, Energia Nuclear, Abril de 2016

4.2 As usinas nucleares no Brasil

A decisão de construir a primeira usina nuclear no Brasil – Angra 1 – foi tomada em 1969 e as obras para a sua construção tiveram início em 1972, com tecnologia norte-americana. Em 1975 foi assinado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, que previa a construção de oito usinas nucleares no país, das quais apenas duas foram adiante. Em 1981 teve início a construção de Angra 2 e três anos depois, em 1984 começou a construção de Angra 3.

Nota-se que o período de tempo decorrido entre o início da construção de cada uma das usinas e o início de sua operação comercial aumentou de forma expressiva: foram necessários 13 anos para Angra 1 e 20 anos para Angra 2. Angra 3, que começou a ser construída em 1984, tem previsão de entrada em operação para 2020: 36 anos terão se passado caso esse prazo venha de fato a ser cumprido.

Embora a construção de centrais nucleares seja complexa e o período de tempo médio de construção varie entre países e regiões, o tempo médio esperado para a construção de uma grande usina nuclear no mundo é de 5 a 7 anos, sem incluir o período requerido para planejamento e licenciamento. Atualmente, em países asiáticos (China e Coreia do Sul) os prazos estão entre 4 e 6 anos, enquanto nos países europeus podem variar entre 6 e 8 anos²⁰.

20. Ver <https://www.oecd-nea.org/news/press-kits/economics-FAQ.html#2>

BOX 2: Características das usinas nucleares do complexo CNAAA

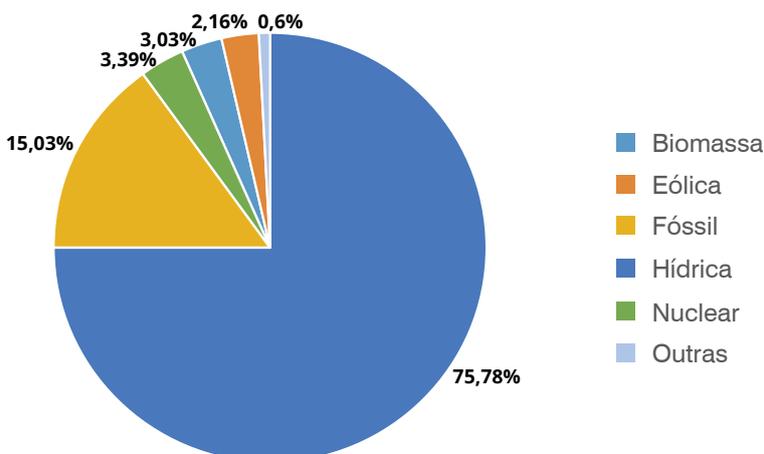
- **Angra 1** - A primeira central nuclear brasileira, de tecnologia Westinghouse, foi construída em regime *turnkey* após concorrência internacional lançada em 1970. Está localizada no município de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. As obras de Angra 1 iniciaram em 1972. O reator de 626 MW de capacidade, tipo PWR, foi ligado à rede em 1982 e iniciou a operação comercial em 1985. No lapso 1985-1989 passou por longas interrupções devido a problemas nos equipamentos. A partir de 1994, Angra 1 registra bom desempenho e desde 2010 a usina opera com elevada eficiência.
- **Angra 2** é outra usina com reator PWR, porém de tecnologia Siemens (empresa KWU – Kraftwerk Union A. G., atual Areva NP), adquirida no âmbito do acordo Brasil-Alemanha. A construção começou em 1981. Entretanto, a partir de 1983, o ritmo de sua construção foi sendo progressivamente desacelerado, devido à escassez de recursos financeiros. Em 1991, o governo decidiu retomar o empreendimento, tendo a questão do financiamento sido equacionada em 1994. Angra 2 entra em operação comercial em fevereiro de 2001. A usina tem capacidade instalada de 1.350 MW.
- **Angra 3** é uma usina com as mesmas características de Angra 2, com potência de 1.405 MW. Angra 3 foi comprada da KWU em 1976, juntamente com Angra 2. Diversos equipamentos foram adquiridos e o início das obras se fez em junho de 1984, tendo se estendido até abril de 1986, quando as obras foram paralisadas. A construção de Angra 3 foi efetivamente iniciada em 2010, mas encontra-se paralisada em função dos problemas relacionados às investigações de irregularidades e corrupção nas obras do empreendimento e de restrições de financiamento. Ainda assim, a Eletronuclear mantém a previsão para o início de sua operação para 2020.

As três usinas estão situadas na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), situada no município de Angra dos Reis (RJ). Entre as principais vantagens dessa localização está a proximidade dos principais centros consumidores nacionais: 120 km do Rio de Janeiro, 220 km de São Paulo e 350 km de Belo Horizonte.

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2007, prevê, em seu cenário mais conservador, a construção de quatro novas usinas, após Angra 3, até 2030. De acordo com o PNE 2030, o parque nuclear brasileiro passaria a contar com um potencial total de 3.300 MW com a entrada em operação de Angra 3, sendo necessários mais 4.000 MW para a implementação de sua estratégia de contar com uma capacidade de 7.300 MW de energia nuclear no horizonte de tempo de 2030²¹.

21. O PNE 2030 inclui ainda mais dois cenários, sendo que em um deles o potencial de novas usinas é de 17 unidades e em outro o potencial é de 33 unidades. Entretanto, tendo em vista os obstáculos na implementação do projeto de Angra 3, trabalha-se com o cenário mais conservador como base.

Gráfico 13 – Composição da produção de energia -previsão PNE 2030



Fonte: Plano Nacional de Energia 2030 – PNE2030

A Eletronuclear propôs a construção de duas novas centrais no Nordeste e duas outras no Sudeste. Os estudos de localização começaram em 2009. No momento, a Eletronuclear está aguardando o lançamento do PNE-2050, que indicará as áreas prioritárias para a eleição dos sítios finalistas²².

4.3 O combustível nuclear no Brasil

O Brasil tem expressivas reservas de urânio, domínio da tecnologia de enriquecimento e comprovada experiência no setor. Do ponto de vista da disponibilidade do minério, o Brasil tem situação bastante favorável. Além disso, o país é signatário de todos os acordos internacionais na área nuclear, reafirmando o seu compromisso com o uso pacífico da energia nuclear e com a não proliferação de armas nucleares.

Com apenas 25% do território prospectado, o Brasil possui a sétima maior reserva do mundo, o que significa 309 mil toneladas de óxido de urânio (U₃O₈). Desse total, 46% estão localizados no município de Itaitiaia, no Ceará, e 33%, no estado da Bahia, nos municípios de Lagoa Real e Caetité (INB, a). Há também reservas nos estados do Ceará e Paraná.

22. Ver: <http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Novasusinasnucleares.aspx>

Tabela 9 - Reservas de urânio no Brasil (mil toneladas)

Depósitos	Medidas e indicadas	Inferidas	Total
Lagoa Real e Caetité (BA)	94	6,7	100,7
Itatiaia (CE)	83	59,5	142,5
Outros	0,5	65,6	66
Total	177,5	131,8	309,2

Fonte: INB

O fato de apenas 25% do território nacional ter sido objeto de prospecção, sugere que o volume das reservas brasileiras de urânio pode ser significativamente ampliado com novos trabalhos de prospecção e pesquisa mineral. Tendo em conta as reservas adicionais estimadas na Região Norte – de cerca de 800 mil toneladas – o país poderá ascender à segunda posição como reserva mundial do minério.

É também importante ressaltar que 57% das reservas brasileiras já prospectadas têm custos inferiores a US\$80/kgU, mostrando-se competitivas para os padrões internacionais. Assim, do ponto de vista das reservas do mineral, não há restrições relevantes para a geração nuclear no país.

O primeiro complexo mineiro-industrial de urânio no Brasil foi instalado em 1982, no município de Caldas, no sul de Minas Gerais. Desde o início de sua operação, a unidade de Caldas produziu o suficiente para o suprimento de Angra I e de programas de desenvolvimento tecnológico. Esgotada a sua capacidade de produção, do ponto de vista da viabilidade econômica, passou-se a explorar a unidade de Lagoa Real/ Caetité na Bahia, permanecendo em Caldas apenas o beneficiamento. A produção de elementos combustíveis é feita em Resende-RJ, onde há duas unidades produtoras.

Figura 1 - Distribuição dos depósitos e das instalações de produção de urânio no Brasil



Fonte: INB (www.inb.gov.br, acesso em 12 de maio de 2016).

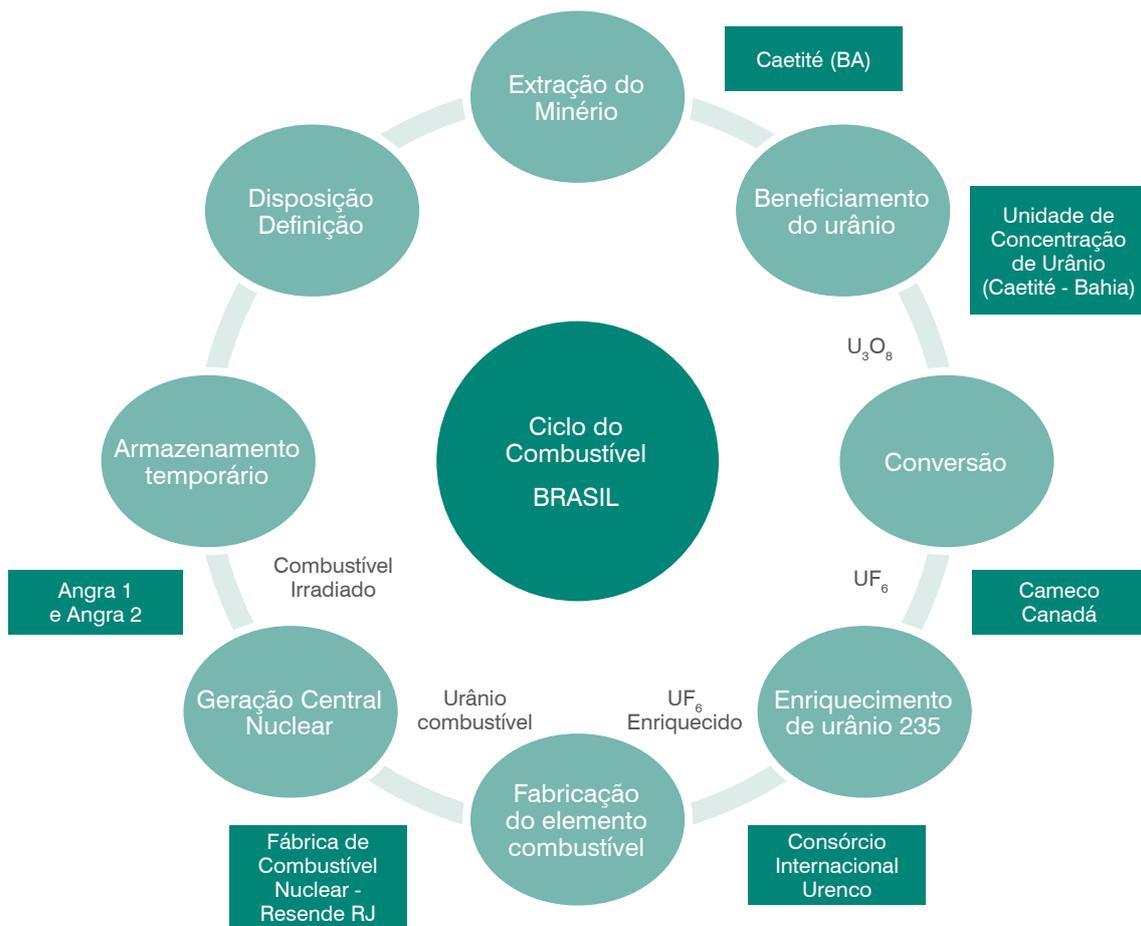
A mina de Caetité/BA, única em operação atualmente no Brasil, tem capacidade de produzir 400 toneladas de urânio concentrado por ano. Há um projeto de duplicação da capacidade de produção da unidade, com o objetivo de aumentar tanto a capacidade de mineração quanto de beneficiamento do minério.

Está também em andamento o processo de licenciamento ambiental para a exploração da reserva mineral de Itatiaia/Santa Quitéria, que tem o objetivo de produzir 1.600 toneladas de concentrado de urânio por ano. A expectativa é de que a reserva comece a produzir a partir de 2017 (INB, b).

Os reatores a água leve do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*) usados nas usinas nucleares do CNAEA utilizam para sua operação o urânio levemente enriquecido no isótopo urânio 235, que, ao sofrer fissão, gera energia térmica no núcleo do reator.

Embora domine a tecnologia de enriquecimento de urânio, o Brasil não dispõe de capacidade industrial em todas as etapas do ciclo do combustível nuclear. O ciclo completo é composto por um conjunto de etapas do processo industrial que transforma o mineral urânio, desde quando ele é encontrado em estado natural até sua utilização como combustível, dentro de uma usina nuclear. Essas etapas envolvem: mineração, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas e, finalmente, a fabricação de elemento combustível.

Figura 2 - Etapas do Ciclo de Produção do Combustível Nuclear



Fonte: EPE, Energia termoelétrica, 2016.

Atualmente, o processo de conversão é realizado no Canadá (pela Cameco) e de enriquecimento do urânio brasileiro é efetuado na Europa (pela Urenco, consórcio formado por Holanda, Alemanha e Inglaterra) e enviado em contêineres para a Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), que está localizada no município de Resende, no Rio de Janeiro. A FCN é um conjunto de fábricas que processam as etapas de reconversão, produção de pastilhas, fabricação de componentes e montagem do elemento combustível.

O objetivo do governo brasileiro é diminuir a dependência do exterior para o enriquecimento de urânio. Até recentemente, 100% do urânio usado no reabastecimento das usinas Angra 1 e 2 era enriquecido no exterior. Desde 2006, está em implantação a primeira planta de enriquecimento isotópico de urânio, em escala industrial, localizada em uma área das instalações da FCN, em Resende. A planta é constituída de cascatas de ultracentrífugas desenvolvidas e fornecidas pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP).

Em março de 2016, foi concluída a produção dos 40 elementos combustíveis que compõem a 22ª recarga da Usina de Angra 1. Nesta recarga foi utilizado, pela primeira vez, urânio enriquecido no Brasil, na Usina de Enriquecimento de Urânio da Indústrias Nucleares do Brasil (INB), implantada na FCN. Cerca de 80% do urânio utilizado nessa recarga foi produzido no Brasil.

A fase de enriquecimento é a que demanda a maior parte dos investimentos do ciclo do combustível, representando cerca de 30% do custo total. O investimento da implantação da Usina de Enriquecimento de Urânio, entre os anos de 2000 e 2023, para a capacidade instalada correspondente às necessidades de Angra 1 e 2, é da ordem de R\$ 1,8 bilhão (INB,b)

De acordo com a INB, o objetivo é que a usina seja capaz de atender a 100% das necessidades de urânio enriquecido de Angra 1 e 2. O PNE 2030 prevê que, compatibilizando o cronograma de expansão da unidade fabril de Resende com o de Angra 3, serão atendidos 60% da demanda das três centrais nucleares em conjunto.

O PNE 2030 considera que, em uma perspectiva de longo prazo, a oferta de combustível nuclear, no caso da instalação de novas centrais geradoras, não constitui necessariamente uma restrição, uma vez que a importação de urânio enriquecido é sempre uma possibilidade.

Figura 3 - Localização das unidades de exploração e beneficiamento de urânio no Brasil



Fonte: ANEEL. Outras fontes. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/outras_fontes/10_2_3.htm>. Acesso em: 04 ago. 2016.

O debate sobre a conveniência de se buscar a autossuficiência de combustível nuclear no Brasil envolve questões econômicas e estratégicas. Do ponto de vista econômico, a dificuldade para se atingir a autossuficiência está no elevado montante de investimentos requerido. Contudo, com o aumento do consumo doméstico, a partir da entrada em operação de Angra 3 e da eventual expansão do parque de geração nuclear, haverá ganhos de escala, que poderão vir a justificar tais investimentos.

De outro lado, a importação é possível pelo fato de o Brasil ser signatário dos acordos relevantes na área nuclear. Há, todavia, questões estratégicas que também são apontadas pelos que acreditam que o país deveria buscar a autossuficiência no ciclo do combustível. Há apenas seis organizações que enriquecem comercialmente urânio no mundo, situadas nos Estados Unidos, Rússia, China, Japão e dois consórcios de países europeus. O Brasil já enfrentou no passado problemas com abastecimento de urânio enriquecido.

As perspectivas para a oferta de combustível nuclear para a geração elétrica no Brasil dependem de muitas variáveis: evolução da oferta mundial, difusão do emprego de centrais da geração III+, que tendem a ser mais eficientes, dos investimentos brasileiros na prospecção de reservas em território nacional e na produção completa do ciclo do combustível no país.

Diante das incertezas quanto à evolução dessas variáveis, o PNE 2030 considera para os cálculos da participação nuclear na matriz energética brasileira de 2030, apenas as reservas nacionais, entendendo que partes do ciclo do combustível possam continuar sendo executadas no exterior, caso permaneça a insuficiência na capacidade instalada no Brasil.

Para a construção do cenário mais conservador de participação da energia nuclear na matriz energética brasileira – 4 novas usinas além de Angra 3 – o PNE 2030 considera que os recursos para a geração de energia elétrica estão limitados à disponibilidade de recursos minerais já identificados no momento de sua elaboração (2007) para um custo de exploração inferior a US\$ 40/kgU₃O₈.

4.4 A comercialização da energia nuclear no Brasil

Desde 1º de janeiro de 2013,²³ a eletricidade produzida pelas usinas Angra 1 e Angra 2 é comercializada com todas as distribuidoras de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN), em regime de cotas-partes. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define anualmente as proporções destas cotas-partes e os montantes anuais de energia a serem alocados, de acordo com os mercados consumidores de cada distribuidora. A soma das cotas-partes compõe a energia contratada para Angra 1 e Angra 2 e é limitada à soma das garantias físicas das usinas, descontados o consumo interno da central nuclear e as perdas na rede de transmissão.

Além disso, a ANEEL estabelece um valor de receita fixa anual correspondente à energia contratada, faturada junto às distribuidoras. O valor da tarifa da energia produzida por Angra 1 e Angra 2 corresponde, então, ao valor desta receita fixa dividida pela energia contratada.

Anualmente também é apurada a diferença entre a energia efetivamente gerada pelas usinas e a soma das garantias físicas, descontados o consumo interno da central nuclear e as perdas na rede de transmissão. Se o resultado for positivo, a Eletronuclear receberá o correspondente a 50% (cinquenta por cento) da diferença apurada, valorada pelo Preço de Liquidação de Diferenças – PLD médio anual calculado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Se o montante for negativo, a Eletronuclear ressarcirá às distribuidoras pelo maior valor entre a tarifa, e o PLD médio anual.

No PNE 2030, a EPE apresenta uma estimativa da participação dos principais componentes do custo da geração nuclear – investimento, operação e manutenção (O&M), e combustível – no custo total da geração nuclear. O custo de investimento das centrais nucleares equivale a cerca de 60% do custo de geração. Os custos de O&M e combustível representam 20% do total. Os custos correspondentes ao descomissionamento das centrais representam de 10% a 20% do custo do investi-

23. De acordo com a Lei Nº 12.111 (09/12/2009). Ver: <http://www.eletronuclear.gov.br/Aempresa/Comercializacao.aspx>

mento, embora tenham menor peso nos custos de geração, uma vez que são desembolsados apenas ao final da vida útil da usina²⁴.

A EPE estimou a tarifa que remunera os custos de instalação das centrais e os da geração nuclear no PNE 2030. Trata-se do custo de produção, que varia de R\$ 113/ MWh a R\$ 194/ MWh, sem impostos e encargos, para custo de inversão de US\$ 1300/ kW a US\$ 2300/ kW, respectivamente. A taxa de câmbio utilizada foi R\$ 2,30/ US\$²⁵.

Para o ano de 2016, o valor da tarifa estabelecida pela ANEEL para a energia gerada por Angra 1 e 2 corresponde a R\$ 206,29 por MWh. A título de comparação, ainda que imprecisa, o leilão A-5 de 2016, do qual participaram, entre outras fontes, sete usinas a biomassa e uma a gás natural, resultou na negociação de energia ao preço médio de R\$ 198,59/MWh.

O leilão A-5 de 2015 registrou preço médio de R\$ 259,19/MWh tendo as usinas termelétricas participantes do certame (três a biomassa e uma a gás natural) negociado ao preço médio de R\$ 278,46/MWh. Em 2015, a tarifa determinada pela ANEEL para a comercialização da energia elétrica gerada por Angra I e Angra II foi de R\$ 162,09/ MWh.

No caso da energia negociada no leilão A-5 de novembro de 2014, no qual participaram projetos de geração termelétricas (oito a biomassa, um a carvão e três a gás natural), o preço médio de venda no leilão foi R\$ 196,11/MWh. Nesse mesmo ano, a energia gerada por Angra 1 e Angra 2, com base em dezembro de 2014, foi comercializada a R\$ 156,79/MWh. No caso de Angra 1, o custo de produção, constituído pelas parcelas O&M (operação e manutenção) e combustível, registrou R\$ 116,82/MWh no exercício de 2014. Angra 2 gerou energia ao custo de R\$ 91,25/MWh.

O atual modelo de comercialização da energia gerada pelas centrais nucleares no Brasil dificulta a sua plena integração ao regime de sistema de preços no setor. Tendo sua tarifa definida em termos de cotas-partes e sendo a energia gerada repartida entre as distribuidoras, a geração

24. Ver: EPE, PNE 2030. http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_7.pdf. Pág. 72.

25. Essa taxa de câmbio é a que vigorava no período em que o PNE foi elaborado – 2006/2007.

nuclear não integra plenamente o regime de comercialização de energia de reserva, que se dá pela via dos leilões promovidos pela ANEEL. Apesar disso, a energia nuclear gerada no Brasil tem condições de desempenho (fator de capacidade) que a tornam fonte propícia para integrar o regime de energia de reserva, contribuindo para aumentar a segurança no fornecimento de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN). O ideal seria integrá-la ao sistema de leilões da ANEEL.

4.5 Os custos de investimento na geração de energia nuclear no Brasil

Embora seja possível afirmar que a geração de energia nuclear no Brasil (em R\$/MWh) atinge a faixa de preços praticada pelas termelétricas convencionais, o custo dos investimentos (em US\$/kW) no país são elevados, em comparação ao que prevalece no resto do mundo. Escala de operação, custo do capital e tempo de construção são variáveis essenciais que afetam os custos e que concorrem para onerar os investimentos no Brasil.

No Brasil, de acordo com a Eletronuclear²⁶, para a implementação de novas usinas o investimento previsto é de aproximadamente US\$ 5 bilhões para uma unidade de 1.000 MW de capacidade, ou seja, US\$ 5.000/kW instalado. Esse valor é correspondente ao custo do investimento *overnight*, ou seja, não incorpora os juros embutidos no financiamento. A Eletronuclear considera que as novas usinas terão vida útil de 60 anos.

Como mencionado na seção 3.2.2, a *International Energy Agency* (IEA, 2015b) estima que o custo médio de capital *overnight* esteja em torno US\$ 3.500/kW na China e chegue a US\$ 5.500/kW nos países da União Europeia. O custo no Brasil estaria, portanto, mais próximo do estimado para os países europeus. Entretanto, não resta dúvida de que, no Brasil, um dos maiores desafios é o custo do financiamento, que onera em muito o valor total do investimento.

26. Ver: <http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Novasusinasnucleares.aspx>

Ainda de acordo com a Eletronuclear, o estudo de viabilidade técnico-econômica de Angra 3, considerando toda a amortização dos financiamentos necessários à construção da usina e uma Taxa Interna de Retorno de 9,58%, o *payback* do empreendimento, tempo de retorno do capital investido na implantação de Angra 3, é de 16,5 anos. Avaliações internacionais, concluem que as usinas de geração III+, ora em construção, devido à celeridade das construções modulares, apresentam *payback* variando entre 10 e 13 anos.

A construção de Angra 3 encontra-se novamente paralisada, à espera da conclusão das investigações sobre denúncias de corrupção, cancelamento de contratos suspeitos, novos cálculos para as necessidades de financiamento e para os preços. Ainda assim, a Eletronuclear acredita que seja possível concluir a obra no prazo de 2020.

Em maio de 2016, a EPE publicou estudo sobre a energia termelétrica (EPE, 2016) em que estima o custo nivelado da geração nuclear no Brasil. Como explicado na seção 3.2.2, a metodologia mais utilizada internacionalmente para avaliação e comparação da competitividade econômica de diferentes fontes de geração elétrica é a que calcula o custo nivelado da eletricidade (LCOE – *Levelised Cost of Electricity*).

Buscando estimar os custos nivelados para a realidade brasileira, a EPE considerou as tecnologias que compõem a geração termelétrica no mundo, buscando adaptar alguns parâmetros às características brasileiras. As estimativas tomaram como base as referências internacionais *Projected Costs of Generating Electricity – 2015 Edition* (NEA/IEA, 2015) e *Annual Energy Outlook 2015* (EIA/DOE, 2015).

A primeira publicação trabalhou com um universo de dez países, incluindo Estados Unidos, China e Coreia do Sul, que possuem, em sua maioria, plantas em operação ou projetos avançados de PWR (de até 1400 MW) com sistemas passivos de segurança (ALWR). A segunda publicação pesquisada apresenta a situação específica norte-americana com utilização de reatores avançados de Geração III+ (de 1000 MW).

Os parâmetros utilizados nas estimativas da EPE estão apresentados na Tabela 9.

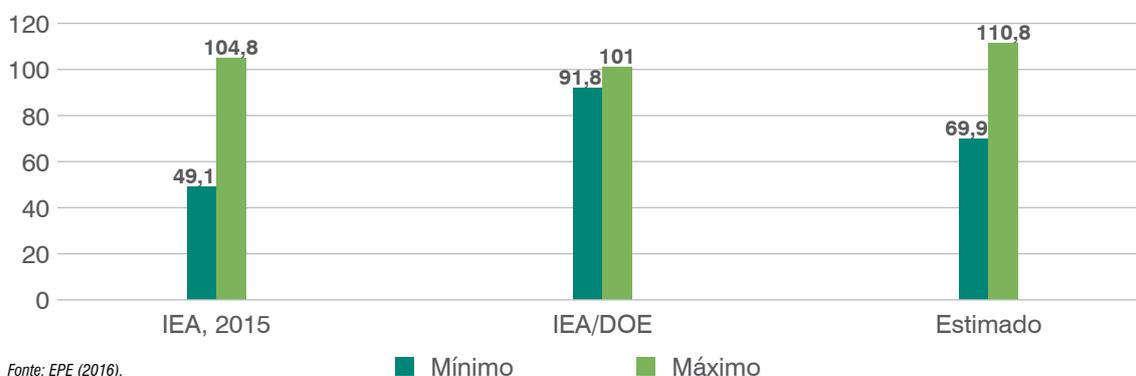
Tabela 10 - Parâmetros para Cálculo do Custo Nivelado da Geração Nuclear

Parâmetros	
Custo de investimento (US\$/kW)	4.200 a 8.000
Custo de O&M (US\$/MWh)	15
Custo do combustível (US\$/MWh)	9
Vida útil (anos)	60
Tempo de construção (%)	7
Eficiência (%)	33
Potência da planta (MW)	1.000
Fator de Capacidade Médio (%)	85
Custo de Descomissionamento (US\$/kW)	200 a 500
Taxa de desconto (%)	8

Fonte: EPE (2016).

O gráfico 7 apresenta os resultados da estimativa do custo nivelado realizada pela EPE e mostra que, utilizando-se os parâmetros da Tabela 9, o LCOE máximo (considerando o custo de investimento de US\$ 8.000/kW e custo de descomissionamento de US\$ 500/ kW) é cerca de 10% superior ao estimado para a situação específica dos Estados Unidos e 5,7% maior do que o resultante com os parâmetros do universo de 10 países que possuem projetos avançados de PWR. Já o LCOE mínimo, embora seja substancialmente maior do que o calculado para o conjunto de países, é 23% inferior ao observado na simulação para os Estados Unidos.

Gráfico 14 – Custo Nivelado – LCOE (US\$/MWh)



Fonte: EPE (2016).

Esse exercício é importante para orientar o planejamento da matriz energética e a distribuição dos investimentos entre as diversas fontes de geração de energia elétrica, levando em consideração a competitividade de cada fonte nuclear. As estimativas realizadas pela EPE indicam que o custo nivelado no Brasil não seria muito distante daqueles que prevalecem em outros países que desenvolvem programas de energia nuclear.

4.6 A organização institucional da geração de energia nuclear no Brasil

O desenvolvimento da fonte nuclear exige instituições fortes e modelo regulatório adequado para, de um lado, garantir a segurança e mitigar os riscos para a população e para o meio ambiente e, de outro, viabilizar oferta a preços competitivos com segurança energética.

A Constituição Federal determina que todas as atividades relacionadas à energia nuclear são de competência exclusiva da União²⁷. Atualmente, as principais instituições responsáveis pela execução da política nuclear no Brasil são:

- **Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN:** autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), criada em 1956 e estruturada em 1962 para desenvolver a política nacional de energia nuclear. A CNEN é responsável por regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil. A CNEN investe também em pesquisa e desenvolvimento e é responsável por promover e incentivar o uso da energia nuclear no Brasil. A CNEN é acionista majoritária da INB e da NUCLEP.
- » **Indústria Nucleares do Brasil – INB:** Sociedade de economia mista vinculada ao Ministério de Ciência e Tecnologia, sucessora da NUCLEBRÁS, tem como missão institucional o desenvolvimento das atividades relacionadas ao ciclo do combustível nuclear, sendo responsável pela mineração do urânio, beneficia-

27. Constituição Federal, Art. 21: "Compete à União: XXIII, explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados". A utilização, produção e comercialização de radioisótopos, poderão ser autorizadas sob regime de permissão, conforme as alíneas b e c do inciso XXIII do caput do art. 21. Além disso, o Artigo determina que a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa. O inciso XXIV do Art. 22 dispõe que compete privativamente à União legislar sobre atividades nucleares de qualquer natureza. O Art. 49 determina que é da competência exclusiva do Congresso Nacional aprovar iniciativas do Poder Executivo referentes a atividades nucleares.

Com relação ao combustível nuclear, a Constituição no Art. 177, no inciso V assegura o monopólio da União a: pesquisa, lavra, enriquecimento, reprocessamento, industrialização e comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados. O parágrafo 3º dispõe que a lei disporá sobre o transporte e a utilização de materiais radioativos no território nacional.

Por fim, o Art. 225 determina que as usinas que operem com reator nuclear deverão ter sua localização definida em lei federal, sem o que não poderão ser instaladas.

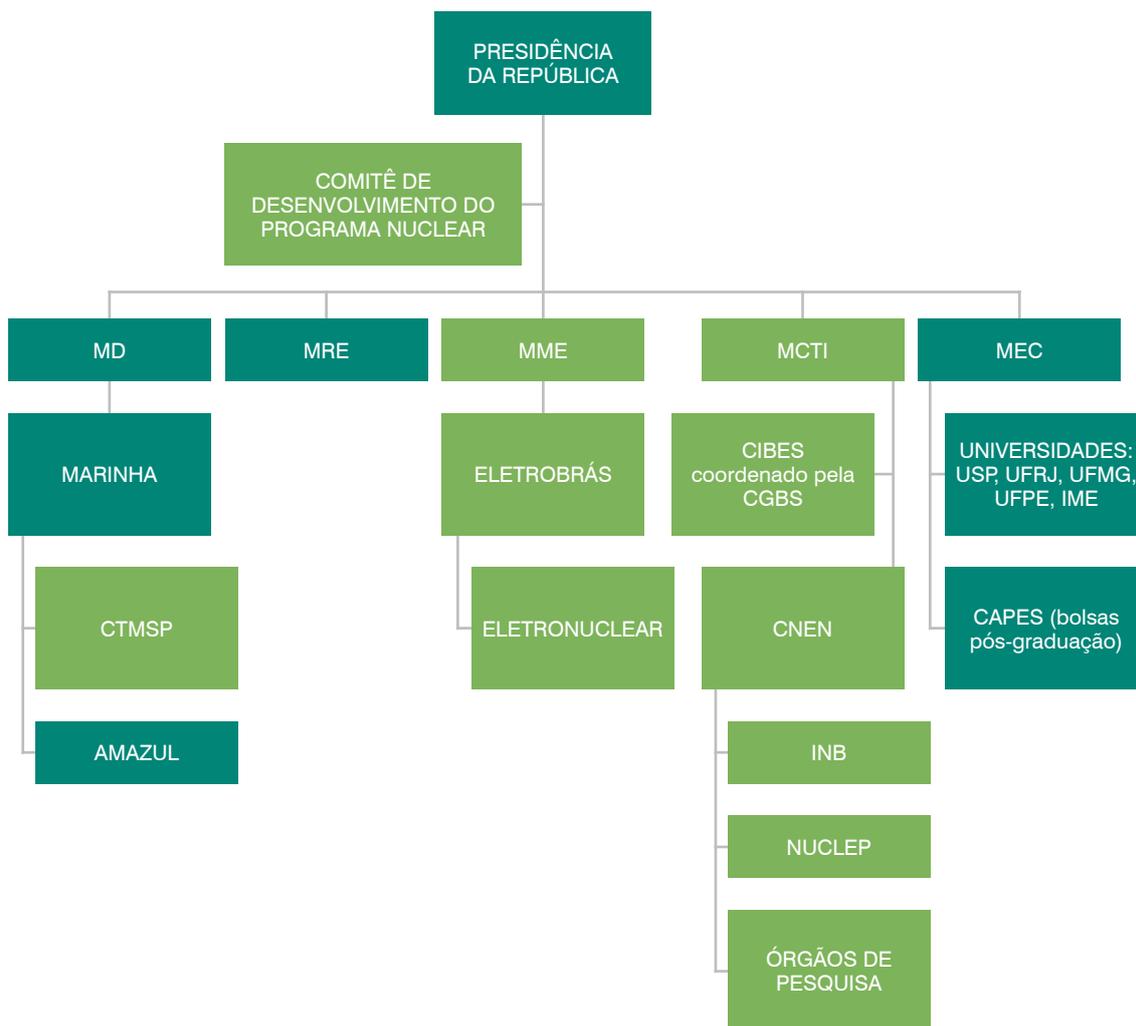
mento primário, produção e montagem dos elementos combustíveis utilizados nos reatores das usinas nucleoeletricas.

- » **Nuclebras Equipamentos Pesados S.A. – NUCLEP:** Vinculada ao MCTI, é uma indústria de base produtora de bens de capital sob encomenda, que tem como objetivo projetar, desenvolver, fabricar e comercializar componentes pesados relativos a usinas nucleares, a construção naval e “offshore” e a outros projetos. O Conselho de Administração da NUCLEP é presidido pelo Presidente da CNEN.

Estão também vinculados à CNEN quatro institutos de pesquisas e desenvolvimento tecnológico: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN); Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), e Instituto de Engenharia Nuclear (IEN).

- **Eletronuclear:** Subsidiária das Centrais Elétricas Brasileiras – Eletrobrás, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem como objeto social “a construção e operação de usinas nucleares, a geração, transmissão e comercialização de energia elétrica delas decorrente”. A totalidade da energia produzida pelas usinas Angra 1 e Angra 2 é comercializada com todas as distribuidoras de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN), em regime de cotas-partes.

Figura 4 - Organograma da Política Nuclear Brasileira



Fonte: Alvim (2013); Fortalecimento do Setor Nuclear Brasileiro, SAE, com adaptações dos autores.

O organograma dos órgãos governamentais que, de algum modo, estão envolvidos no desenvolvimento da política nuclear brasileira é vasto (Figura 4). Inclui não apenas o Ministério das Minas e Energia – os principais executores, em vermelho na figura acima – mas também o Ministério da Defesa, que atua na formulação das estratégias e desenvolvimento de tecnologia para processos tecnológicos, industriais e operacionais de instalações nucleares aplicáveis à propulsão naval, o Ministério das Relações Exteriores, responsável pelas negociações de acordos e tratados internacionais e o Ministério da Educação, que supervisiona as atividades das universidades que oferecem cursos de graduação e pós-graduação na área nuclear.

Há no modelo institucional e regulatório brasileiro duas características que são apontadas por muitos analistas como entraves para o desenvolvimento da energia nuclear no país:

- a. **A primeira refere-se ao papel da CNEN**, que exerce simultaneamente múltiplas funções – regulação, licenciamento e fiscalização das instalações nucleares no Brasil, além de ter a missão de promover e incentivar o uso da energia nuclear no Brasil.

O sistema de segurança é um dos aspectos mais sensíveis para o apoio da opinião pública ao desenvolvimento da geração de energia nuclear. A legislação brasileira define que a organização operadora da planta é a principal responsável pela segurança de uma instalação nuclear. Para obter e manter as licenças necessárias às diferentes etapas do processo de geração é necessário cumprir as normas de segurança estabelecidas pela CNEN.

A Convenção de Segurança Nuclear, da qual o Brasil é signatário e que está em vigor no país desde 1998, determina em seu Artigo 8 que “Cada Parte Contratante tomará as medidas apropriadas para assegurar uma efetiva separação entre as funções do órgão regulatório e aquelas de qualquer outro órgão ou organização relacionado com a promoção ou utilização da energia nuclear”²⁸. No Brasil, os papéis de regulador, licenciador, fiscalizador e promotor do uso da energia nuclear são desempenhados pelo mesmo órgão – a CNEN, contrariando as boas práticas internacionais e a recomendação da Convenção.

- b. **A segunda está relacionada ao monopólio estatal na exploração e produção da energia nuclear no Brasil**. Há razoável grau de consenso entre especialistas quanto à necessidade de contar com a contribuição da iniciativa privada para o desenvolvimento da geração nuclear no Brasil. Menor grau de consenso há sobre a solução jurídico-institucional mais adequada para lidar com essa questão.

A maioria dos especialistas entende que a Constituição Federal veda a participação privada em todas as etapas da geração de energia nuclear em regime de concessão, uma vez que os artigos 21 e 177 reservam ao monopólio da União os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados.

De acordo com essa interpretação, para tornar possível a participação da iniciativa privada nesse setor seria necessária a aprovação de uma Proposta de Emenda Constitucional que alterasse os artigos 21 e 177 da Constituição Federal (EPE, 2016).

Outros entendem que a “caracterização da energia elétrica de matriz nuclear como serviço público, titularizado pelo Estado, impor-

28. BRASIL. Decreto nº 2.648, de 1º de julho de 1998. Promulga o protocolo da convenção de segurança nuclear, assinada em viena, em 20 de setembro de 1994. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2648.htm>. Acesso em: 04 ago. 2016.

ta na possibilidade de sua concessão ao particular. A geração de energia nuclear é enquadrada como serviço público, seguindo, portanto, a nota característica do serviço público, que é a possibilidade de o Estado promover a sua delegação ao setor privado, mediante concessão, autorização e permissão.” (FGV, 2013).

De acordo com essa segunda interpretação, o contexto atual serviria de base normativa para a participação do setor privado nas atividades de construção e operação de usinas nucleares. Entretanto, mesmo essa linha de interpretação reconhece a conveniência de se buscar a criação de um novo marco legal específico que regule a forma de participação do setor privado, conferindo segurança jurídica a essa participação.

Encontra-se em tramitação no Congresso Nacional, desde 2007, a Proposta de Emenda à Constituição - PEC 211/2007 - do Deputado Alfredo Kaefer - PSDB/PR, que “Dá nova redação aos arts. 21 e 177 da Constituição Federal, para excluir do monopólio da União a construção e operação de reatores nucleares para fins de geração de energia elétrica.” Em outra direção, o Deputado Carlos Sampaio - PSDB/SP apresentou a PEC 41/2011, que “Altera o § 6º, do art. 225, da Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 05 de outubro de 1988 e cria o art. 44-A dos Atos das Disposições Constitucionais Transitórias, promulgados em 05 de outubro de 1988, para o fim de vedar a construção e instalação de novas usinas que operem com reator nuclear no país e permitir as atividades das usinas já existentes e em construção”.

O desenvolvimento de um programa de geração de energia nuclear no Brasil requer que se avance no debate sobre o modelo institucional em vigência no país. Esse debate precisa avançar em duas vertentes: (i) a conveniência de se criar uma agência reguladora interdependente, que contribua para a criação de um ambiente institucional que confira segurança e confiança à sociedade brasileira, como também a eventuais investidores privados; e (ii) a conveniência de abrir à iniciativa privada algumas das atividades relacionadas à geração nuclear no Brasil, seja nas etapas de fabricação do combustível, seja na construção e operação das centrais nucleares.

A participação da iniciativa privada com investimentos e financiamento para atividades de geração de energia nuclear somente será viabilizada com um ambiente jurídico-institucional que confira segurança jurídica

aos agentes privados. São operações de longo prazo, envolvendo montantes elevados de investimentos e que requerem previsibilidade regulatória. Embora haja visões variadas sobre a necessidade de reforma constitucional, essa parece ser a única solução que oferece a segurança jurídica necessária ao engajamento do setor privado no desenvolvimento da geração nuclear no Brasil.

4.7 A questão do financiamento

O financiamento é uma etapa sempre difícil em grandes projetos de infraestrutura, mas é particularmente complexo em projetos de geração de energia nuclear: esses são projetos sujeitos a riscos elevados e difíceis de serem mitigados (FGV Energia, 2016). Usinas nucleares são empreendimentos de longo prazo, com tempo médio de sete anos, e frequentemente sujeitos a alterações que afetam o cronograma de construção e implantação, pressionando os custos.

No caso do Brasil, considera-se que são necessários pelo menos dez anos entre a decisão de investir e o início da operação da usina, passando pelo licenciamento e construção. Além disso, o país tem histórico de atrasos nos cronogramas e aditivos nos projetos iniciais que implicam em expressivo crescimento dos custos, comprometendo muitas vezes a rentabilidade dos projetos.

Passados mais de 30 anos do início da construção de Angra 3, o projeto, que ficou paralisado entre 1986 a 2010, está novamente paralisado, às voltas com auditoria em suas contas e revisão orçamentária, sem que seu financiamento tenha sido equacionado.

A estrutura de financiamento concebida para a retomada de Angra 3 em 2010 era fortemente dependente da participação do BNDES e do aporte de capital próprio da Eletrobrás (Guimarães, 2015). O agravamento da crise econômica nos últimos anos, as dificuldades vividas pelo Sistema Eletrobrás e o redimensionamento dos recursos disponíveis para crédito do BNDES sugerem que será necessário buscar novo modelo de financiamento.

Além da conclusão de Angra 3, o PNE prevê a construção de mais quatro usinas até 2030. Para viabilizar a expansão do parque de geração nuclear no Brasil parece inevitável contar com a participação do setor privado e modelos de negócios alternativos.

O desenvolvimento da energia nuclear no mundo foi fortemente baseado no financiamento do Estado, tendo sido as empresas estatais responsáveis pela construção e operação de centrais nucleares, assumindo os riscos envolvidos nos projetos (FGV, 2016). Ainda assim, as experiências e os modelos de desenvolvimento de energia nuclear variam muito entre os países. Nos Estados Unidos, a participação da iniciativa privada teve início ainda na década de 1950. Já nos países europeus a participação estatal tende a predominar.

Países em desenvolvimento que ingressaram mais tardiamente no esforço de desenvolver projetos de energia nuclear vêm adotando modelos variados e que dependem, em boa medida, das características institucionais do país, mas também de seus objetivos em relação ao desenvolvimento de uma indústria local associada ao processo de geração de energia nuclear.

Há alguns estudos desenvolvidos recentemente com propostas alternativas de modelos de negócios que permitem viabilizar a expansão da geração nuclear no Brasil²⁹. As diferentes propostas reconhecem a conveniência de se estimular a participação da iniciativa privada nesses projetos, seja na fase de mineração, seja na construção e operação das centrais nucleares. Há, todavia, nuances nos modelos propostos, principalmente no que se refere ao modelo de capitalização e às relações entre os agentes públicos e privados.

Como discutido na seção anterior, o desenho de um novo modelo de negócios para a geração de energia nuclear no Brasil precisa ser antecedida por uma reforma do modelo institucional que defina o papel da iniciativa privada nesse processo. A abertura à participação do capital privado nas atividades de geração nuclear, por sua vez, torna ainda mais importante a revisão do marco institucional e o papel da agência reguladora e fiscalizadora.

29. Ver, por exemplo, Mielnik (2016), In FGV Energia, *Cadernos, Energia Nuclear*, Abril de 2016.

4.8 O impacto socioambiental da geração nuclear no Brasil

Um dos principais desafios para a intensificação da geração nuclear como fonte de geração de energia são os custos ambientais e a percepção da população quanto aos seus impactos socioambientais. Ainda que todas as fontes de geração de energia gerem, inevitavelmente impactos socioambientais, a percepção da opinião pública é de que os riscos associados à geração nuclear são substancialmente mais elevados. Os acidentes com centrais nucleares – Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima – contribuíram para sedimentar essa percepção.

A decisão de promover a expansão da geração nuclear no Brasil não pode, portanto, prescindir de um aprofundamento do debate sobre vantagens e riscos dessa fonte de geração do ponto de vista socioambiental no país.

A seguir apresentam-se, de forma esquemática, as principais vantagens bem como os principais riscos e custos advindos da geração nuclear no Brasil³⁰.

AS VANTAGENS:

- Reduzida vulnerabilidade climática, contribuindo para conferir maior confiabilidade na produção de energia e maior segurança energética para o país;
- Flexibilidade locacional: é possível construir centrais nucleares em áreas próximas aos centros de carga, reduzindo as perdas e os impactos negativos de extensas linhas de transmissão. Em geral, a localização leva em conta a distância para o transporte de combustível.
- Reduzido impacto de contaminação atmosférica por emissão de gases causadores do efeito estufa, principalmente CO₂. Enquanto uma usina a carvão emite quase um quilo por kWh gerado, uma usina a óleo emite 818 g/kWh, uma usina a gás natural emite 446 g/kWh, a usina núcleo-elétrica emite apenas 4 g/kWh.
- A usina nuclear não produz óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, elementos causadores da chuva ácida. A presença das usinas Angra 1 e 2 não alterou o ecossistema local seja do ponto de vista convencional ou do ponto de vista radiológico.

30. Boa parte das vantagens e riscos apresentados nessa seção são retirados de EPE (2016).

- A quantidade necessária de combustível para operar usinas termelétricas é muito pequena em comparação a outras fontes. Para gerar 1.000 MW por ano, necessita-se 1.100.000 toneladas de gás natural (5,5 navios metaneiros de 200 mil ton.), ou 1.400.000 ton. de óleo (7 navios petroleiros de 200 mil ton.), ou ainda 2.200.000 ton. de carvão (11 navios cargueiros de 200 mil ton.). Por outro lado, a geração de 1.000 MW por ano requer somente 30 ton. de urânio (3 caminhões de 10 ton).
- Usinas termelétricas necessitam de áreas relativamente pequenas quando comparadas a outras fontes de energia.

OS CUSTOS E RISCOS:

- Alteração de paisagem e do uso do solo, além de interferência na fauna e flora. No caso do Brasil, a localização do complexo nuclear na região de Angra dos Reis causou forte debate por se tratar de região com grande potencial turístico. Esses riscos podem ser mitigados com localizações apropriadas, soluções arquitetônicas e monitoramento de impactos durante a fase de construção das usinas.
- Uso de recursos hídricos: dependendo da tecnologia adotada, pode haver consumo expressivo de água. No caso do Brasil, as usinas hoje instaladas estão no litoral, utilizando água do mar como fonte fria externa. Nesse processo, a água do mar é captada, circula no sistema de resfriamento e é devolvida ao mar com temperatura mais elevada. É importante monitorar a temperatura de retorno para não comprometer a qualidade da água nem afetar a fauna e flora marítimas.
- Geração de resíduos sólidos não-radioativos, que podem causar alteração da qualidade da água e do solo. Estes devem passar por tratamento e destinação adequados e ser reaproveitados sempre que possível.
- Geração de efluentes líquidos, que são representados pela água de processo e esgoto sanitário, que podem alterar a qualidade dos cursos de água e o solo. Estes efluentes devem ser tratados e dispostos adequadamente.
- Riscos de acidentes para a população local: além dos cuidados máximos com segurança, deve haver campanhas bem desenvolvidas de esclarecimento à poluição potencialmente afetada.
- Riscos relacionados à cadeia de produção e transporte do combustível nuclear que incluem atividades convencionais como mineração e processamento tal como os que ocorrem em outras atividades industriais similares. Por envolverem material radioativo, exigem monitoramento, gerenciamento e deposição de resíduos.

A questão mais relevante relacionada aos impactos ambientais da geração nuclear, contudo, localiza-se no gerenciamento dos rejeitos radioativos, que podem afetar a saúde das pessoas e o meio ambiente. Os riscos são resultantes de fugas eventuais a partir do armazenamento e repositório.

Há pelo menos três formas de gerenciar os combustíveis irradiados nas usinas termonucleares:

- Armazenamento inicial em piscinas próximas ao reator para que esfrie e a radioatividade decaia;
- Armazenamento inicial complementar/interino, visando liberar espaço de estocagem nas piscinas das usinas;
- Destinação final dos elementos combustíveis irradiados, que pode envolver seu reprocessamento ou armazenagem.

No Brasil, a Eletronuclear é a responsável pelo gerenciamento dos rejeitos gerados em suas usinas, o que inclui desde a guarda dos materiais radioativos até a sua disposição final em instalações apropriadas e operadas pela CNEN.

Está prevista a construção de um Repositório Nacional de Rejeitos Radioativo de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN). A CNEN tem a incumbência legal de construí-lo até 2018. Enquanto o repositório não é construído, esses rejeitos de baixo e médio níveis de radiação estão sendo armazenados nas instalações das usinas existentes. O esgotamento da capacidade de armazenamento nas condições atuais está previsto para 2020, mas está em marcha um processo de otimização da configuração de armazenamento que possibilitará estender a autonomia dos depósitos até, pelo menos, 2025.

Para os rejeitos de alta radioatividade, a Eletronuclear está ampliando a capacidade de armazenamento das piscinas e construindo uma Unidade de Armazenamento Complementar de Combustível Irrradiado de Longo Prazo.

O Brasil ainda não tem uma política de reprocessamento de combustível irradiado. O país precisa avançar na definição sobre o destino dos combustíveis irradiados. Enquanto essa política não é definida, é importante que o país avance na construção do RBMN.



5 O FUTURO DA GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL: QUESTÕES PARA O DEBATE

Fonte: /Shutterstock

O futuro da participação da geração nuclear na matriz elétrica brasileira nas próximas décadas depende de sua capacidade de contribuir para três objetivos fundamentais:

- i. segurança energética: garantia que a oferta de energia elétrica atenderá às necessidades de crescimento econômico e bem-estar do consumidor;
- ii. competitividade econômica: viabilidade da produção de energia a preços competitivos com as demais fontes alternativas;
- iii. segurança socioambiental: garantia de que todas as medidas necessárias para lidar com os riscos à saúde humana e o meio ambiente decorrentes da atividade nuclear estarão em prática.

5.1 Contribuição da geração nuclear para a segurança energética

Mais de 60% da capacidade instalada da matriz de energia elétrica no Brasil são provenientes da fonte hidráulica. Todavia, grande parte do potencial hidráulico brasileiro apto ao aproveitamento hidrelétrico (mais de 60%) está localizado na Amazônia. Por força da topografia e de restrições de tipo socioambiental, o uso intensivo desse potencial com a construção de grandes reservatórios é de difícil viabilidade.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), desde o final da década de 1990 não entraram em operação novas hidrelétricas com reservatórios de regulação plurianual. A expansão da fonte hidrelétrica tem se dado por usinas a fio d'água. Estima-se que, entre 2002 e 2017, o Sistema Interligado Nacional (SIN) deva reduzir a capacidade de regularização dos estoques de energia de 6,5 para 4,7 meses (FGV, 2016).

Ainda de acordo com o Plano da Operação Energética (PEN) do ONS, a perda gradativa da capacidade de regulação das usinas hidrelétricas no SIN tem impactado negativamente o planejamento da operação energética, aumentando os riscos de déficit, o valor esperado da energia não suprida e os custos marginais da operação (FGV, 2016).

Apesar do expressivo investimento e rápido crescimento de outras fontes renováveis de energia, principalmente a eólica, mas também, em menor escala a solar, estas fontes também têm como principal característica a intermitência na produção. Dessas limitações decorre a necessidade de complementação térmica que opere na base do suprimento.

A crise hídrica brasileira de 2013 fez com que as usinas térmicas, que têm a função complementar de garantir o fornecimento de energia elétrica, fossem acionadas continuamente. Em junho de 2015, mais de 30% de toda a energia elétrica gerada no Brasil foi proveniente de fontes térmicas. Como não são projetadas para operar continuamente, o seu uso elevou expressivamente as tarifas de energia elétrica.

Essa experiência e a falta de perspectivas para a construção de hidrelétricas com grandes reservatórios trazem à tona a necessidade de que o Brasil discuta o papel da geração nuclear na matriz de energia elétrica das próximas décadas. A complementação térmica é essencial para garantir o fornecimento de energia elétrica a longo prazo.

A geração térmica a gás natural pode dar uma contribuição importante para a estabilidade da oferta. Entretanto, essa opção tem sido, por vezes, mais cara do que a geração nuclear e a carvão. O Brasil ainda detém reservas importantes de carvão no Sul do país. O ponto negativo dessa opção são as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, o país

não deverá desconsiderar a oferta de origem nuclear como integrante do aporte complementar de energia elétrica. O *mix* de geração térmica deve contemplar a combinação mais eficiente em termos de segurança de abastecimento e modicidade tarifária.

O Brasil detém expressivas reservas de urânio, domínio da tecnologia de enriquecimento e comprovada experiência no setor nuclear. Embora não haja no país, capacidade industrial suficiente para assegurar sua autossuficiência em todas as etapas do ciclo do combustível, os riscos associados à escassez de combustível nuclear são reduzidos.

O planejamento energético brasileiro ainda não deixa claro qual será o papel da energia nuclear na matriz de geração elétrica do país a longo prazo. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2024) não prevê nenhuma nova central nuclear, além de Angra 3 no horizonte de tempo até 2024. Como mencionado anteriormente, o PNE 2030 prevê quatro novas usinas, sem que os locais tenham sido escolhidos. O PNE 2050 está em elaboração, mas ainda não está claro qual será o papel da nuclear no planejamento de longo prazo.

O planejamento de longo prazo é essencial para viabilizar investimentos na geração nuclear, que exige longo período de tempo para que todo o processo – do planejamento ao licenciamento e à construção – seja concluído. Caso queira, de fato, contar com a contribuição da energia nuclear, é fundamental que o país disponha rapidamente de um programa de longo prazo voltado para esse objetivo.

5.2 Competitividade econômica da fonte nuclear no Brasil

Embora a geração nuclear possa desempenhar papel importante como fonte térmica capaz de operar na base e contribuir para a segurança energética do país, não menos relevante é a discussão sobre a competitividade dessa fonte de energia.

Como se viu na seção 4 deste relatório, a fonte nuclear tem preços relativamente competitivos quando comparada a outras fontes de energia

de base, como o gás natural. Em 2015, o custo médio do combustível na geração nuclear (Angra 1 e 2) no Brasil foi de R\$21,57/MWh – valor que representou 37% do custo médio do combustível usado nas térmicas convencionais despachadas centralizadamente pelo ONS para gerar a mesma quantidade de energia (Eletronuclear, 2016).

Apesar de o custo do combustível na geração nuclear ser atualmente significativamente inferior ao do gás natural, é importante ter em conta que o preço do gás natural poderá cair a depender da evolução das explorações na Bacia do Atlântico, na Argentina e nos Estados Unidos.

O Brasil tem grandes reservas de urânio e domina o ciclo do combustível, como mencionado anteriormente. Entretanto, não tem capacidade industrial para autossuficiência e produz em uma escala subótima. A decisão de investir na produção do ciclo completo do combustível poderia conferir ao país condições de operar como um ator relevante no mercado mundial desse combustível, além de afastar o risco da dependência externa.

Embora seja possível afirmar que a geração de energia nuclear no Brasil (em R\$/MWh) atinge a faixa de preços praticada pelas termelétricas convencionais, o custo dos investimentos no setor nuclear (em US\$/kW) no país é elevado. O custo de investimento das centrais nucleares equivale a cerca de 60% do custo de geração.

Escala de operação, custo do capital e tempo de construção são variáveis essenciais que afetam os custos e que concorrem para onerar os investimentos no Brasil. Atuar sobre essas variáveis de modo a mitigar os custos de investimentos é essencial. A decisão sobre o número de centrais nucleares que serão construídas no horizonte de tempo do PNE 2050 é essencial para a identificação de possibilidades de economias de escala, que também podem ser obtidas pela concentração de usinas em determinadas localidades.

O equacionamento da disponibilidade e do custo do capital depende, em boa medida, da identificação do modelo de negócios que melhor atenda às características e necessidades do setor no Brasil. A viabilidade de participação da iniciativa privada é questão incontornável na

definição de um novo modelo de negócios para a geração nuclear no Brasil. Para tanto, a revisão do modelo institucional é etapa necessária.

Por fim, a garantia da modicidade tarifária requer que a geração nuclear esteja integrada ao sistema de preços do setor. Atualmente, a energia nuclear não integra o sistema de leilões da ANEEL, pelo qual ingresam no SIN as ofertas mais competitivas. A tarifa da geração nuclear é estabelecida pela ANEEL, que também define as cotas-partes que são vendidas às distribuidoras. Esse sistema não permite que a fonte nuclear concorra diretamente com as demais fontes térmicas. A solução definitiva para essa questão também depende do modelo de negócios e da revisão do desenho institucional do setor

5.3 Segurança socioambiental: os desafios no Brasil

A energia nuclear é fonte estável e limpa do ponto de vista ambiental, embora traga riscos de acidentes de grandes repercussões. A probabilidade de acidentes graves é bastante reduzida, mas os três grandes casos de maior repercussão – Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima – contribuíram para sedimentar a percepção de risco elevado.

Houve desaceleração nos programas de construção de novas centrais após cada um dos acidentes ocorridos. Contudo, há nítida tendência de retomada de novos projetos, seja em países industrializados, seja em países em desenvolvimento. Esse processo tem sido acompanhado por avanços tecnológicos permanentes nos processos operacionais das usinas e nos procedimentos de disposição dos rejeitos.

O principal risco socioambiental da geração nuclear no Brasil não está resolvido: é o problema da disposição definitiva dos rejeitos radioativos. Os riscos associados ao gerenciamento dos rejeitos radioativos são resultantes de fugas eventuais a partir de seu armazenamento. Por isso, a questão da disposição definitiva dos rejeitos é tema sensível nos países que possuem centrais nucleares.

Como discutido na seção 4.8, no Brasil a Eletronuclear é a responsável pelo gerenciamento dos rejeitos usados em suas usinas. Isso inclui todo o conjunto de atividades que vai da guarda dos materiais radioativos até sua disposição final. Apesar disso, cabe à CNEN definir, prover e operar instalações apropriadas para os rejeitos radioativos. A CNEN tem a incumbência legal de construir um repositório de rejeitos radioativos até 2018.

A questão do armazenamento de rejeitos pode ser mitigada por uma política de reprocessamento de combustível irradiado. O Brasil ainda não tem uma política para lidar com essa questão. O país precisa avançar na definição sobre o destino dos combustíveis irradiados. Enquanto essa política não for definida, é importante que o país avance na construção do repositório.

5.4 Os principais temas na agenda de políticas públicas para a geração nuclear

A discussão sobre a participação da fonte nuclear no futuro da geração de energia elétrica no Brasil, desenvolvida acima, levou à identificação de uma série de questões que precisam ser tratadas se o país, de fato, pretender avançar no desenvolvimento dessa fonte de energia.

A agenda a seguir não pretende ser exaustiva, mas tem o objetivo de sintetizar alguns dos principais desafios que precisam ser enfrentados para que o Brasil possa contar com segurança com a fonte nuclear para compor sua matriz de energia elétrica.

- **Programa de geração nuclear de longo prazo:** a construção de centrais nucleares tem elevado custo de investimentos e requer longo período de tempo. O país precisa ter clareza sobre a contribuição que se espera da fonte nuclear para a geração de energia elétrica, de modo a definir o número de usinas a serem construídas, sua distribuição no território nacional e as possibilidades de economia de escala em sua construção.
- **Viabilização da participação da iniciativa privada:** do ponto de vista econômico, o principal desafio a vencer para uma maior participação da fonte nuclear na matriz de energia elétrica no Brasil é o elevado custo de construção, que, combinado à escassez de recursos públicos para o financiamento, dificulta o seu equacionamento. É fundamental rever o ambiente regulatório para viabilizar a participação da iniciativa privada, tanto em algumas fases da produção de combustível nuclear quanto na construção e operação das usinas. Um passo fundamental nessa direção é a aprovação de uma Proposta de Emenda Constitucional que altere os artigos 21 e 177 da Constituição Federal.
- **Política para o ciclo do combustível nuclear:** o País tem abundantes recursos minerais e domina o ciclo do combustível nuclear. Entretanto, não dispõe de capacidade industrial para o processamento doméstico de todo o combustível necessário à operação de Angra 1 e Angra 2. A entrada em operação de Angra 3 e a eventual construção de novas usinas aumentarão a demanda por combustível nuclear. A questão da autossuficiência na oferta do combustível é importante, embora não seja condição *sine qua non*, para dar garantia de produção às centrais nucleares. No entanto, poderia contribuir para que o Brasil se torne um ator importante no mercado internacional de combustíveis.
- **Revisão da estrutura institucional:** uma estrutura institucional transparente com efetiva separação de atribuições das funções de regulação, licenciamento e fiscalização daquelas relacionadas ao fomento e difusão do uso da energia nuclear é fundamental para conferir maior transparência e segurança para a opinião pública e investidores.
- **Política para os rejeitos radioativos:** a disposição definitiva dos rejeitos radioativos continua sendo a principal questão pendente no que se refere aos impactos socioambientais da atividade de geração nuclear no Brasil. Dois elementos são importantes nessa questão: a construção de um repositório para armazenamento de material de baixa e média radioatividade e uma política para reprocessamento de combustível.
- **Revisão do mecanismo de comercialização:** a competitividade é critério essencial para o apoio ao investimento na fonte nuclear como fonte alternativa para a operação na base da matriz energética brasileira. Para manter a modicidade tarifária, é importante que a energia gerada por fontes nucleares possa concorrer com outras fontes térmicas nos leilões da ANEEL. Entretanto, para isso é importante definir um novo modelo de negócios para o setor.



CONCLUSÕES

Fonte: Shutterstock

A evolução do uso de energia nuclear no mundo e no Brasil tem estado sujeita a marchas e contramarchas. No cenário internacional, preocupações com os impactos socioambientais da geração nuclear levaram a contínuos aperfeiçoamentos tecnológicos e nas regulações vigentes, tornando mais segura a geração nuclear, mas também encarecendo os custos de construção e manutenção das centrais.

Ainda assim, a cada acidente de grande repercussão, observam-se movimentos de paralisação e revisão das políticas domésticas nos países desenvolvidos. Contudo, existem 65 novas usinas nucleares sendo construídas no mundo, a maioria delas localizada na Ásia, embora também haja algumas sendo construídas e/ou planejadas nos Estados Unidos e na Europa.

No Brasil, a crise energética enfrentada nos últimos anos colocou em xeque a política energética e estimulou um novo debate sobre a composição da matriz de energia elétrica no país. A forte dependência da hidroeletricidade que caracteriza a matriz brasileira vem sendo mitigada por investimentos em outras fontes renováveis, como a eólica e a solar. Todavia, essas são fontes intermitentes, incapazes de prover segurança ao sistema.

Nesse contexto, renasce o debate sobre o papel da energia nuclear para a segurança energética no Brasil. Embora tenha nítidas vantagens em termos de sua capacidade de contribuir para a geração de energia de base e por seu caráter limpo, do ponto de vista das emissões de gases de efeito estufa, há uma série de desafios a vencer para que o Brasil possa, de fato, contar com a fonte nuclear para os objetivos de segurança energética, competitividade e segurança socioambiental. A agenda de desafios a serem superados e elementos de políticas públicas a serem considerados foi apresentada na seção 5 deste trabalho.



REFERÊNCIAS

Fonte: /Shutterstock

ANEEL. **Matriz energética brasileira**. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 10 maio 2016.

ATYIAS, Izak. A review of Turkey's nuclear policies and practices. 2015. **EDAM Discussion Paper Series, 2015/5**, 12 Ago. 2015.

ATYIAS, Izak. Risks, incentives and financing models of nuclear power plants: international experiences and the Akkuyu model. **EDAM report: the Turkish model for transition to nuclear power**, dez. 2011a.

ATYIAS, Izak. A regulatory authority for nuclear energy: country experiences and proposals for Turkey. **EDAM report: the Turkish model for transition to nuclear power**, December. 2011b.

ELETRONUCLEAR. **Perguntas frequentes**. 2016. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Novasusinasnucleares.aspx>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Energia termelétrica: gás natural, carvão, biomassa e nuclear**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano nacional de energia: 2030**. Rio de Janeiro, EPE, 2007.

FERREIRA, I. D. **Custos invisíveis**: a equidade intergeracional e o custo ambiental da disposição de rejeitos nucleares de Angra 3. 2014. Dissertação (Mestrado)-Gestão econômica do meio ambiente, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. Energia nuclear. **Cadernos FGV energia**, v. 3, n. 6, abr. 2016.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. **O futuro energético e a geração nuclear**. São Paulo: FGV, 2013.

GUIMARÃES, L. **Modelo de negócios para novas usinas nucleares**. 2015. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/352/352.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2016.

HARDISTY, P. E.; CLARK, T. S.; HYNES, R. G. Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: a comparative analysis of Australian energy sources. **Energies**, v. 5, n. 4, p. 872-897, 2012.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Urânio, reservas**. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao_id=48>. Acesso em: 24 maio 2016.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Perguntas frequentes**. Disponível em: <file:///C:/Users/Sandra/Documents/CINDES/Projects%202015/Energia%20nuclear/INB_-%20Perguntas%20frequentes.pdf>. Acesso em: 24 maio 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IEAE. **Climate change and nuclear power 2015**. 2015a. Disponível em: <<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10928/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2015>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IEAE. **Key world energy statistics**. 2015b. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IEAE. **Tracking clean energy progress 2013**. 2013. Disponível em: <<https://www.iea.org/etp/tracking2013/>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

KESSIDES, I. **Nuclear power and sustainable energy policy**: promises and perils. 2009. The World Bank research observer, v. 25, n. 2.

MARIGNAC, Y.; BESNARD, M. **L’option nucléaire contre le changement climatique**: risques associés, limites et frein aux alternatives. 2015. Disponível em: <<http://www.sortirdunucleaire.org/IMG/pdf/151027rapport-nucleaire-climat-2.pdf>>. Acesso em : 03 ago. 2016.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. **Capacidade instalada de geração elétrica**: Brasil e Mundo. 2014. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/0/Capacidade+Instalada+de+EE+2014.pdf/cb1d150d-0b52-4f65-a86b-b368ee715463>>. Acesso em: 11 maio 2016.

NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Projected costs of generating electricity**. 2015a. Disponível em: <<https://www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCost2015SUM.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology roadmap**. 2015b. Disponível em: <<https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapNuclearEnergy.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA. **Carbon pricing, power markets and the competitiveness of nuclear energy**. 2011. Disponível em: <<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2011/6982-carbon-pricing.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

NUCLEAR ENERGY INSTITUTE – NEI. **US electricity production costs and components**. 2015.

OECD-NEA. **Press room, economics of nuclear power FAQs**. Disponível: <<https://www.oecd-nea.org/news/press-kits/economics-FAQ.html#2>>. Acesso em: 5 maio 2016.

SOVACOOOL, B. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: a critical survey. **Energy policy**, n. 36, abr. 2008.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION - WNA. Global Nuclear Fuel Market Report. In: **WNA Report**. 2013.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION - WNA. Nuclear power economics and project structuring. In: **WNA Report**. 2012.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION - WNA. Comparison of life cycle GHG emissions of various electricity generation sources. In: **WNA Report**. 2011.

CNI

DIRETORIA DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS – DRI

Mônica Messenberg Guimarães
Diretora de Relações Institucionais

Gerência Executiva de Infraestrutura – GEINFRA

Wagner Ferreira Cardoso
Gerente-Executivo de Infraestrutura

Roberto Wagner Lima Pereira
Equipe Técnica

DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO – DIRCOM

Carlos Alberto Barreiros
Diretor de Comunicação

Gerência Executiva de Publicidade e Propaganda – GEXPP

Carla Gonçalves
Gerente-Executiva de Publicidade e Propaganda

Walner Pessoa
Produção Editorial

DIRETORIA DE SERVIÇOS CORPORATIVOS – DSC

Fernando Augusto Trivellato
Diretor de Serviços Corporativos

Área de Administração, Documentação e Informação – ADINF

Maurício Vasconcelos de Carvalho
Gerente-Executivo de Administração, Documentação e Informação

Gerência de Apoio Administrativo e Patrimônio – GEAAP

Helton Flávio de Camargos
Gerente de Apoio Administrativo e Patrimônio

Alberto Nemoto
Normalização

Sandra Polónia Rios
Pedro da Motta Veiga
Consultores



Confederação Nacional da Indústria

CNI. A FORÇA DO BRASIL INDÚSTRIA