

CADERNOS

FGV ENERGIA

ABRIL 2016 | ANO 3 | N° 6 | ISSN 2358-5277

ENERGIA NUCLEAR



ENERGIA NUCLEAR



DIRETOR

Carlos Otavio de Vasconcellos Quintella

EQUIPE TÉCNICA

Coordenação Editorial

Felipe Gonçalves

Autores

Felipe Gonçalves

Renata Hamilton de Ruiz

EQUIPE DE PRODUÇÃO

Coordenação Operacional

Simone Corrêa Lecques de Magalhães

Diagramação

Bruno Masello e Carlos Quintanilha

bruno@bmmaisdesign.com.br



PRIMEIRO PRESIDENTE FUNDADOR

Luiz Simões Lopes

PRESIDENTE

Carlos Ivan Simonsen Leal

VICE-PRESIDENTES

Sergio Franklin Quintella, Francisco Oswaldo Neves Dornelles e Marcos Cintra Cavalcanti de Albuquerque

CONSELHO DIRETOR

Presidente

Carlos Ivan Simonsen Leal

Vice-Presidentes

Sergio Franklin Quintella, Francisco Oswaldo Neves Dornelles e Marcos Cintra Cavalcanti de Albuquerque

Vogais

Armando Klabin, Carlos Alberto Pires de Carvalho e Albuquerque, Ernane Galvêas, José Luiz Miranda, Lindolpho de Carvalho Dias, Marcílio Marques Moreira e Roberto Paulo Cezar de Andrade

Suplentes

Antonio Monteiro de Castro Filho, Cristiano Buarque Franco Neto, Eduardo Baptista Vianna, Gilberto Duarte Prado, Jacob Palis Júnior, José Ermírio de Moraes Neto e Marcelo José Basílio de Souza Marinho.

CONSELHO CURADOR

Presidente

Carlos Alberto Lenz César Protásio

Vice-Presidente

João Alfredo Dias Lins (Klabin Irmãos e Cia)

Vogais - Alexandre Koch Torres de Assis, Angélica Moreira da Silva (Federação Brasileira de Bancos), Ary Oswaldo Mattos Filho (EDESP/FGV), Carlos Alberto Lenz Cesar Protásio, Carlos Moacyr Gomes de Almeida, Eduardo M. Krieger, Fernando Pinheiro e Fernando Bomfiglio (Souza Cruz S/A), Heitor Chagas de Oliveira, Jaques Wagner (Estado da Bahia), João Alfredo Dias Lins (Klabin Irmãos & Cia), Leonardo André Paixão (IRB – Brasil Resseguros S.A.), Luiz Chor (Chozil Engenharia Ltda.), Marcelo Serfaty, Marcio João de Andrade Fortes, Orlando dos Santos Marques (Publicis Brasil Comunicação Ltda.), Pedro Henrique Mariani Bittencourt (Banco BBM S.A.), Raul Calfat (Votorantim Participações S.A.),

Ronaldo Mendonça Vilela (Sindicato das Empresas de Seguros Privados, de Capitalização e de Resseguros no Estado do Rio de Janeiro e do Espírito Santo), Sandoval Carneiro Junior (DITV – Depto. Instituto de Tecnologia Vale) e Tarso Genro (Estado do Rio Grande do Sul).

Suplentes - Aldo Floris, José Carlos Schmidt Murta Ribeiro, Luiz Ildefonso Simões Lopes (Brookfield Brasil Ltda.), Luiz Roberto Nascimento Silva, Manoel Fernando Thompson Motta Filho, Roberto Castello Branco (Vale S.A.), Nilson Teixeira (Banco de Investimentos Crédit Suisse S.A.), Olavo Monteiro de Carvalho (Monteiro Aranha Participações S.A.), Patrick de Larragoiti Lucas (Sul América Companhia Nacional de Seguros), Rui Barreto (Café Solúvel Brasília S.A.), Sérgio Lins Andrade (Andrade Gutierrez S.A.) e Victório Carlos de Marchi (AMBEV).



DIRETORIA

Carlos Otavio de Vasconcellos Quintella

COORDENAÇÃO DE PESQUISA

Lavinia Hollanda

COORDENAÇÃO DE RELAÇÃO INSTITUCIONAL

Luiz Roberto Bezerra

COORDENAÇÃO DE ENSINO E P&D

Felipe Gonçalves

COORDENAÇÃO OPERACIONAL

Simone Corrêa Lecques de Magalhães

PESQUISADORES

Bruno Moreno R. de Freitas
Camilo Poppe de Figueiredo Muñoz
Mariana Weiss de Abreu
Michelle Bandarra
Mônica Coelho Varejão
Rafael da Costa Nogueira
Renata Hamilton de Ruiz

ESTAGIÁRIA

Júlia Febraro F. G. da Silva

AUXILIAR ADMINISTRATIVA

Ana Paula Raymundo da Silva

CONSULTOR

Paulo César Fernandes da Cunha

PRAIA DE BOTAFOGO, 190, RIO DE JANEIRO – RJ – CEP 22250-900 OU CAIXA POSTAL 62.591 – CEP 22257-970 – TEL: (21) 3799-5498 – WWW.FGV.BR

Instituição de caráter técnico-científico, educativo e filantrópico, criada em 20 de dezembro de 1944 como pessoa jurídica de direito privado, tem por finalidade atuar, de forma ampla, em todas as matérias de caráter científico, com ênfase no campo das ciências sociais: administração, direito e economia, contribuindo para o desenvolvimento econômico-social do país.

Prefácio

José Luiz Alquéres

A história do desenvolvimento e da utilização de energia nuclear no Brasil é uma história de altos e baixos. Eles nos permitiram, porém, um grande aprendizado e algumas lições.

A primeira lição é que a utilização de qualquer forma de energia – no caso da nuclear, mais ainda – é uma questão da sociedade. Não deve ser uma decisão de gabinetes, tampouco no amparo em obscuras “razões estratégicas” que se deveria encontrar respaldo para seu desenvolvimento. Trata-se de um tipo de energia que requer longo ciclo de construção, grandes investimentos e cuidados excepcionais na segurança. Mesmo após muitos anos da sua implantação, como vimos na Alemanha, ela pode ser descontinuada por fatores político-emocionais. Por isso, a necessidade de ter a opinião pública apoiando-a, evidentemente após discussão ampla de vantagens e desvantagens de sua adoção. Isto não ocorreu no Brasil, nem na maioria dos países que a exploram – o que explica a sarcástica conclusão de matéria especial da *The Economist* recentemente publicada: “...a energia nuclear parece estar fadada a ser implantada apenas em países autoritários e não democráticos”.

A segunda lição é que suas instalações não devem se localizar próximas a grandes e médias aglomerações de pessoas, como Angra dos Reis, por exemplo. A alegada ‘vantagem’, redução de perdas

na transmissão da energia, deixou de ser considerada após a tragédia de Fukushima. Em minha visão, devem ser instaladas em concentrações de 6 a 10 usinas, em áreas que se desmembre das atuais unidades da federação e se constituam em territórios nacionais, protegidos pelos mais rigorosos códigos de segurança por nossas forças armadas.

A terceira lição é que a mineração do urânio e a construção e operação das usinas devem ser abertas a investidores nacionais ou estrangeiros, restringindo-se o monopólio federal ao chamado ‘ciclo do combustível’ e à propriedade e armazenamento dos rejeitos.

A quarta lição – e constatação – é que o histórico brasileiro na construção, operação, treinamento de pessoal e gestão de segurança é excelente. Nós fomos capazes de recuperar Angra 1, a antiga “usina vagalume”, de tecnologia Westinghouse, transformando-a numa eficiente unidade. Na mesma linha, verificou-se que Angra 2 – a primeira do acordo Brasil-Alemanha – destacou-se muitos anos no ranking mundial de confiabilidade. É reconhecido também que sabemos treinar profissionais de altíssima qualidade. Tais esforços e características parecem meio perdidos ou esquecidos hoje, mas é certo que SIM, nós somos capazes!

Aqui neste breve introito ao Caderno Especial da FGV Energia que discute o tema com profundidade

e marcará o ponto-de-situação da energia nuclear no Brasil, entendo que o quinto e último tópico deve destacar a importância de, chegado o momento certo, tomarmos decisões em vez de adiá-las.

Muitos dos problemas da energia nuclear entre nós vieram das idas e vindas, postergações, suspensões por ação da justiça (às vezes desconsiderando fatores técnicos), descontinuidade de recursos financeiros, além de outros fatores, que fizeram com que obras de 4 ou 5 anos de duração se estendessem por mais de 30 anos.

Analisados os fatores pertinentes e discutidos prós e contras no Congresso Nacional, em meados de 1994, quando ocupei a presidência da Eletrobras e de seu Conselho de Administração, me deparei com a peculiar situação de Angra 2: após anos de interrupção nas obras, finalmente os entraves que impediam sua conclusão haviam sido resolvidos.

Com efeito, contrariando a lição vista acima, que entende ser melhor instalar usinas nucleares em pontos de reduzida densidade urbana, se tinha a obra de Angra 2 alocada em região que crescerá sem o devido planejamento nos quase quinze anos em que as obras estiveram paradas.

De todo modo, foram feitos novos investimentos em medidas especiais de alarmes, ampliação da capa-

cidade de escoamento pelas rodovias e estratégias de operação mais seguras – o que proporcionava a tranquilidade necessária para autorizar a continuidade da obra, “salvando” assim os bilhões de recursos já investidos e não oferecendo riscos para a população.

Estávamos no ínterim entre os meses finais do cargo de um presidente da República e a posse do novo presidente eleito. A tendência era que o tema ficasse em suspenso até que o novo governo decidisse retomá-lo – o poderia levar tempo. Havia, entretanto, um contexto de demanda crescente de energia (que, de fato, elevou-se muito com o sucesso do Plano Real, como se verificou posteriormente). Diante deste quadro, entendi ser pertinente – no que fui autorizado pelo Conselho de Administração da empresa – o envio de um Ofício da Eletrobras para Furnas autorizando a remobilização do canteiro e a retomada imediata das obras. Naturalmente, em sintonia com o Dr. Ronaldo Fabrício, Presidente daquela grande empresa.

A obra não foi mais interrompida e hoje, além de ser uma fundamental geradora do nosso sistema, atinge o grau máximo de desempenho em unidades do tipo, em acordo com parâmetros definidos e avaliados pela WANO (World Association of Nuclear Operators) – um atestado da capacidade técnica brasileira na área nuclear.

José Luiz Alquéres – Desempenhou ou desempenha funções de Conselheiro de Administração. Presidente ou Diretor de grandes empresas como Eletrobrás, Light, MDU Brasil, EDP, Angra Partners, Cia. Bozano Simonsen, ALSTOM, Signatura Lazard-Freres, Banco Credit Lyonnais, Rio Bravo, CEMIG e outras. Presidiu a ACRJ (Associação Comercial do Rio de Janeiro). Foi Secretário Nacional de Energia e Diretor do BNDESPAR. É Vice-Presidente Honorário do Conselho Mundial de Energia e atuante na área de filantropia.



Prólogo

Leonam dos Santos Guimarães

Hoje no mundo existem 67 usinas nucleares em construção: 23 na China, 9 na Rússia, 6 na Índia, 5 nos EUA, 4 na Coreia do Sul, 4 nos Emirados Árabes Unidos, 2 no Japão, 2 na Belarus, 2 na Ucrânia, 2 no Paquistão, 2 na Eslováquia, 2 em Taiwan, 1 na Argentina, 1 na Finlândia, 1 na França e 1 no Brasil. Recentemente o Reino Unido lançou a construção de mais 2 usinas. A potência dessas novas unidades representa 18% de acréscimo à potência instalada das 439 usinas em operação, que atualmente geram 12% da eletricidade produzida no mundo. Nos últimos 10 anos, 45 novas usinas entraram em operação. Isso demonstra a competitividade da geração nuclear em termos de custos de produção. Entretanto, duas razões explicam por que o número de usinas nucleares em construção não é bem maior: custos de construção e aceitação pública. Há, contudo, uma ligação importante entre essas duas causas.

A aceitação pública não constitui impedimento para novos empreendimentos em muitos importantes países, como o número de usinas em construção demonstra. O maior problema é o custo crescente de investimento de capital e as dificuldades de estruturar projetos para financiar esses investimentos de longo prazo de maturação. Contudo, os números mostram que se abriu

uma distância entre esses custos no Ocidente e no Oriente, onde se concentram a maioria das novas construções. Há formas que permitem que essa distância seja diminuída e que questões relativas à competitividade da energia nuclear sejam tratadas. Entretanto, as questões que envolvem a aceitação pública são pelo menos em parte responsáveis pelo problema subjacente dos custos de construção no mundo ocidental.

Se Fukushima impôs mais obstáculos para a aceitação pública e, portanto, também aos custos da geração, o que a indústria nuclear pode fazer a esse respeito? O primeiro ponto a assinalar é que a opinião pública e o nível de apoio político para a energia nuclear é basicamente local. Há diferenças importantes de país para país, mas sabemos que mesmo dentro de países onde há significativa aceitação da energia nuclear, ela varia consideravelmente segundo a região. Sabemos também que, mesmo em países onde há um forte sentimento antinuclear, há importante aceitação nas regiões que estão ao redor das instalações nucleares.

Seria equivocado concluir que o apoio à energia nuclear nessas regiões decorra exclusivamente dos empregos associados a essas insta-

lações. A familiaridade com a tecnologia e as próprias usinas, aceitas simplesmente como parte da vida cotidiana na região, é muito mais importante. Esta é a razão fundamental pela qual a energia nuclear não consegue aceitação pública em outros lugares. A sua distância da sociedade em geral leva ao desentendimento e à susceptibilidade às imagens negativas difundidas com tanto êxito pelos antinucleares.

Este Caderno de Energia Nuclear, lançado pela FGV Energia, constitui uma grande contribuição a um melhor entendimento, pela sociedade, do importante papel que a geração elétrica nuclear tem a desempenhar no mundo, e também no Brasil. Nele são apresentadas as razões pelas quais a opção nuclear faz parte da solução para o desafio mundial da transição energética, necessária ao enfrentamento das mudanças climáticas, e do desafio nacional da transição hidrotérmica do sistema elétrico brasileiro no sé-

culo XXI. A tecnologia nuclear e seus riscos são discutidos, bem como é feita uma visão panorâmica da energia nuclear no mundo. São ainda feitas considerações sobre modelo de negócio para a expansão da geração nuclear no Brasil, propondo aperfeiçoamentos a serem considerados para estruturação de projetos futuros.

O Caderno propicia um melhor entendimento das diversas facetas do problema do futuro energético e geração nuclear pelos leitores leigos no tema, mas também é uma fonte de informações de grande utilidade para aqueles que, de alguma forma, já possuem algum envolvimento nesse setor industrial. Esse entendimento contribui significativamente para a aceitação pública e, conseqüentemente, redução dos custos, da nucleoeletricidade, de forma a permitir sua expansão a níveis compatíveis com as necessidades de descarbonização da matriz energética mundial.

Leonam dos Santos Guimarães – Doutor em Engenharia Naval e Oceânica pela USP e Mestre em Engenharia Nuclear pela Universidade de Paris XI, é Diretor de Planejamento, Gestão e Meio Ambiente da Eletrobrás Eletronuclear, membro do Grupo Permanente de Assessoria em Energia Nuclear do Diretor-Geral da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, membro do Conselho de Representantes da World Nuclear Association – WNA, membro no Conselho Empresarial de Energia Elétrica da FIRJAN/CIRJ e Vice-Presidente da Seção Latino Americana da Sociedade Nuclear Americana. Foi Diretor Técnico-Comercial da Amazônia Azul Tecnologias de Defesa SA – AMAZUL, Assistente da Presidência da Eletrobrás Eletronuclear e Coordenador do Programa de Propulsão Nuclear do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP.



Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer pela colaboração de todos os profissionais do setor nuclear que nos ajudaram a elaborar este caderno. Este trabalho se tornou possível graças à contribuição e ao apoio daqueles que nos disponibilizaram seu tempo para conversas e entrevistas, nas quais compartilharam conosco visões, conhecimento e experiências no setor. Em nome da FGV Energia, agradecemos a Antonio Barroso, Antonio Müller, Carlos Leipner, Drausio Atalla, João Moreira, João Roberto de Mattos, José Luiz Alquéres, Leonam dos Santos Guimarães, Marcio Zimmermann, Otavio Mielnik, Paulo Berquó, Roberto Travassos, Ronaldo Fabrício, Thiago Almeida e Werner Stratmann e outros profissionais que também se fizeram presentes durante a elaboração deste caderno.

Aproveitamos para expressar nosso carinho e gratidão aos nossos colegas da FGV Energia que, através de trocas diárias de conhecimento, nos ajudaram a ter uma visão mais completa e multidisciplinar sobre o setor nuclear.

RENATA HAMILTON DE RUIZ

Pesquisadora FGV Energia

FELIPE GONÇALVES

Coordenador de Ensino e P&D

Índice

11

POR QUE FALAR DA ENERGIA NUCLEAR?

23

A TECNOLOGIA NUCLEAR

37

SEGURANÇA E CONFIABILIDADE

47

ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

57

PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

68

MODELO DE NEGÓCIO PARA
A GERAÇÃO NUCLEAR NO BRASIL

74

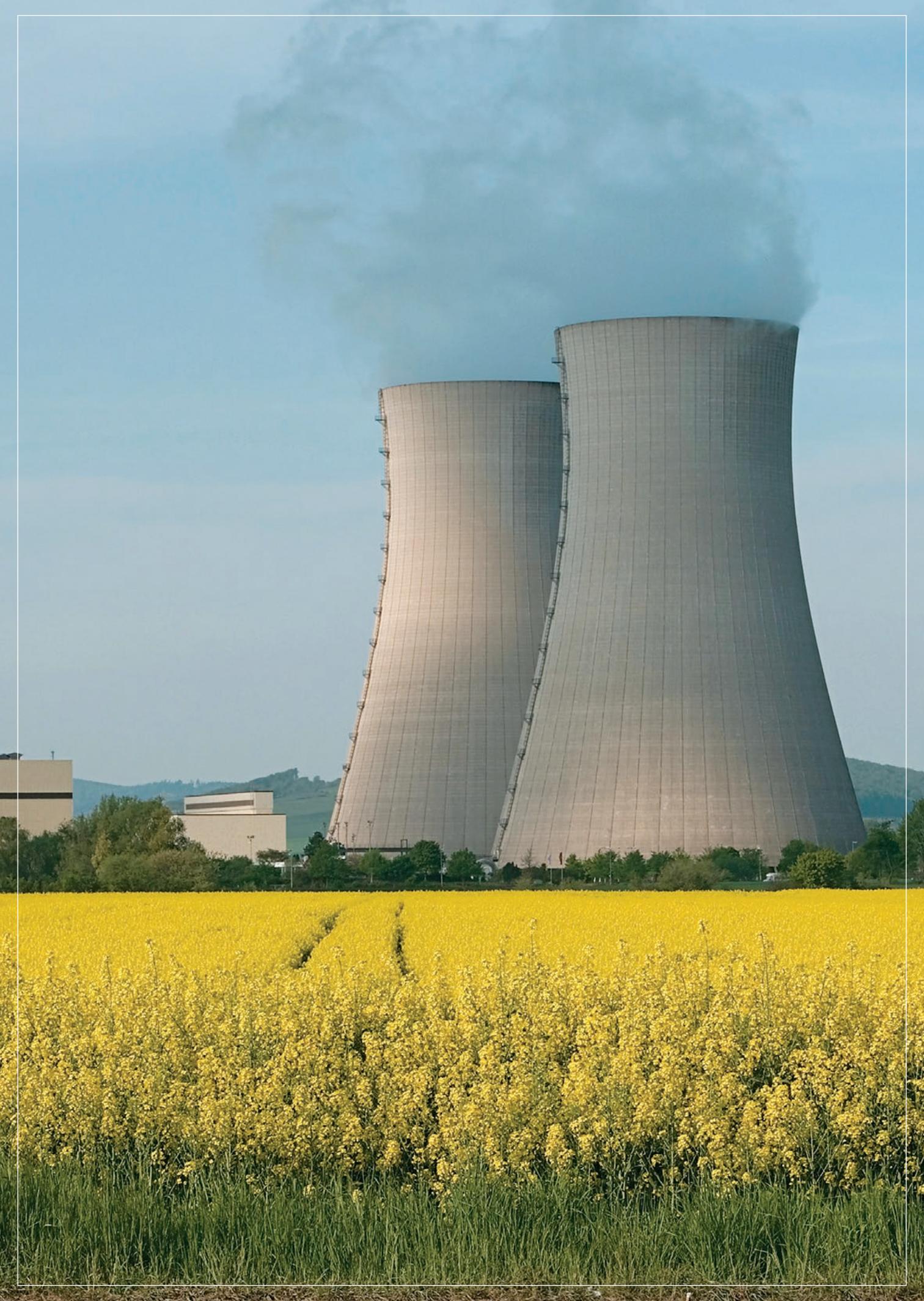
CONSIDERAÇÕES FINAIS

76

LISTA DE SIGLAS

78

BIBLIOGRAFIA



Por que falar da Energia Nuclear?

Passados cinco anos do maior terremoto registrado na história do Japão, que levou a uma sucessão de eventos culminando na fusão parcial dos núcleos dos reatores da usina de Fukushima, é possível se distanciar de visões emocionais e trazer ao debate os desafios e oportunidades da participação da energia nuclear na composição da matriz elétrica brasileira.

Apesar do sentimento de insegurança comumente associado à energia nuclear, esta é a **quarta maior fonte geradora de eletricidade do mundo**, atrás do carvão, do gás natural e da hidroeletricidade [1]. Temos hoje 442 reatores nucleares gerando energia em 30 países e 66 novos reatores em construção, notadamente em países como China, EUA, Rússia e membros da União Europeia [2].

O Brasil é um dos poucos países que domina o ciclo do combustível nuclear e ao mesmo tempo possui uma das maiores reservas de urânio do mundo [3]. Apesar disso, essa indústria tem se

desenvolvido a passos lentos no país em meio a um planejamento energético focado na expansão de fontes renováveis e devido à falta de conhecimento da sociedade quanto aos reais riscos e benefícios associados à energia nuclear, além de entraves regulatórios que dificultam a participação da iniciativa privada no financiamento de novas usinas.

Pessoas que vivem em áreas próximas de usinas nucleares tendem a ser mais favoráveis a essa fonte, pois recebem mais informações a respeito do funcionamento, operação e segurança das usinas [4]. Assim, apresentar a energia

Estima-se que entre 2002 e 2017 o Sistema Interligado Nacional (SIN) deve reduzir a capacidade de regularização do estoque de energia de 6,5 para 4,7 meses.

nuclear de forma isenta se torna o objetivo principal deste caderno da **FGV Energia**, esclarecendo à sociedade quanto a oportunidades e riscos desta fonte, bem como pontuando os desafios e potenciais para expansão da indústria nuclear no Brasil.

As análises e levantamentos aqui apresentados se deram por meio de pesquisa técnica bibliográfica e com base na opinião de diferentes especialistas, selecionados para que fossem representadas visões distintas do setor.

O NOVO PARADIGMA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

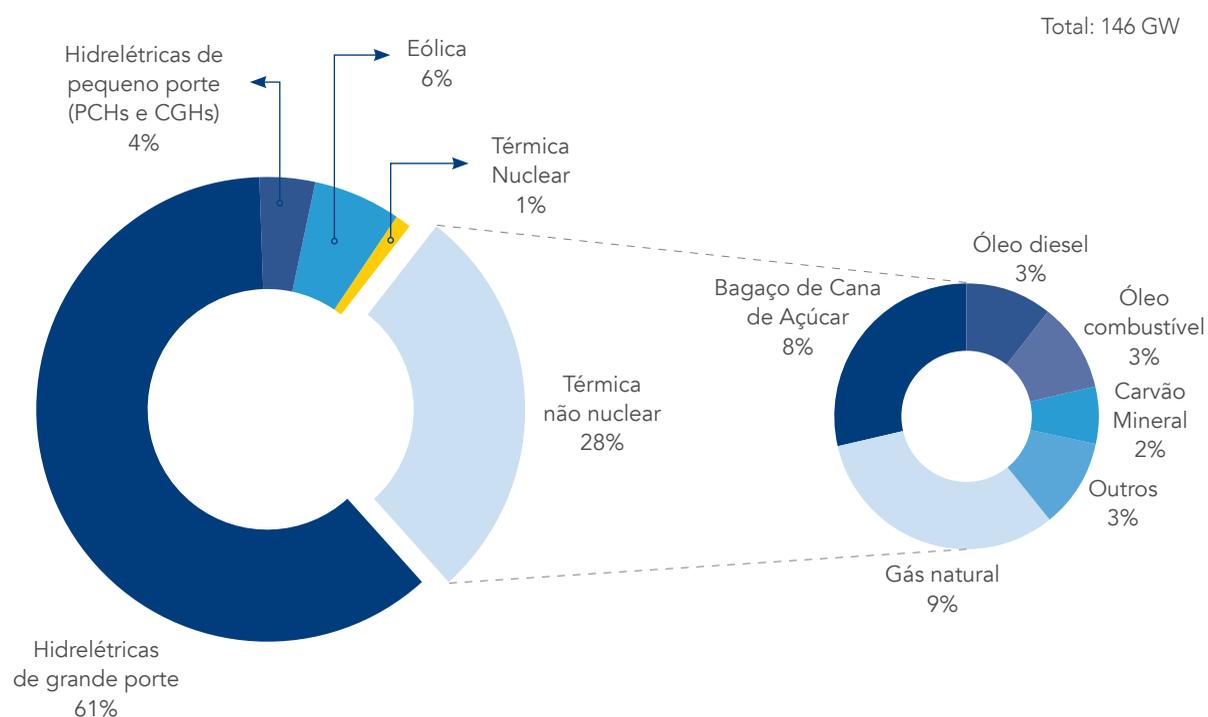
O sistema elétrico brasileiro apresenta parque gerador predominantemente hídrico e, para garantir o atendimento contínuo da demanda, depende de usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização, para que as afluições do

período úmido possam ser armazenadas e utilizadas na geração de energia no período seco.

O Brasil possui uma capacidade instalada total de 146 GW [5], dos quais mais de 60% correspondem a usinas hidrelétricas de grande porte¹. Contudo, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) aponta que, desde o final da década de 1990, não entraram em operação novas hidrelétricas com reservatórios de regularização plurianual [6]. Estima-se que entre 2002 e 2017 o Sistema Interligado Nacional (SIN) deve reduzir a capacidade de regularização do estoque de energia de 6,5 para 4,7 meses [7]. Segundo o Plano da Operação Energética (PEN) do ONS 2014, a perda gradativa da capacidade de regularização das usinas hidrelétricas do SIN, frente ao crescimento da carga, tem impactado os resultados de métricas normalmente utilizadas no planejamento da operação energética, como riscos de déficit, valor esperado da energia não-suprida e custos marginais de operação [6].

1. Aquelas com capacidade instalada maior do que 30MW e área do reservatório maior que 3 km².

FIGURA 1: CAPACIDADE INSTALADA DO BRASIL (EM FEV/2016).



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BIG/ANEEL

O potencial hídrico brasileiro total é da ordem de 250 GW, dos quais 92 GW estão em operação. Do potencial disponível para exploração, 63% se encontra na região Norte [8], cuja topografia plana dificulta a construção de grandes reservatórios, os rios apresentam grande variabili-

dade de vazão entre os períodos secos e úmidos e a regulação socioambiental apresenta fortes restrições ao uso do solo. Com isso, o incremento da geração hídrica se dará, prioritariamente por usinas a fio d'água². Não obstante, destaca-se o significativo incremento de fontes alternati-

2. Usinas hidrelétricas sem reservatório de regularização [58].

vas, como a solar e a eólica, que têm o ônus de sua intermitência. O Plano Decenal de Expansão (PDE) 2024 prevê que a capacidade instalada de usinas eólicas deve alcançar 24.000 MW enquanto a energia solar chegará a 7.000 MW até 2024, quando deverão atingir, respectivamente, participação de 11,6% e 3,3% na capacidade instalada total [9].

As térmicas no Brasil – com exceção das duas usinas nucleares de Angra – cumprem um papel complementar, ou seja, foram contratadas para suprir prioritariamente demandas de energia no período seco, em média 4 meses por ano. Por se tratarem de usinas planejadas para operar fora da base, o acionamento destas acima do planejado eleva sobremaneira o Custo Marginal de Operação (CMO) do SIN.

A crise hídrica de 2013 fez com que as usinas térmicas operem ininterruptamente, o que, além de impactar na modicidade tarifária, aumentou os custos com manutenção e operação para os agentes, e diminuiu a confiabilidade dos equipamentos. A geração térmica quase quadruplicou em 3 anos e, em junho de 2015, mais de 30% de toda a energia gerada no Brasil foi proveniente de fontes térmicas³ [10].

A falta de uma estratégia energética de longo prazo fortalece a estrutura existente e prioriza apenas a geração complementar à hidroeletri-

cidade, o que compromete a diversidade energética. De fato, a política energética deveria ter aspectos antecedentes (relacionados a estratégias gerais de médio e longo prazo) e aspectos de gestão imediata (relacionados com a condução da política econômica e da política social do governo) [11].

Visto que a evolução da matriz de energia elétrica deverá manter a tendência de expansão da hidroeletricidade com baixa ou nenhuma regularização plurianual e a entrada crescente de fontes intermitentes, a política energética de longo prazo ainda deverá se ocupar da análise da diversidade de fontes térmicas disponíveis para garantir a segurança do suprimento. Atualmente, 27% das térmicas brasileiras usam como combustível o bagaço da cana de açúcar, que é uma fonte renovável impactada pela sazonalidade das safras. Outros 32% do potencial térmico são movidos a gás natural, cujo consumo nos próximos anos tende a crescer, apesar de a produção nacional não ser ainda capaz de atender à demanda.

Nesse contexto, a **geração nuclear pode desempenhar importante papel, por se tratar de uma fonte térmica barata e capaz de operar na base, permitindo que os reservatórios das hidrelétricas exerçam como principal função a regulação das fontes renováveis intermitentes.**

3. Segundo dados da CCEE, a geração térmica em janeiro de 2012 foi de 4.252 MW médios, e subiu a 15.771 MW médios em janeiro de 2015. Em junho de 2012 a geração térmica representou apenas 14% do total gerado.

A energia nuclear tem grande potencial para garantir não só **segurança energética**, mas também **segurança econômica** (custos competitivos e disponibilidade de combustível a longo prazo) e **segurança ambiental** – uma vez que os combustíveis fósseis ainda são os grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera.

Outro ponto relevante está no custo associado à expansão do sistema de transmissão, pelo fato do potencial de geração através das fon-

tes renováveis ser distante dos centros de carga. Nesse sentido, o PEN 2014 observa que a continuidade da expansão da transmissão, em especial nas interligações regionais, se apresenta como de fundamental importância, permitindo a importação e exportação de grandes blocos de energia entre regiões. As linhas de transmissão do SIN, que hoje possuem mais de 125mil km de extensão, têm um alto custo de instalação e manutenção e acabam aumentando o custo final da tarifa de energia elétrica para o consumidor⁴.

Fatores de Capacidade

O Fator de Capacidade é a razão entre a energia de fato produzida por uma usina e sua capacidade nominal de produção. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) [12], o fator de capacidade médio das usinas hidráulicas do Brasil vem caindo nos últimos anos: de 57% em 2012, para 52% em 2013 e 49% em 2014. O fator de capacidade das eólicas em 2014 foi de 38%, enquanto o fator de capacidade das usinas nucleares de Angra 1 e 2 ficou em 88% no mesmo ano. Isso significa que, no Brasil, uma usina nuclear gera mais que o dobro de energia do que uma eólica com a mesma capacidade instalada. Além disso, a energia gerada por uma usina nuclear raras vezes sofre com flutuações imprevisíveis e, por isso, tem capacidade de fornecer **energia de base**, que deve ser contínua, barata e de alta confiabilidade.

4. Os custos das instalações do SIN são remunerados por meio da Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão (TUST), cobrada de todos os usuários da rede básica.

As fontes intermitentes ainda apresentam outros desafios técnicos para a operação do SIN, pois podem levar a um aumento das variações de frequência durante perturbações, excedendo limites seguros. Com isso, será necessária a adequação das estratégias e práticas de controle adotadas na operação do sistema de transmissão.

Conforme apresentado, observa-se um novo paradigma do SIN, para o qual deverão ser feitos ajustes nos modelos de operação e controle, mas também do processo de planejamento da expansão, onde a escolha das tecnologias considere de forma conjunta custos e riscos da futura composição da matriz.

DEMANDA ENERGÉTICA NO BRASIL PARA OS PRÓXIMOS ANOS

O consumo total de energia tem sofrido uma redução influenciada pelo aumento das tarifas (reajustes ordinários, extraordinários e bandeiras tarifárias) e pelo enfraquecimento da economia – o consumo industrial em 2015 teve uma redução de 4,8% com relação a 2014 [13]. Esses resultados levaram a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a revisar suas projeções. As expectativas para os próximos anos foram reduzidas, mas mesmo com redução de 1,8% no consumo total de eletricidade em 2015 [13], foi estimado um crescimento médio de 4,3% ao ano para o quadriênio 2016-2020 [14].



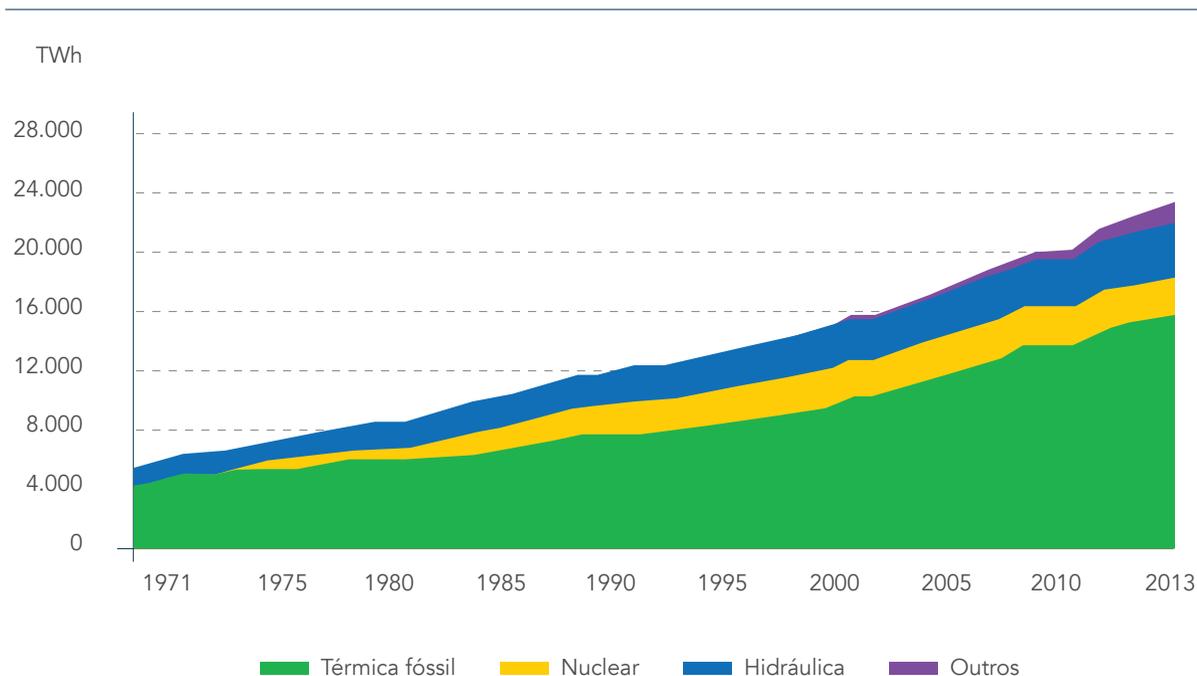
No horizonte de 2050 [15], a previsão da EPE é de que o consumo mais do que triplique, chegando a 197 MW médios em 2050, o que representa um crescimento médio de 3,1% ao ano. Essa é considerada uma previsão otimista, pois leva em consideração que o país terá um crescimento econômico superior à projeção global, atingindo um aumento médio anual do PIB entre 3,6% e 4,0% no período 2013-2050. Esta estimativa considera o desenvolvimento de programas de eficiência energética, geração renovável distribuída, gerenciamento de demanda e armazenamento. Assim, faz-se necessário que a eletricidade fornecida para os consumidores através da rede seja confiável e barata, e possa fornecer energia sempre que for preciso – como em caso de baixa geração renovável, por exemplo. Outro fator a se considerar é o aumento da frota de carros elétricos e híbridos, que deverá representar 60% da frota nacional, estimada em 130 milhões de veículos no ano de 2050. Além disso, deve-se esperar uma expansão da malha de transportes públicos, como o metrô e trens urbanos, também movidos a ele-

tricidade. Para garantir que veículos elétricos representem um impacto menor ao meio ambiente do que os movidos a combustão interna, é preciso que a matriz elétrica seja limpa e não dependente de combustíveis fósseis.

Para favorecer a retomada do crescimento econômico e da produção industrial do país, deve-se garantir o fornecimento de energia confiável e barata. No ano de 2013, 78% de toda eletricidade gerada no mundo foi proveniente de fontes térmicas [16], que possuem essas duas características. Com as tecnologias atuais e o modelo de operação do setor elétrico no país, ainda não é possível depender inteiramente de fontes renováveis, o que foi demonstrado com a crise hídrica pela qual passou o Brasil. Uma geração térmica de base poderia ajudar a controlar os níveis dos reservatórios hidráulicos, mantendo-os sempre acima dos níveis de segurança⁵. **Das fontes térmicas capazes de operar na base, a única capaz de garantir o fornecimento de energia constante sem emitir GEE é a fonte nuclear.**

5. Isto também favoreceria os usos múltiplos da água – consumo humano, geração elétrica, saneamento, irrigação, navegação, etc – evitando cortes no fornecimento de água para a população, como aconteceu em algumas cidades no estado de SP durante a crise hídrica.

FIGURA 2: GERAÇÃO MUNDIAL DE ELETRICIDADE POR FONTE (1971-2013)



Fonte: IEA, 2015 [16]

Obs: Outros incluem energia geotérmica, solar, eólica.

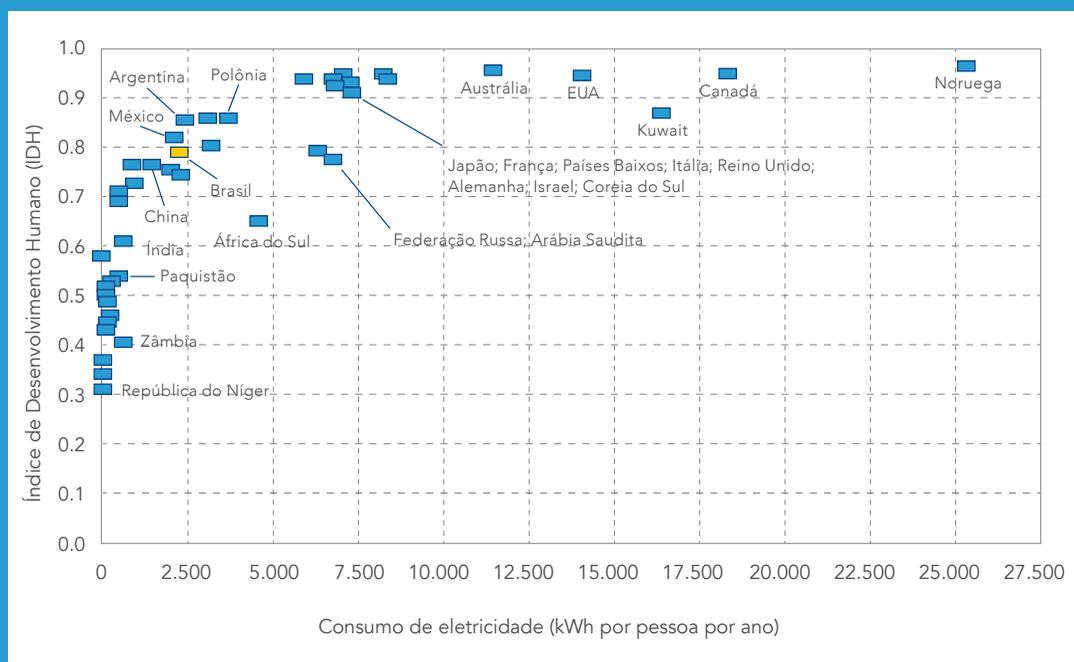
Consumo de Energia Per Capita e Desenvolvimento

A qualidade de vida está intimamente relacionada com o consumo de energia, especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento de um país [17]. Um maior consumo per capita de energia é um indicador da disponibilidade de serviços essenciais à população, como tratamento de esgoto, tratamento de resíduos, hospitais, etc. Existem, portanto, indícios de uma relação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de eletricidade per capita. Segundo levantamento do MME [18], economias pouco desenvolvidas apresentam menor consumo per capita de eletricidade e maior participação de renováveis na matriz energética.

No Brasil, a desigualdade social ainda é forte. A região Sudeste, por exemplo, tem um consumo de energia per capita maior do que o dobro da região Nordeste, o que significa dizer que a população na região Nordeste tem menos acesso a serviços básicos. Mesmo no Sudeste, a região com maior consumo do país, o consumo per capita em 2013 foi de 2.900 kWh [19], ainda muito abaixo dos 4.000 kWh por pessoa por ano considerado como a linha divisória entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento.

Apenas com acesso à energia pode-se viabilizar melhorias na expectativa de vida, escolaridade e renda da população. A disponibilidade de energia elétrica é um pré-requisito para esta melhoria, não uma consequência [17].

FIGURA 3: RELAÇÃO ENTRE O IDH E O CONSUMO DE ELETRICIDADE PER CAPITA (2004)



Fonte: InterAcademy Council, 2007 [20]

CUSTOS NIVELADOS DE ENERGIA

Projetos de usinas nucleares são característicos pelo elevado volume de capital aplicado na etapa de construção, compensado por baixos custos de operação e um longo período de vida útil – cerca de 60 anos para os novos modelos de reatores. Essa compensação faz a tecnologia nuclear ter um custo nivelado competitivo quando comparada a outras tecnologias para geração de energia na base.

O **custo nivelado de eletricidade** (LCOE, na sigla em inglês) dá um valor mais próximo ao custo real por kWh da construção e da operação da usina ao longo de todo o seu ciclo de vida, representando a receita média requerida, por unidade de energia gerada, para que os investimentos em construção, operação, manutenção e custos de capital sejam recuperados. Circunstâncias específicas de cada país influenciam o cálculo do LCOE, como o acesso a combustíveis, a disponibilidade de recursos e regulações de mercado. Todavia, o LCOE não distingue a natureza da oferta de energia, isto é, não leva em conta se a tecnologia é despachável ou não⁶. A oferta de uma tecnologia não estocável e dependente de fatores climáticos não possui o mesmo

valor para o sistema de outra que pode ser despachada a qualquer momento. Visando comparar os custos de tecnologias despacháveis e não despacháveis, foi elaborado pela EIA (*US Energy Information Administration*) o **custo evitado nivelado de eletricidade** (LACE, na sigla em inglês), uma medida do que custaria ao sistema atender à carga se não pudesse contar com a contribuição da energia produzida pelo projeto avaliado. Ou seja, a ausência da fonte em questão iria acarretar em maiores custos ao demandar o despacho de fontes mais caras [11] [21] [22].

A comparação do LCOE (custo) com o LACE (benefício) permite verificar se os custos de projeto excedem ou não suas vantagens. Segundo estimativas da EIA [21] para diferentes fontes nos EUA, a **nuclear apresenta um custo médio de US\$ 23,2 por MWh, menor do que térmicas a carvão, térmicas a gás natural com captura de carbono e solar fotovoltaica**. Este tipo de cálculo deveria ser adaptado para as condições brasileiras, de modo que os órgãos responsáveis pelo planejamento do setor energético pudessem ter uma visão mais abrangente sobre as diferentes fontes, lembrando que a principal vantagem da energia nuclear é a geração limpa despachável, sem competir com fontes renováveis.

6. Uma tecnologia é despachável quando pode ser acionada no momento em que o operador do sistema requisitar [58].

TABELA 1: DIFERENÇA ESTIMADA ENTRE LCOE E LACE DE FONTES NOS EUA EM 2020 (DÓLARES/MWh)

Natureza	Fonte	LCOE médio	LACE médio	Custo final
Despachável	Carvão convencional	95,01	70,09	24,01
	Carvão com captura de carbono	144,04	71,00	73,04
	Gás natural com ciclo combinado	75,02	71,04	3,08
	Gás natural com ciclo combinado e captura de carbono	100,02	71,04	28,08
	Nuclear	95,02	72,01	23,02
Não despachável	Eólica	73,06	64,06	9,00
	Solar Fotovoltaica	114,03	80,04	33,09

Fonte: Adaptado de EIA/2015 [21].

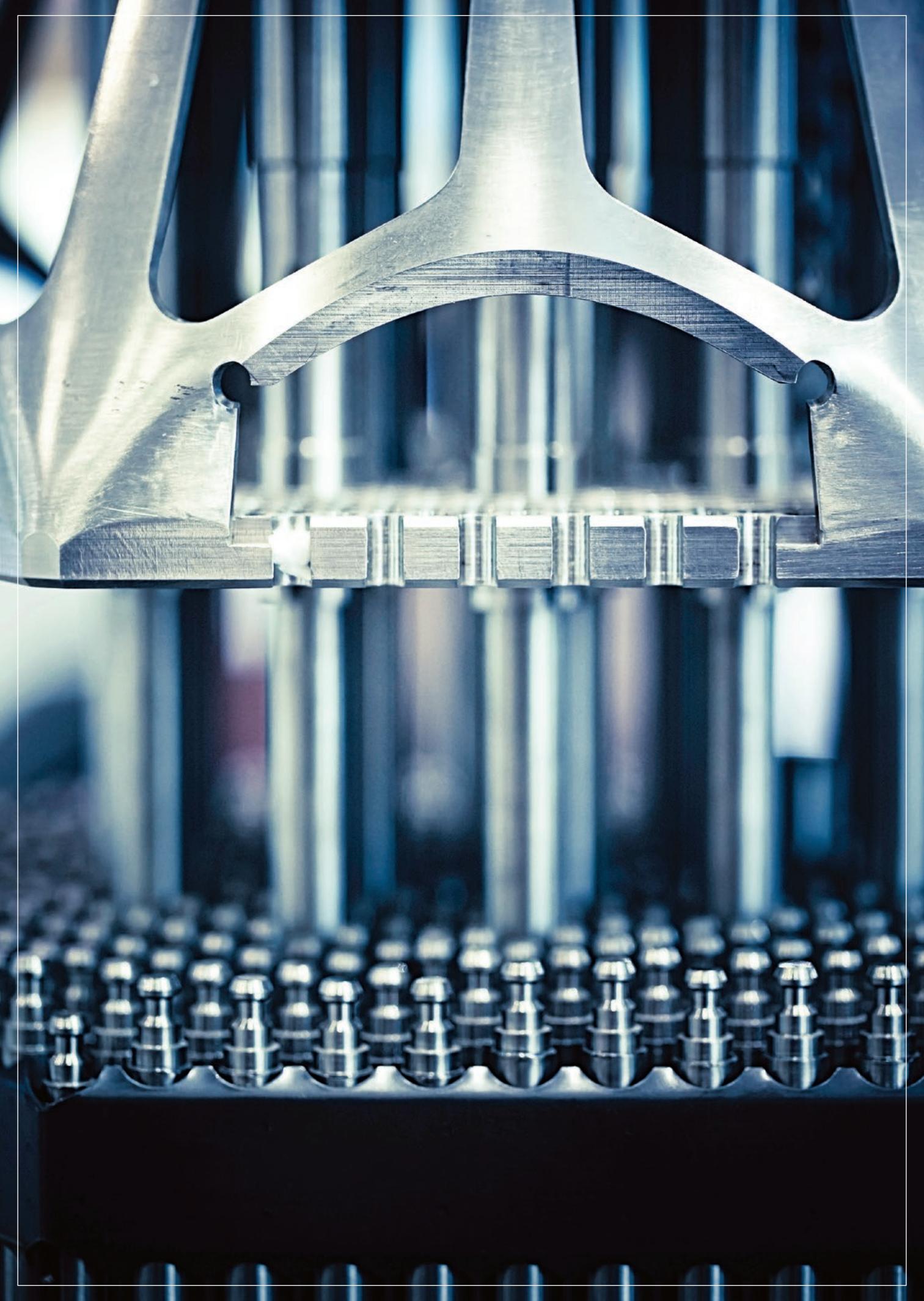
A COP21 E O PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NAS METAS GLOBAIS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES

Os acordos assinados em Paris, na COP21 (21ª Conferência da ONU sobre Mudança Climática) não definiram tipos de tecnologias de baixo carbono específicas para geração de energia. Estas foram descritas em termos de sua prontidão para adoção por diversos países. Por seu nível de maturidade, entre outros aspectos técnicos, a tecnologia nuclear se apresenta com forte potencial para assumir um papel de relevância nas matrizes elétricas que buscam altas taxas de redução de emissões de GEE.

Estando a energia nuclear apenas atrás das fontes hidráulica e eólica no quesito emissões evitadas de carbono [23] [24], esta foi incluída

por alguns países no seu portfólio de tecnologias aplicadas para mitigação do aquecimento global: Argentina, China, Índia, Turquia, entre outros. O Brasil ficou no grupo dos países que não apresentaram quais seriam as tecnologias específicas, indicando apenas sua prioridade para fontes renováveis e tecnologias de baixo carbono.

No entanto, é preciso estar atento à contrapartida necessária ao benefício de redução de emissões da energia nuclear. As usinas nucleares são intensivas em capital e tem apresentado custos de instalação crescentes ao longo dos anos, decorrentes da necessidade de ampliar seus mecanismos de segurança e controle, ao mesmo tempo em que o mundo presencia a redução de custos de energias renováveis e aumento de sua flexibilidade e despachabilidade.



A Tecnologia Nuclear

O funcionamento de uma usina nuclear pode ser comparado ao de uma usina térmica convencional, onde uma fonte de calor transforma a água em vapor que, em alta pressão, faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. A principal diferença entre térmicas convencionais e nucleares é a fonte de calor. Nas convencionais, o calor provém da queima de um combustível – carvão, gás natural, óleo diesel, biomassa, entre outros – enquanto em uma usina nuclear o calor é obtido por meio de uma reação de fissão⁷.

Ambos os processos produzem resíduos com potencial de causar impactos ao meio ambiente. No caso das térmicas convencionais, cujas tecnologias de captura ainda apresentam custos elevados, são emitidos gases⁸ e materiais

particulados. Já o subproduto das reações de fissão é um conjunto de materiais radioativos, os quais podem ser reprocessados ou armazenados por longos períodos, até que haja decaimento da radioatividade.

-
7. A fissão é o processo de quebra dos núcleos de átomos fisséis (átomos instáveis que se rompem com facilidade) após serem atingidos por nêutrons em alta velocidade. Libera grandes quantidades de energia na forma de calor.
8. O processo de geração de calor de usinas térmicas é responsável pelo lançamento de gases como: dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NOx) na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e a ocorrência de chuvas ácidas.

Outras Aplicações de Materiais Radioativos

Os materiais radioativos não são necessariamente prejudiciais aos seres humanos. Eles cumprem uma série de outras funções além da geração de energia, e têm uso na **medicina, agricultura e indústria**. Os radioisótopos⁹ são usados na esterilização de equipamentos e como marcadores radioativos na detecção de poluentes dispersos no meio ambiente. Na medicina, várias condições são diagnosticadas e tratadas utilizando materiais radioativos. Os raios X são uma forma de radiação eletromagnética e, em outros exames, pequenas doses de radioisótopos são usadas nos pacientes como contrastes, facilitando a identificação de tumores. A radioterapia, usada no tratamento do câncer, também utiliza isótopos radioativos. Na agricultura, os radioisótopos são usados no controle de pragas, ajudando na esterilização de insetos, técnica que está sendo estudada pela Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) e pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) para ser usado no **controle do mosquito *Aedes aegypti*** no Brasil. A radiação também é usada na preservação de alimentos evitando a proliferação de fungos e micróbios, sem afetar a qualidade nem deixar resíduos.

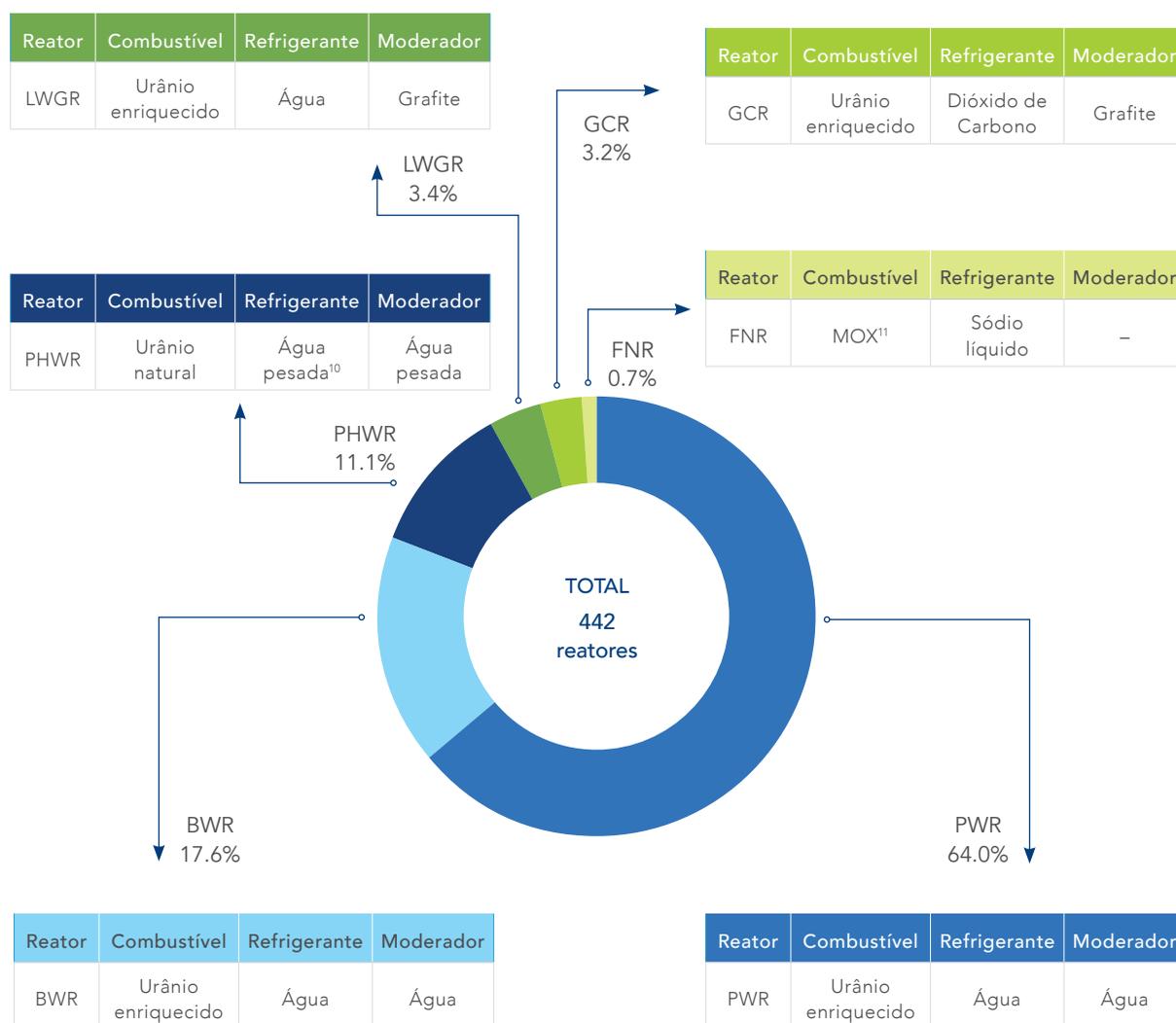
ASPECTOS TÉCNICOS

Há diversos tipos de reatores nucleares, mas os mais comuns atualmente são os do tipo LWR (reator a água leve), no qual a água é usada como fluido de transporte de calor e como elemento moderador das reações de fissão. Os reatores a água leve representam mais de 80% de todos os reatores em operação atualmente. Esta categoria de reatores pode ser subdividida entre BWR (reator a água fervente) e PWR (reator a água pressurizada).

O modelo PWR é o mais usado no mundo. É usado nas usinas de Angra I e II, e Angra III, que segue em construção. Também é usado em navios e submarinos movidos a propulsão nuclear.

Outros modelos em operação atualmente são: PHWR (reator a água pesada pressurizada), LWGR (reator a água leve moderado a grafite), GCR (reator refrigerado a gás) e FNR (reator a nêutrons rápidos).

FIGURA 4: REATORES EM OPERAÇÃO COMERCIAL NO MUNDO, 2015.



Fonte: Elaboração própria a partir de World Nuclear Association e PRIS/IAEA.

9. Isótopos são diferentes formas de um mesmo átomo com diferentes massas atômicas. O número de prótons é o mesmo, mas o número de nêutrons não, o que pode lhes conferir diferentes características. Os radioisótopos são isótopos radioativos, ou seja, emitem partículas ou ondas ao longo do tempo.
10. A água pesada é formada por um átomo de oxigênio e dois átomos de deutério (isótopo do hidrogênio que possui um nêutron a mais).
11. MOX: óxido misto de urânio e plutônio (PuO_2 e UO_2).

Funcionamento de um Reator Nuclear

PWR (reator a água pressurizada): O combustível radioativo é o urânio enriquecido, que se encontra no interior do **núcleo do reator**. Ele é atingido por nêutrons em alta velocidade e seus átomos sofrem fissão. Uma reação em cadeia¹² é estabelecida quando a taxa de fissão se mantém constante, o que ocorre quando a velocidade dos nêutrons não é muito alta. Por isso é usado um **elemento moderador** ao redor do combustível para que os nêutrons percam energia cinética antes de atingir o urânio. Nos reatores PWR, a água cumpre este papel. As **barras de controle** são feitas de materiais capazes de absorver os nêutrons, e são inseridas ou retiradas do interior do núcleo visando controlar a velocidade das reações, ou interrompê-las quando for necessário.

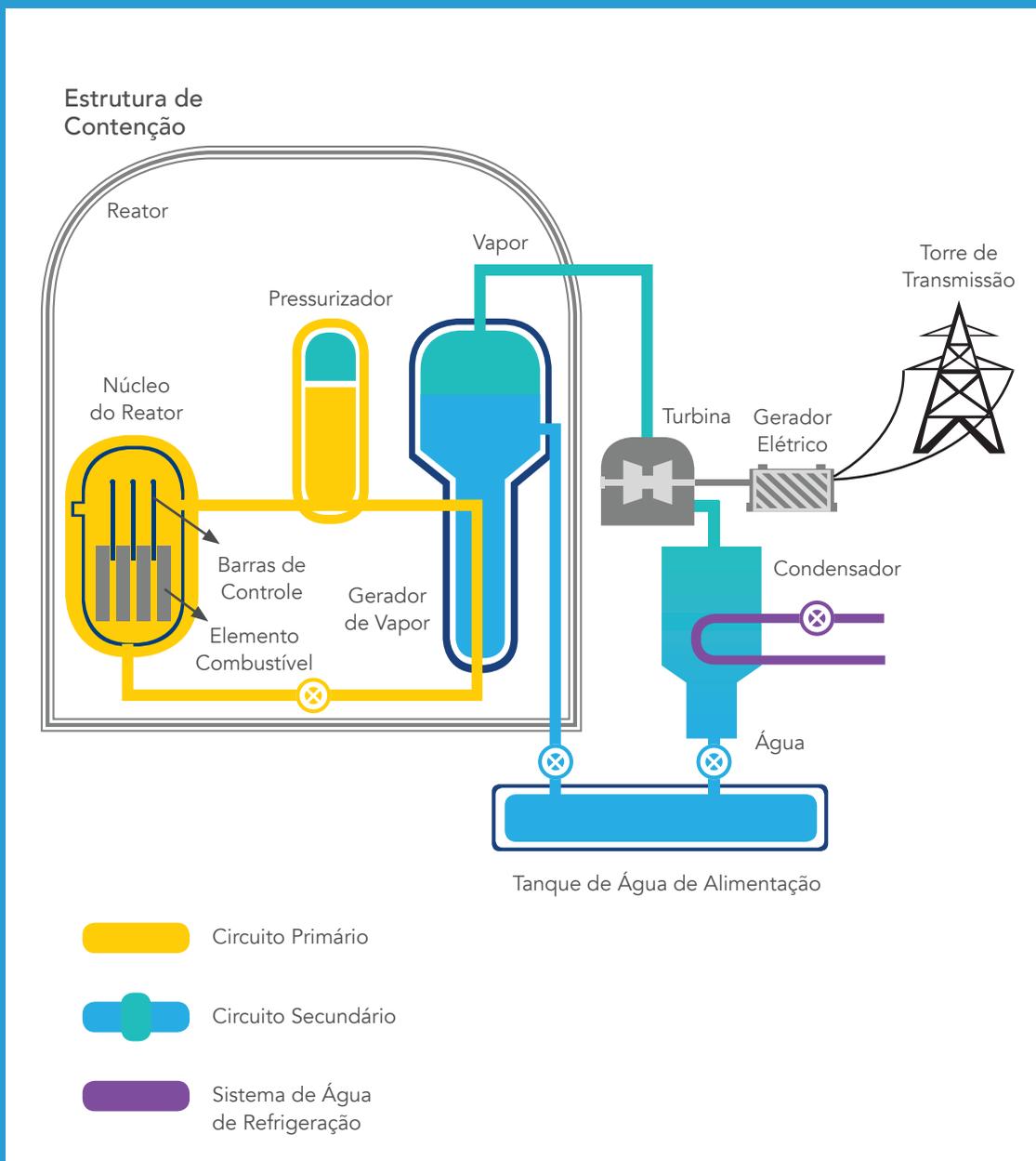
A reação de divisão do núcleo atômico emite calor que aquece a água do **sistema primário**, aquele em contato direto com o núcleo do reator. No **gerador de vapor**, essa água quente e pressurizada troca calor (sem se misturar) com a água do **sistema secundário**, aquecendo-a e transformando-a em vapor com pressão mais baixa. O vapor é o responsável por movimentar o conjunto **turbina-gerador**, que gera a eletricidade.

No reator PWR, cada sistema de circulação de água é independente, o que aumenta a segurança da usina como um todo, pois o material radioativo circula apenas no sistema primário. Além disso, em torno do núcleo há uma **estrutura de contenção**, normalmente feita de concreto e aço, que protege o reator de fatores externos e evita vazamentos de radiação caso ocorra alguma falha interna. No sistema primário, um **pressurizador** controla a pressão da água, impedindo que a água se vaporize apesar da altíssima temperatura. Já o **condensador** no sistema secundário tem a função de resfriar o vapor e recolocá-lo em circulação.

CONTINUA ►

12. Ao ser atingido pelos nêutrons, o núcleo de urânio se divide em dois ou mais núcleos. Nesse processo, são liberados outros nêutrons que atingem átomos próximos que também liberam outros nêutrons. Essa reação continua sem a necessidade de introdução de novos nêutrons externos, por isso é chamada reação em cadeia.

FIGURA 5 - ESQUEMA DE UM REATOR PWR



Fonte: Elaboração própria.

CONTINUAÇÃO ▼

BWR (reator a água fervente): O segundo reator mais comum no mundo, é muito semelhante ao PWR, com a única exceção de que há apenas um sistema de circulação de água, ou seja, a turbina é impulsionada pela mesma água que entra em contato com o urânio enriquecido. Seu custo de construção é menor em relação ao PWR, porém, a turbina é contaminada e os custos com segurança e manutenção são maiores. A permanência da radioatividade na água é curta e a sala da turbina pode ser acessada logo após o desligamento do reator.

PHWR (reator a água pesada pressurizada): Também conhecido como CANDU, é semelhante ao reator do tipo PWR. Também possui sistemas primário e secundário de circulação, só que, no caso, o combustível é o óxido de urânio não enriquecido (gerado após a etapa de conversão) e o elemento moderador é a água pesada. Há um *trade-off* de custo, uma vez que gastos mais baixos com o combustível são compensados por maiores custos com o moderador. Uma das vantagens desse reator é que pode ser reabastecido sem interrupção da operação, porém gera maior quantidade de rejeitos.

LWGR (reator a água leve moderado a grafite): Modelo soviético, também conhecido pela sigla RBMK, é semelhante a um BWR. A água se vaporiza ao entrar em contato com o núcleo e movimenta a turbina. Utiliza grafite como elemento moderador.

GCR (reator refrigerado a gás): Usado no Reino Unido, este reator usa gás carbônico como refrigerante e grafite como elemento moderador. Existem dois modelos: o AGR, que utiliza óxido de urânio enriquecido como combustível, e o Magnox, mais antigo, que utilizava o urânio metálico não enriquecido. O último reator do tipo Magnox em operação no mundo foi desligado em dezembro de 2015¹³.

FNR (reator a nêutrons rápidos): Este modelo é o único em operação comercial atualmente que não possui elemento moderador. É um modelo mais avançado e acredita-se que irá se tornar o novo *status quo*. Alguns tipos podem produzir mais plutônio do que consomem¹⁴, e são chamados FBR (*Fast breeder reactors* – reator regenerador rápido) e podem utilizar o urânio de forma 60 vezes mais eficiente que os reatores comuns.

13. Wylfa 1 esteve em operação entre 1971 e 2015 no Reino Unido.

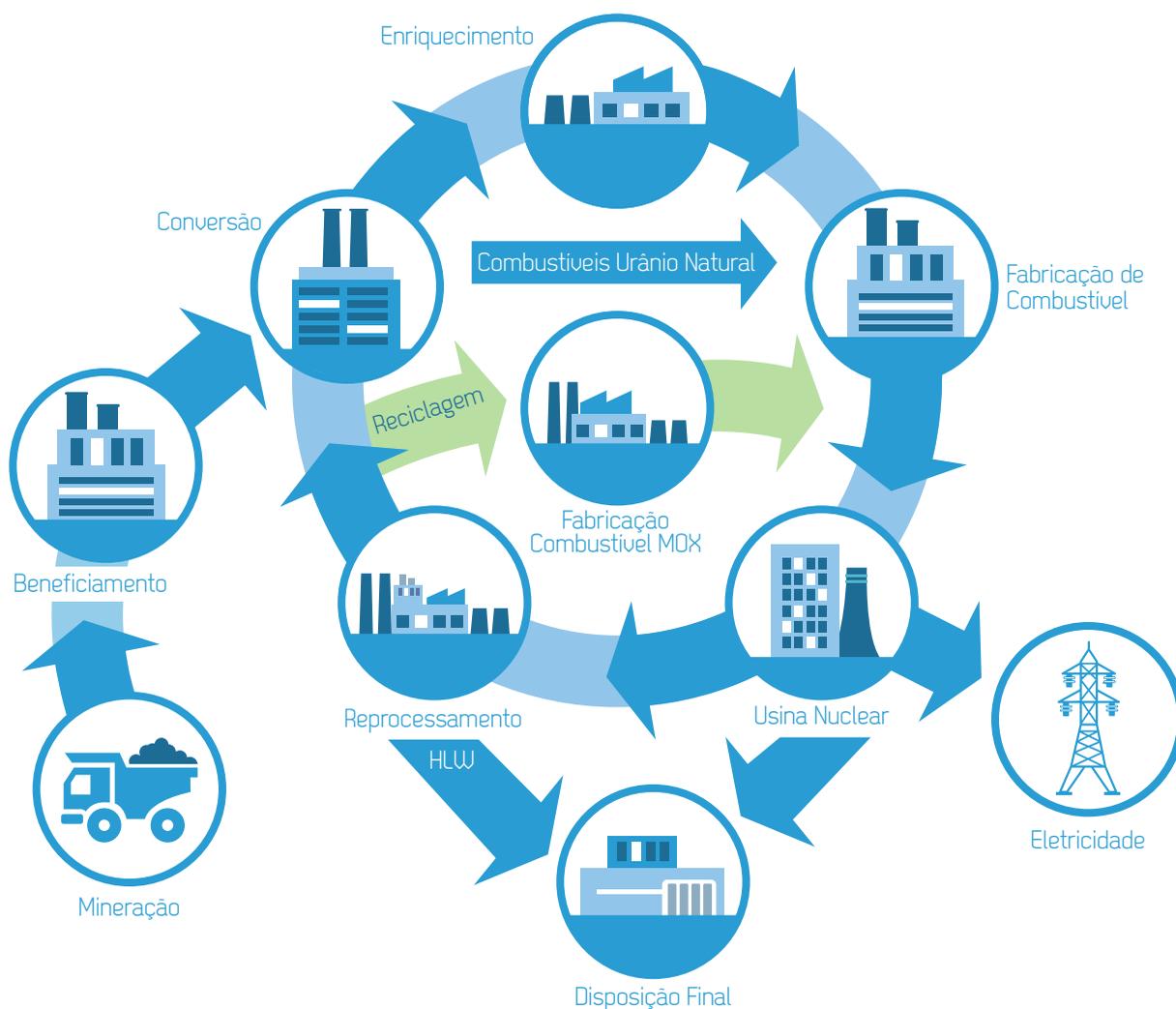
14. O plutônio pode ser reutilizado em outros reatores que utilizem o MOX como combustível.

CICLO DO COMBUSTÍVEL

O urânio é um elemento natural, mais abundante do que o ouro, a prata e o mercúrio. As estimativas atuais dizem que as reservas de urânio potencialmente recuperáveis a custos inferiores a 260 dólares/kg são es-

timadas em cerca de 7,6 megatoneladas de urânio. A demanda anual global de urânio foi de 61 mil toneladas no ano de 2012 [3]. A grande maioria é consumida em reatores para a geração de energia, porém pequenas quantidades são usadas em medicina, agricultura, pesquisa e propulsão naval.

FIGURA 6: CICLO DO COMBUSTÍVEL



Mineração: Em geral, a mineração do urânio é muito semelhante à mineração comum. A uraninita, composta principalmente pelo óxido de urânio, encontra-se normalmente associada a outros minérios, e a concentração de urânio radioativo é muito baixa. A única mina em exploração atualmente no Brasil é a mina de Caetité/BA. A Mina de Santa Quitéria/CE está em fase de licenciamento.

Beneficiamento: O urânio é retirado do minério, purificado e concentrado numa pasta de cor amarela, conhecida como *yellow cake* (U_3O_8). Esta etapa, assim como a mineração, também é realizada pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil) em Caetité.

Conversão: O óxido de urânio (U_3O_8) é transformado em dióxido de urânio (UO_2), que já pode ser usado em reatores que não usam urânio enriquecido. O restante do dióxido de urânio é então convertido no gás hexafluoreto de urânio (UF_6) para que seja enriquecido. Apenas alguns países¹⁵ operam plantas em escala comercial para a conversão do urânio. Atualmente, o urânio usado em Angra I e II é convertido na França, mas o Brasil já domina a tecnologia: possui uma pequena instalação de conversão em escala piloto e está implantando a USEXA (Unidade de Produção de Hexafluoreto de Urânio) no município de Iperó/SP.

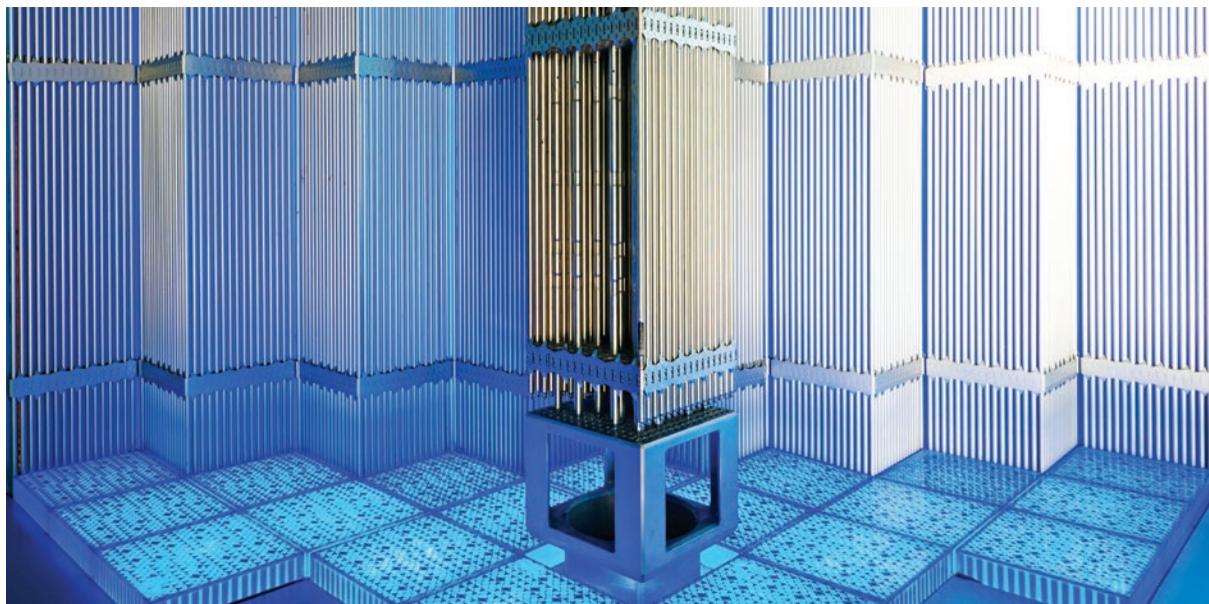
Enriquecimento: Na natureza, o isótopo físsil do urânio (^{235}U) se encontra em uma concentração de aproximadamente 0,07%, enquanto o restante é não físsil (^{238}U). O enriquecimento

consiste em aumentar a concentração do isótopo radioativo para valores da ordem de 3% a 5%, para que seja usado na maioria dos reatores do mundo.

A maior parte do urânio usado no Brasil é enriquecida pelo grupo URENCO¹⁶, mas a FCN (Fábrica de Combustível Nuclear) tem planos de ampliar sua escala de enriquecimento. Sua unidade em Resende/RJ utiliza a técnica de ultracentrifugação, na qual o gás UF_6 é adicionado a uma centrífuga que, ao girar, separa as moléculas de hexafluoreto de urânio de acordo com sua diferença de massa. Os produtos finais dessa etapa são o urânio enriquecido e o urânio deplecionado ou empobrecido.

Reconversão e fabricação de elementos combustíveis: O gás UF_6 enriquecido é então reconvertido em UO_2 sólido, que é sinterizado¹⁷ para formar as pastilhas de combustível¹⁸. Essas pastilhas têm, geralmente, diâmetro de 1,0 cm e altura de 1,5 cm e são organizadas em hastes para serem usadas no reator.

Uso: Para abastecer Angra I, são necessárias 10,5 milhões de pastilhas. Durante a fissão nuclear, parte do urânio é transformada em plutônio, e parte deste também é fissionada e gera energia. Após 12-36 meses, parte do combustível usado deve ser substituído. Ele é armazenado temporariamente em piscinas (pois a água isola a radiação e absorve o calor) até que o material atinja níveis suficientemente baixos de radiação, o que costuma durar alguns meses. A partir daí, o combustível pode seguir dois caminhos: o reprocessamento ou a disposição final.



Reprocessamento: Em alguns países é feito o reprocessamento do combustível usado. O reprocessamento permite separar o urânio enriquecido não fissionado e o plutônio, que podem ser reciclados e transformados em novo combustível. Isso 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. Poucos países, como China, França, Índia, Japão, Rússia e Reino Unido, reprocessam o combustível e adotam o chamado “ciclo fechado” do combustível nuclear.

Disposição final: Os países, como EUA, Brasil e muitos outros, que adotam o “ciclo aberto”, não reprocessam seus rejeitos atômicos. Ainda não existem instalações de disposição final para rejeitos nucleares, o que não se caracteriza ainda como um problema. A maioria dos países ainda não tomou uma decisão quanto ao seu ciclo, e mantém os rejeitos em instalações de armazenamento “temporário” (projetadas para durar dezenas ou até centenas de anos), em uma forma que possa vir a ser reprocessada no futuro e utilizada nos reatores mais modernos que estão em desenvolvimento.

15. Como Canadá, China, França, Rússia, Reino Unido e EUA.

16. Este grupo opera plantas de enriquecimento na Alemanha, Holanda, EUA e Reino Unido.

17. O processo de sinterização consiste em aquecer o material até uma temperatura próxima de seu ponto de fusão para que as partículas se unam através da fusão de superfícies adjacentes, sem alterar seu estado físico. No caso do urânio, essa temperatura ultrapassa os 1400°C.

18. Cada pastilha de urânio, que possui cerca de 1 cm³ de volume, produz a mesma quantidade de energia que 800kg de carvão, 150 galões de petróleo ou 480m³ de gás natural [49].

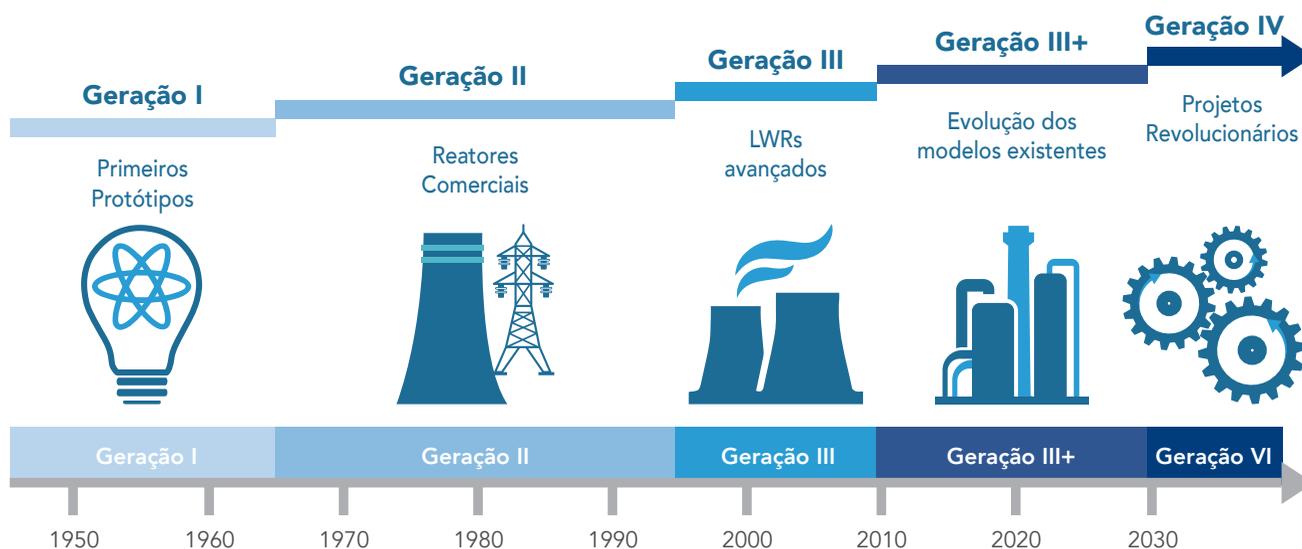
EVOLUÇÃO DOS REATORES NUCLEARES

A tecnologia nuclear está em constante processo de evolução, sempre com o objetivo de aperfeiçoar os projetos de usinas, visando torná-las mais seguras, reduzir o custo e o tempo de construção. Diferentes modelos de reatores são classificados de acordo com suas *gerações*.

Reatores da Geração I foram os primeiros a serem desenvolvidos nas décadas de 1950 e 60 e já foram todos desativados. A maioria deles utilizava urânio natural como combustível e grafite como elemento moderador. Os reatores da Geração II foram desenvolvidos na década de

70 e são os mais comuns em operação atualmente. Sua vida útil era estimada em 40 anos, porém muitos estão tendo seu período de operação prolongado em 20 anos, pois se encontram em bom estado de operação e segurança. Costumam usar combustível de urânio enriquecido e são, em sua maioria, refrigerados e moderados pela água. Os reatores da Geração III e III+ são considerados uma evolução a partir dos reatores de segunda geração, com segurança reforçada e vida útil prevista de 60 anos, que provavelmente poderá ser ampliada. A maioria ainda está em construção. Reatores da Geração IV ainda estão em estudo e nenhum deve entrar em operação antes de 2030.

FIGURA 7: GERAÇÕES DAS USINAS NUCLEARES



Os reatores da Geração III+, a mais avançada disponível no mercado, incorporaram sistemas “passivos” de segurança, ou seja, em caso de acidentes ou mau funcionamento da usina, eles são ativados independentemente de ação humana ou do fornecimento de eletricidade, ao contrário dos mecanismos “ativos” (como bombas hidráulicas, ventiladores e geradores a diesel) que geralmente necessitam da atua-

ção de operadores para funcionar. Os sistemas passivos de segurança dependem apenas de fenômenos físicos naturais, como a gravidade, a convecção e a resistência dos materiais à variação de temperatura, e se ativam automaticamente sempre que necessário. Além disso, os reatores da Geração III+ possuem uma estrutura de construção modular, que reduz o custo e tempo de construção.

Alguns dos Modelos da Geração III/III+

ABWR (BWR avançado) desenvolvido pela GE-Hitachi. Existem quatro unidades operacionais no Japão, que estão passando por revisão pós Fukushima, e outras em construção no Japão, e planejadas no Reino Unido, Taiwan e Lituânia.

AP1000 da Westinghouse, americana, cuja proprietária majoritária atualmente é a Toshiba. É baseado no modelo PWR e unidades estão sendo construídas na China e nos EUA, além de outras planejadas na China e Índia.

APR1400 da KEPCO, empresa sul-coreana, também é baseado no modelo PWR. A primeira unidade entrou em operação comercial no país em janeiro de 2016. Unidades estão em construção nos Emirados Árabes Unidos.

EPR (PWR europeu) da Areva, cujo maior acionista é o governo francês. Unidades estão em construção na China, Finlândia e França e em fase de planejamento no Reino Unido e na Índia.

VVER-1200 da Rosatom, a estatal nuclear russa, baseado no modelo PWR. Unidades estão em construção na Rússia.

ESBWR (BWR simplificado e econômico) da GE-Hitachi. Tem unidades em fase de planejamento nos EUA.

Alguns dos modelos da Geração IV já tiveram protótipos testados, mas ainda são necessários esforços substanciais de pesquisa e desenvolvimento.

PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO IV

A tecnologia nuclear está em constante evolução e busca assimilar o que foi aprendido em experiências passadas. Os novos reatores da Geração IV respondem muito bem às críticas feitas à nuclear com relação a geração de rejeitos, impactos ambientais, proliferação de armas atômicas e probabilidades de acidentes. Ao contrário da Geração III/III+ que trazem apenas melhorias a partir dos modelos tradicionais de reatores da Geração II, a Geração IV representa uma descontinuidade deste tipo de tecnologia, com mecanismos totalmente diferentes dos anteriores.

A Geração IV está sendo desenvolvida com base em quatro metas [25]:

- **Sustentabilidade:** uso mais eficiente do combustível e geração reduzida de rejeitos nucleares.
- **Segurança e confiabilidade:** redução dos riscos de acidentes e maior eficiência.
- **Competitividade econômica:** redução dos custos de construção e operação através da simplificação dos modelos.

- **Resistência à proliferação e segurança física:** proteção física reforçada contra ataques terroristas e tecnologia que não permita o desenvolvimento de armas atômicas.

Os reatores da Geração IV irão operar a temperaturas mais elevadas que os atuais, e o calor poderá ser reaproveitado (processo conhecido como cogeração) para outros usos além da geração de eletricidade, como em processos industriais, incluindo a siderurgia e a petroquímica, e dessalinização de água. Alguns dos modelos da Geração IV já tiveram protótipos testados. Para que se tornem rentáveis, entretanto, ainda são necessários esforços substanciais de pesquisa e desenvolvimento. Espera-se que os reatores da Geração IV entrem em operação comercial a partir de 2030.

Quase todos os reatores da Geração IV em estudo podem operar com o ciclo fechado do combustível, ou seja, reutilizar combustível usado reprocessado. Todos usam urânio em diferentes composições, e o modelo SCFR também possibilita o aproveitamento do plutônio gerado pelos reatores atuais a água leve. No caso dos modelos VHTR e MSR, existe a possibilidade de utilização do tório, novo combustível promissor.

MODELOS DA GERAÇÃO IV

Os objetivos da Geração IV podem parecer conflitantes a princípio, mas 6 conceitos de reatores modernos já foram selecionados por cumprirem todos esses objetivos.

GFR (reator rápido refrigerado a gás): Neste reator, o combustível irradiado pode ser reprocessado e reutilizado diversas vezes, reduzindo a necessidade de exploração de minas de urânio e gerando menos rejeitos, graças ao uso mais eficiente. Não possui elemento moderador, o que faz com que as reações de fissão ocorram mais rapidamente. A refrigeração é feita usando gás, o que elimina os riscos de corrosão do suporte do combustível.

LFR (reator rápido refrigerado a chumbo): O elemento refrigerante usado neste reator é o chumbo ou uma liga metálica de chumbo e bismuto. Isso permite que o reator opere com a pressão atmosférica a temperaturas mais elevadas sem risco de fervura do refrigerante, graças ao elevado ponto de ebulição.

SFR (reator rápido refrigerado a sódio): Usa sódio no estado líquido como elemento refrigerante, que possui alto ponto de ebulição e alta capacidade de transferir calor, além de causar menos corrosão ao núcleo do reator.

MSR (reator de sal fundido): Dividido em duas subcategorias, este modelo de reator pode ter o material físsil dissolvido no sal fundido ou não. Tem uma performance muito eficiente e, por operar em temperaturas elevadas, pode ter o calor aproveitado em processos industriais.

SCWR (reator supercrítico refrigerado a água): Funciona a alta temperatura e a alta pressão. Combina a tecnologia usada em reatores a água leve e a usinas térmicas fósseis que operam com água em estado supercrítico. Ao contrário dos outros modelos da Geração IV, este modelo pode ser desenvolvido a partir de reatores atuais em operação.

VHTR (reator a temperatura muito elevada): É visto como a evolução dos reatores de alta temperatura refrigerados a gás. Usa o grafite como elemento moderador e é refrigerado pelo sódio.



Segurança e Confiabilidade

A falta de informação leva a população a tratar a energia nuclear com maior apreensão do que a dispensada a outras fontes de energia. Existem de fato riscos relacionados à energia nuclear, assim como existem riscos associados a todo tipo de fonte geradora de energia. Na percepção do público, porém, o risco nuclear está associado a explosões nucleares e efeitos térmicos, que não foram relevantes em nenhum acidente nuclear, incluindo Chernobyl e Fukushima [26]. Além disso, a concentração de urânio radioativo (^{235}U) não ultrapassa os 5% numa usina, não podendo ser comparada a bombas atômicas, onde essa concentração chega a 90%.

Além da segurança, outros fatores que causam estranhamento são a geração de rejeitos e possíveis impactos ambientais da geração nuclear. Esses riscos não são tão elevados quanto se acredita, especialmente em se consideran-

do os modelos mais modernos de reatores. A desinformação a respeito dessas questões acaba por prejudicar o desenvolvimento nuclear brasileiro, causando uma série de prejuízos econômicos e ambientais para o país.

Conversão de Bombas Nucleares em Combustível

Existem temores de que a geração de energia a partir de fontes nucleares incentive a utilização do urânio para fins militares. Contudo, boa parte do urânio usado hoje em usinas nucleares é proveniente do desmantelamento de bombas atômicas. O urânio altamente enriquecido (concentração até 90% de urânio radioativo) pode ser misturado ao urânio natural para produzir urânio levemente enriquecido (concentração entre 3 e 5% de urânio radioativo), que pode ser usado em reatores de geração de energia. Essa fonte vem substituindo anualmente cerca de 8.850 toneladas de óxido de urânio produzido em minas e representou 13 a 19% das necessidades mundiais de urânio para geração de energia no ano de 2013.

O programa “*Megatons to Megawatts*”, por exemplo, foi assinado por EUA e Rússia em 1993. Durou 20 anos e levou a Rússia a empobrecer 500 toneladas de ogivas e arsenais militares e vendê-los para que os EUA usassem em reatores civis [27].

SEGURANÇA

Acidentes em usinas nucleares são percebidos como sendo mais graves do que outros tipos de acidentes com níveis semelhantes de danos à sociedade e ao meio ambiente [28].

Aconteceram de fato acidentes relacionados à operação de usinas nucleares no passado, mas a cada ocorrência a indústria nuclear se

aprimora, introduzindo novas tecnologias para tornar as usinas mais seguras.

Os primeiros reatores nos EUA e em outros países foram construídos em lugares remotos e não possuíam estrutura de contenção em torno do reator. A expansão da indústria fez com que os reatores fossem instalados com maior proximidade dos centros de consumo, o que levou a um processo de aperfeiçoamento constante das medidas de segurança [26].

Acidentes Nucleares e Evolução Tecnológica

Os acidentes ocorridos na operação de usinas nucleares, motivaram as empresas do setor a aperfeiçoar e melhorar ainda mais os níveis de segurança das usinas em operação e nos projetos de novas usinas. Acidentes nucleares são fenômenos raros e a ocorrência de um acidente resulta na redução da probabilidade de novas ocorrências no futuro.

1979 – Three Mile Island (EUA)

O reator 2 dessa usina sofreu o derretimento parcial do núcleo, devido a falhas numa válvula do sistema de resfriamento e erros de interpretação dos dados, que levaram os operadores a tentar desligar os sistemas automáticos de segurança. Gases radioativos foram liberados ao exterior, porém em níveis muito baixos. Cada pessoa exposta recebeu níveis de radiação menores do que em uma radiografia [59]. O reator 1 dessa usina segue em operação até hoje.

Esse acidente fez com que os erros humanos fossem levados em conta na avaliação de riscos, e fossem adotadas medidas de segurança como [29]:

- O projeto das salas de controle foi aperfeiçoado, incluindo melhorias ergonômicas e apresentação de dados ambíguos para melhor interpretação dos operadores.
- Treinamentos periódicos dos operadores em simuladores em tamanho natural.
- Os sistemas automáticos de segurança não podem sofrer interferências dos operadores durante a primeira fase de um potencial acidente.
- Criação do INPO (Instituto de Operadores de Reactores Nucleares) nos EUA para promoção de melhores práticas.

CONTINUAÇÃO ▼

1986 – Chernobyl (URSS, atual região da Ucrânia)

Os quatro reatores do complexo nuclear de Chernobyl eram do tipo LWGR (RBMK na sigla russa), modelo usado apenas na União Soviética. Os mecanismos de segurança responsáveis pelo desligamento automático do reator 4 haviam sido desligados para a realização de um teste. O sistema estava instável e explosões ocorreram por conta do aumento da pressão no interior do reator. Essas explosões causaram a destruição do prédio do reator – que não seguia as mesmas medidas de segurança já em prática no resto do mundo – liberando grandes quantidades de material radioativo ao exterior. Milhares de pessoas foram evacuadas do entorno, e uma área com 30km de raio foi isolada¹⁹. Os outros três reatores desta usina continuaram em operação até os anos de 1991, 1996 e 2000.

Este acidente foi muito específico desta família de reatores, mas ainda assim ensinou algumas lições [29] [30] [31]:

- O prédio de contenção do reator é um elemento fundamental para limitar as consequências de acidentes nucleares, portanto, é preciso protegê-lo de elementos que, durante o acidente, possam vir a prejudicá-lo (como explosões de hidrogênio, altas temperaturas, etc)
- Por mais baixa que seja a probabilidade de ocorrência de um acidente, é preciso criar medidas de prevenção que diminuam o impacto ao ambiente externo em caso de acidente.
- Após o acidente, a URSS fez alterações em todos os reatores RBMK em operação, tornando-os mais estáveis.
- As medidas tomadas após esse acidente fazem com que uma nova ocorrência como esta seja praticamente impossível.

O aprendizado a partir desse acidente levou às melhorias presentes nos reatores da Geração III/III+, como os sistemas passivos de segurança.

¹⁹.Cerca de 2.800 km². A título de comparação, a área alagada da UHE de Sobradinho, o maior reservatório do Brasil, é de 4.214 km² e cerca de 60 mil pessoas foram deslocadas para construção desse reservatório.

2011 – Fukushima Daiichi (Japão)

Um terremoto de magnitude 9 na escala Richter (o maior terremoto na história do país) [26] causou dois tsunamis, um deles com 15m de altura. Somente o terremoto e tsunami causaram mais de 19 mil mortes. Onze reatores estavam em operação na região e todos desligaram automaticamente e não foram danificados. O tsunami, porém, danificou os geradores a diesel da usina de Fukushima Daiichi, responsáveis por manter o sistema ativo de resfriamento em funcionamento. Quatro reatores dessa usina tiveram aumento de pressão por conta da temperatura, o que causou as explosões.

As emissões decorrentes do acidente nuclear não atingiram níveis que possam causar danos irreparáveis ao meio ambiente ou à saúde humana (mesmo para os trabalhadores envolvidos nos processos de emergência), segundo relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS) [32]. Ainda assim, o acidente de Fukushima afetou a aceitação pública da energia nuclear em diversos países [28], mas por outro lado trouxe grandes aprendizados à indústria nuclear [26] [33] [34] [35]:

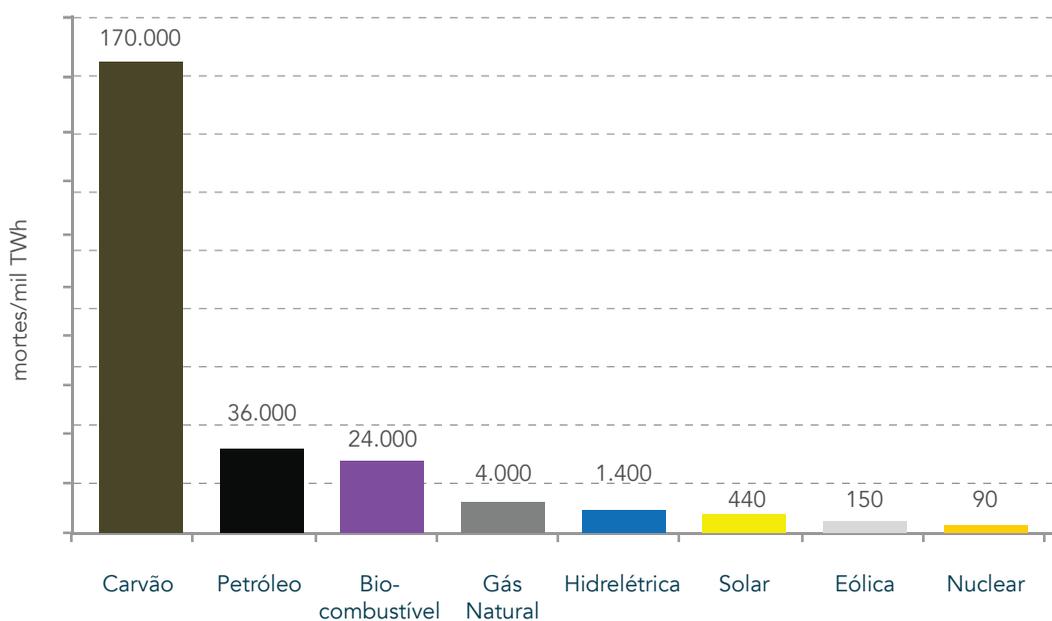
- Não havia registros de fenômenos naturais nessa magnitude no Japão e a usina havia sido projetada para suportar terremotos e tsunamis de menor escala. Para evitar esse tipo de ocorrência, deve-se planejar medidas de segurança para acidentes mesmo que estes pareçam improváveis.
- Fortalecimento dos prédios anexos às usinas da mesma forma que o prédio do reator.
- O Japão possuía três diferentes agências dedicadas à regulação do setor nuclear, sendo uma delas ligada ao ministério responsável pela promoção da energia nuclear (METI). A falta de coordenação entre essas agências prejudicou a reação ao acidente e, em 2012, esse modelo foi revisto, culminando na criação de uma única agência independente responsável pela regulação e controle do setor.
- Muitos países revisaram seu arcabouço regulatório, de modo a permitir uma reação mais rápida das operadoras de usinas e/ou do governo em caso de acidentes.

Os mecanismos de segurança passiva da geração III/III+ ainda não estavam em funcionamento nos reatores de Fukushima, que foram inaugurados na década de 1970. Os reatores em construção atualmente não passarão por acidente semelhantes.

Em comparação quantitativa, a energia nuclear ainda é a fonte mais segura de geração de eletricidade, mesmo levando-se em consideração os efeitos dos acidentes de Chernobyl e Fukushima. A geração nuclear produz energia em larga escala e os possíveis efeitos negativos são minimizados a longo prazo devido a sua alta

produtividade. O gráfico a seguir leva em consideração efeitos diretos e indiretos da geração de energia, inclusive os efeitos de longo prazo dos acidentes nucleares. Vale lembrar que mesmo nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, onde foram lançadas as bombas atômicas em 1945, hoje habitam mais de 1,5 milhão de pessoas.

FIGURA 8: MORTES A CADA MIL TWH GERADOS



Fonte: James Conca, 2012. [32]

A poluição atmosférica é, hoje, a questão ambiental mais grave a ser discutida.

IMPACTOS AMBIENTAIS

A poluição atmosférica é, hoje, a questão ambiental mais grave a ser discutida. Segundo a Organização Mundial da Saúde, a inalação de material particulado causa 3,7 milhões de mortes prematuras no mundo anualmente [37]. Países como a Índia e a China, que estão crescendo a taxas elevadas e cujo consumo energético vem aumentando consideravelmente, geram a maior parte de sua eletricidade através de térmicas fósseis. A poluição atmosférica local e a emissão GEE estão fazendo com que esses países busquem alterar sua matriz energética priorizando fontes limpas, inclusive a nuclear. Estudos recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e da Agência Internacional de Energia (IEA) têm colocado a nuclear como uma tecnologia fundamental na redução de emissões de GEE [38].

No caso das fontes fósseis, as emissões de GEE provêm principalmente da queima do combustível. Na geração nuclear, assim como nas renováveis, a maior parte das emissões ocorre antes da operação, ou seja, durante as fases de instalação e montagem. As usinas nucleares demandam um alto investimento inicial na aquisição dos

componentes, sistemas e estruturas, porém, ao se considerar todo o ciclo de vida dessas usinas, as emissões por MWh são equiparáveis (e em alguns casos, mais baixas) às de fontes como a solar e a eólica [23].

Caso a eletricidade gerada por fontes limpas, como a nuclear, hidrelétrica e outras renováveis, tivesse sido gerada por uma combinação de carvão, petróleo e gás natural²⁰, estima-se que 6 bilhões de toneladas a mais de GEE teriam sido emitidas, apenas no ano de 2011 [39].

Além disso, usinas nucleares ocupam espaços relativamente pequenos, não exigindo o desmatamento e desapropriação de áreas, e não alteram significativamente o meio ambiente em que são instaladas. A usina hidrelétrica de Itaipu, por exemplo, a maior hidrelétrica do Brasil, possui um reservatório de 1.359 km² de área alagada, para uma capacidade instalada de 14.000 MW. As usinas nucleares de Angra 1 e 2 ocupam uma área de 3,5 km² e têm capacidade instalada de 1.990 MW. **O índice de produção de Itaipu é 10,4MW/km², enquanto o da central de Angra é de 570MW/km².** Essa é uma das grandes vantagens da energia nuclear, pois pode ser instalada em áreas pequenas relativamente próximas dos centros de consumo.

20. Proporcional a suas respectivas participações na matriz elétrica global.

Existem subprodutos gerados em todas as etapas do ciclo do urânio, classificados como sendo de baixa, média ou alta radioatividade.

Um dos maiores impactos ambientais causados por uma usina nuclear é a liberação de calor²¹, que pode ser dissipado através de torres de vapor (o que pode causar pequenas ilhas de calor no entorno da usina) ou de trocas de calor com a água mais fria de um corpo d'água próximo, como é o caso das usinas do complexo de Angra.

REJEITOS

Outro fator relacionado à operação de usinas nucleares é a geração de rejeitos radioativos. Existem subprodutos gerados em todas as etapas do ciclo do urânio, classificados como sendo de baixa, média ou alta radioatividade. Para os dois primeiros, formados principalmente por roupas, panos usados na limpeza da usina, água e ferramentas, recomenda-se o processamento

e armazenagem em tambores especiais na própria central nuclear. Desde os últimos 50 anos, quando se começou a lidar com o material radioativo, as experiências com este tipo de resíduo têm sido bem-sucedidas.

Os rejeitos de alta radioatividade, contidos no combustível usado, ficam, temporariamente, estocados em piscinas de água borada²², que inibe a reação em cadeia e absorve o calor liberado. Ao contrário dos rejeitos gerados em outras atividades humanas (como por exemplo a produção industrial, o esgotamento urbano ou a geração de energia por fontes fósseis) que são, muitas vezes, lançados nas águas ou na atmosfera sem fiscalização, o rejeito nuclear é controlado constantemente. Após o decaimento adequado do combustível nuclear usado, ele pode ser encaminhado para a destinação final ou para o reprocessamento.

21. Cerca de 35% do calor liberado pela fissão é convertido em eletricidade, enquanto o equivalente 65% do calor deve ser dissipado. Motores a gasolina, por exemplo, liberam cerca de 80% do calor gerado pela combustão no meio ambiente.

22. Misturada com o elemento Boro.

Nos países que adotam o ciclo aberto do combustível nuclear, após o tempo de decaimento em que são mantidos nas piscinas, os rejeitos têm seu volume reduzido e são solidificados junto a outros materiais, resultando em barras de vidro. A **vitrificação** facilita o transporte e a estocagem, diminuindo os possíveis impactos sobre o meio ambiente. Uma das alternativas mais consideradas atualmente para a disposição final dos rejeitos de alta radioatividade após a vitrificação é o armazenamento em estruturas geológicas estáveis com mais de 500 m de profundidade.

Comparando uma usina de geração a carvão a uma usina nuclear podemos ter uma nova perspectiva sobre os prejuízos associados aos rejeitos nucleares. Considerando instalações com

1.300 MW de capacidade instalada (o porte de Angra 3), a média anual de consumo de combustível em uma usina a carvão é de 3,3 milhões de toneladas, enquanto uma usina nuclear consome apenas 32 toneladas de urânio enriquecido [40]. Nos EUA, por exemplo, estima-se que 2.200 toneladas de rejeitos nucleares são geradas por ano, pouco em comparação com as 115 milhões de toneladas anuais de rejeitos geradas em fábricas e geradores a carvão no país [41]. Acontece que os resíduos de uma usina a carvão são lançados no ar e as tecnologias de captura ainda são caras e não utilizadas amplamente. Por outro lado, todo o rejeito nuclear é armazenado em condições controladas e, por ainda possuir um grande potencial de geração de energia, pode vir a ser reciclado e utilizado por reatores da Geração IV no futuro.





Energia Nuclear no Mundo

No ano de 2010, a indústria nuclear estava vivendo a chamada “renascença nuclear”, com um número crescente de reatores em construção. O interesse na tecnologia aumentou devido à necessidade de se atender o crescente consumo energético global, com uma energia de base que ao mesmo tempo obedecesse aos novos padrões ambientais de emissão de GEE e tivesse custos estáveis²³ [42]. A facilidade de instalação de uma usina nuclear nas proximidades dos centros de consumo e sua alta eficiência, em especial no que diz respeito à pequena área ocupada, fazem com que esta seja uma boa alternativa para países em desenvolvimento, pois é capaz de produzir energia em larga escala para os grandes centros urbanos.

Todavia, a ocorrência do acidente nuclear de Fukushima, em março de 2011, interrompeu esta tendência mundial de expansão nuclear, pois teve um forte impacto na aceitação pública dessa fonte [28] e, em função disso, alguns países alteraram seus programas nucleares e políticas regulatórias. Outro fator que desace-

lerou a expansão nuclear foi a crise econômica de 2008/2009, que causou não só uma redução do consumo de energia nos países afetados, como também fez com que a capacidade de financiamento por parte das instituições de crédito diminuísse [42]. Cinco anos após Fukushima, porém, a indústria nuclear vem re-

23. Nas usinas térmicas convencionais, o combustível é o principal componente no custo de geração. Já nas nucleares, o preço do combustível representa uma pequena fração do custo final da energia e a maior parte dos custos é fixa [57]. Assim, o preço final do MWh se mantém relativamente estável ao longo da operação da usina.

tomando seu crescimento com novas usinas em diferentes estágios de planejamento e construção. Em março de 2016, 66 novos reatores estão em construção na Europa, Ásia e Américas [2].

Atualmente, 442 reatores nucleares estão em operação comercial em 30 países²⁴ nos cinco continentes, com uma capacidade instalada total de 384 GW e fator de capacidade médio de 76% [2]. Levando em consideração as redes elétricas regionais e a exportação de energia, ainda mais países utilizam energia nuclear em suas matrizes. A Itália e a Dinamarca, por exemplo, apesar de não possuírem reatores operando em seus territórios, obtém quase 10% de sua eletricidade de fontes nucleares [43].

A geração mundial por fontes nucleares teve uma redução de 10,8% entre 2010 e 2012, principalmente por conta do desligamento temporário para testes de todos os reatores japoneses, que somam mais de 40, e do adiantamento do descomissionamento de 8 reatores alemães mais

antigos em 2011. No entanto, a partir de 2012 a geração nuclear tornou a crescer, ainda que moderadamente. Em 2013, a geração nuclear representou quase 11% de toda a matriz elétrica no mundo, sendo a 4ª fonte a mais gerar eletricidade, depois de térmicas a carvão, térmicas a gás e hidrelétricas. O Japão religou dois de seus reatores nucleares em 2015²⁵ e projeções do governo estimam que, em 2030, de 20 a 22% da eletricidade gerada no país se dará por fonte nuclear, nível semelhante dos anteriores ao acidente [44].

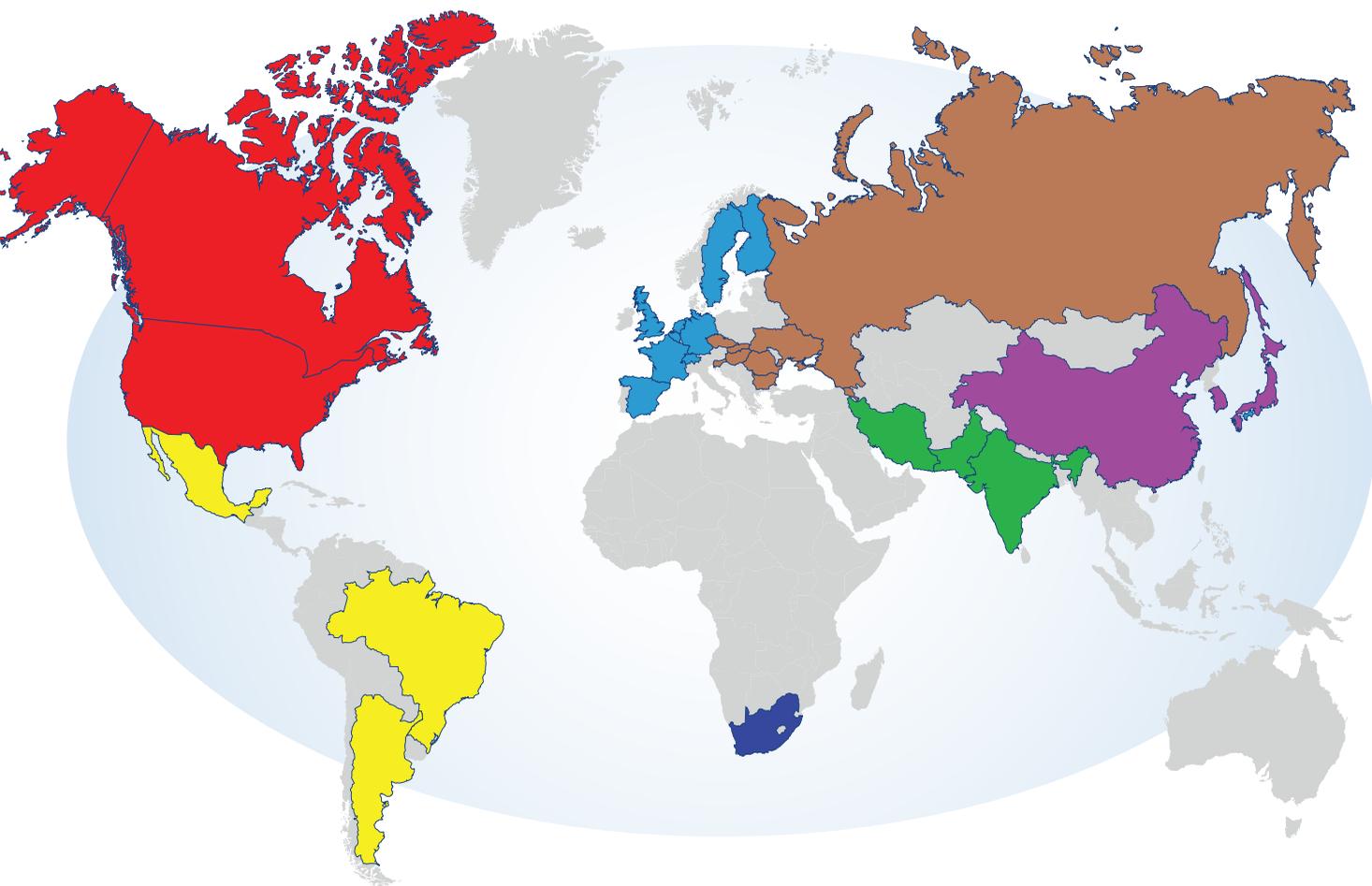
Além dos reatores em operação comercial, mais de 240 reatores de pesquisa estão operando em 56 países e outros estão em construção. Eles são, em geral, usados na produção de radioisótopos para a medicina e indústria²⁶ [45]. No Brasil, temos 4 reatores de pesquisa em operação, localizados nos estados do Rio de Janeiro (IEN – Instituto de Engenharia Nuclear), São Paulo (IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) e Minas Gerais (CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear).

24. Os países que possuem usinas nucleares em operação comercial atualmente são: África do Sul, Alemanha, Argentina, Armênia, Bélgica, Brasil, Bulgária, Canadá, China, Coreia do Sul, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Holanda, Hungria, Índia, Irã, Japão, México, Paquistão, Reino Unido, Romênia, Rússia, República Tcheca, Suécia, Suíça e Ucrânia.

25. Sendai 1 e 2.

26. Ver o box “OUTRAS APLICAÇÕES DE MATERIAIS RADIOATIVOS” na página 24

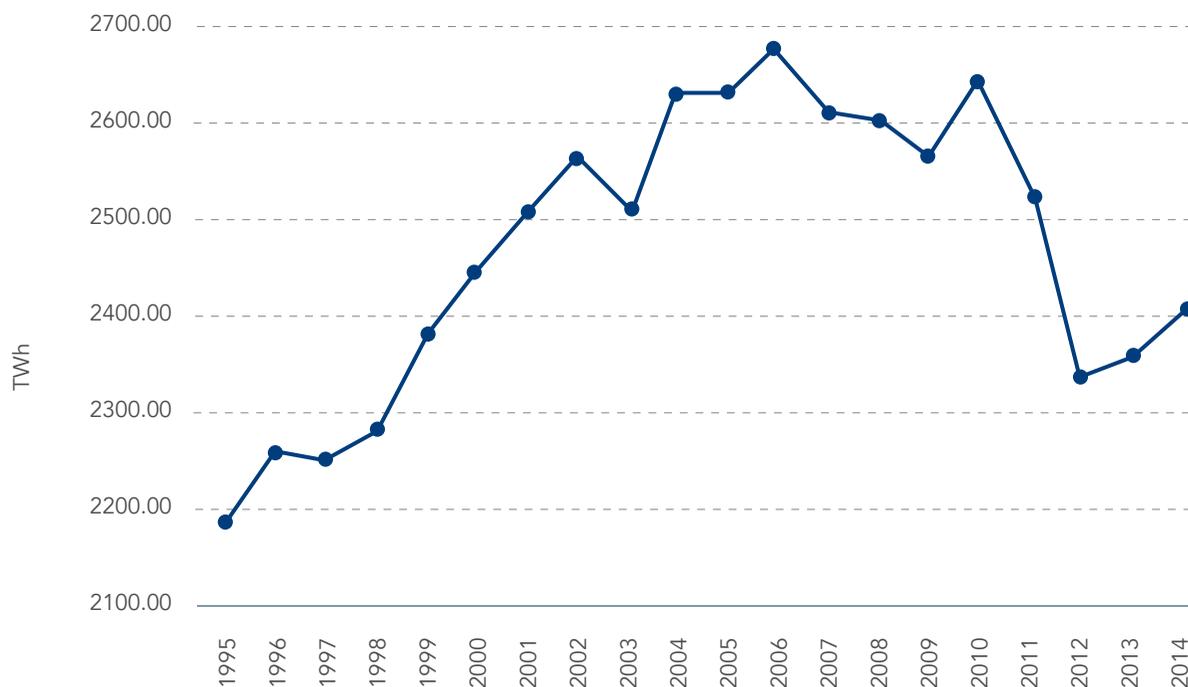
FIGURA 9: REATORES NUCLEARES POR REGIÃO



Fonte: Elaboração própria a partir de PRIS/IAEA, 2016 [2].

Região	Número de reatores	Capacidade instalada total (MW)
África	2	1.860
América Latina	7	4.956
América do Norte	118	112.709
Ásia oriental	105	95.110
Oriente Médio e Sul da Ásia	25	6.913
Europa central e oriental	70	50.472
Europa ocidental	115	112.061
Total	442	384.081

FIGURA 10: ELETRICIDADE FORNECIDA A PARTIR DE REATORES CONECTADOS À REDE (1995 A 2014).



Fonte: Elaboração própria a partir de PRIS/IAEA, 2016 [2].

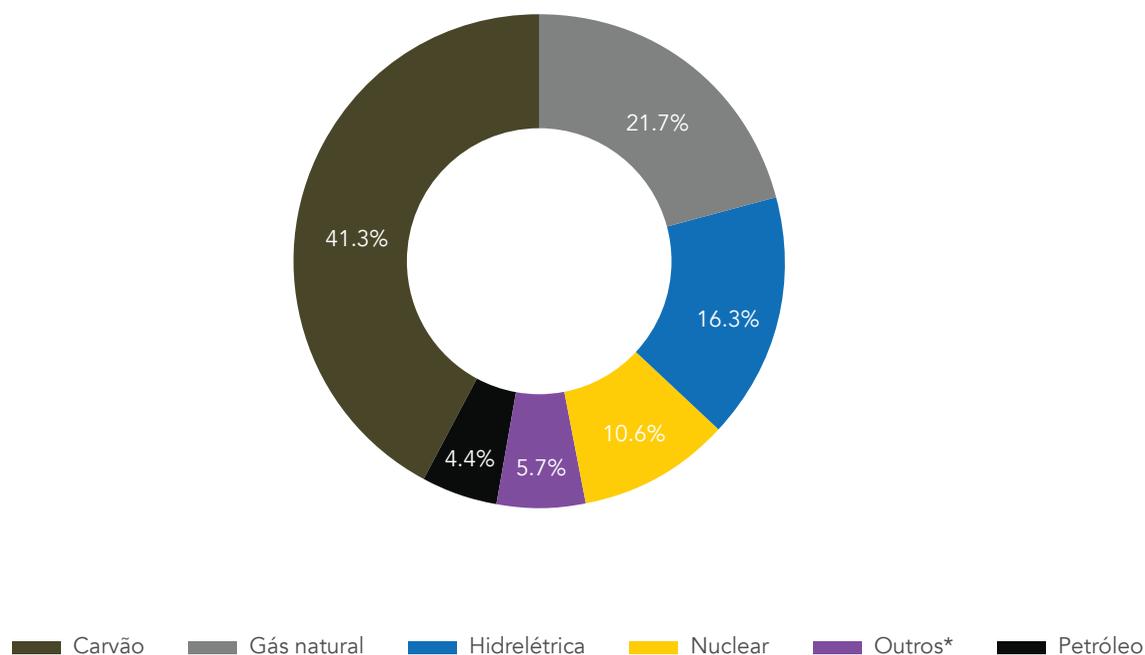
PARTICIPAÇÃO NUCLEAR NA MATRIZ DOS PAÍSES

Estados Unidos, França, Canadá e Alemanha Ocidental foram os primeiros países a implantar programas nucleares significativos [38]. Hoje, os EUA são o país que mais gera eletricidade através de usinas nucleares. No ano de 2014, foi o responsável por gerar cerca de um terço da energia nuclear do mundo através de seus 99 reatores em operação. Nenhuma nova construção foi iniciada

no país em mais de 30 anos, porém investimentos em manutenção e atualizações fizeram com que a geração nuclear aumentasse, pois houve melhora considerável na eficiência das usinas. Atualmente, é o país cujos reatores apresentam maior fator de capacidade, acima de 90% [46].

Apesar de ser o maior gerador do mundo, a participação da energia nuclear na matriz dos EUA é de 19%, enquanto a França, que é o segundo gerador em valores absolutos, é o país que mais

FIGURA 11: PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO MUNDO (2013).



Fonte: IEA, 2015 [16].

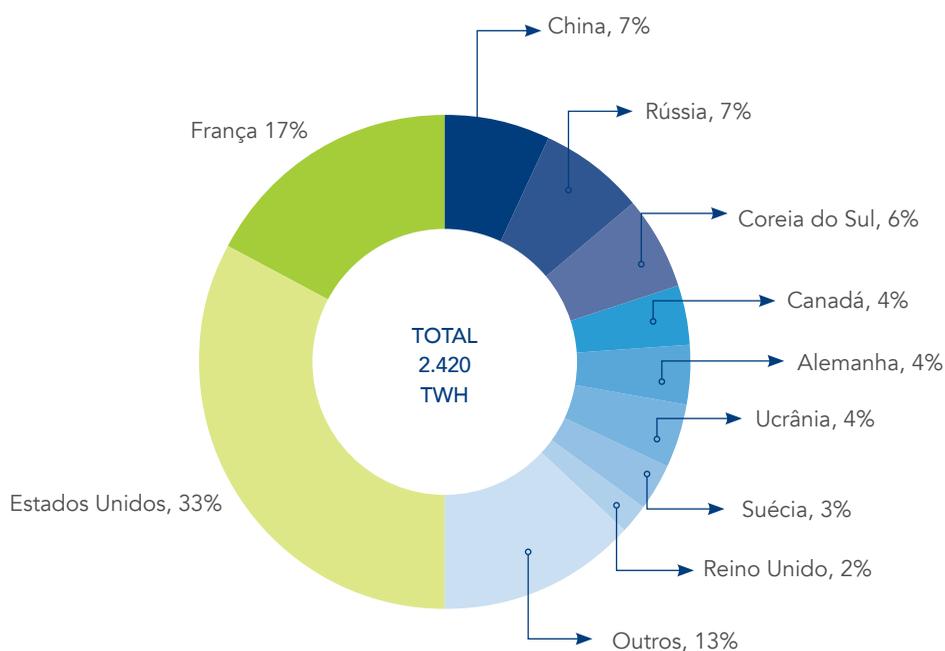
*Outros inclui geotérmica, solar, eólica, etc.

depende da energia nuclear: 77% de sua eletricidade provém deste tipo de energia. Eslováquia, Hungria, Ucrânia e Bélgica também são muito dependentes da energia nuclear e mais de 45% de sua produção interna de energia elétrica foi proveniente de usinas nucleares em 2014.

Os países BRIC, com exceção do Brasil, tendem a focar na geração elétrica próxima aos centros de consumo e estão investindo fortemente na energia nuclear. Rússia, Índia e China possuem juntos

93 reatores em operação e mais 40 em construção, ou seja, mais de 60% dos reatores em construção atualmente são nesses países. O Brasil, por sua vez, tem dado prioridade a fontes renováveis, especialmente a hidrelétrica, que exigem a construção de linhas de transmissão, pois o maior potencial se encontra distante dos centros de consumo. Enquanto o Brasil demora em tomar uma decisão com relação à expansão de seu programa nuclear, Rússia, Índia e China já são responsáveis por mais de 15% da geração nuclear do mundo.

FIGURA 12: PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR E OS 10 MAIORES GERADORES DO MUNDO (2014).



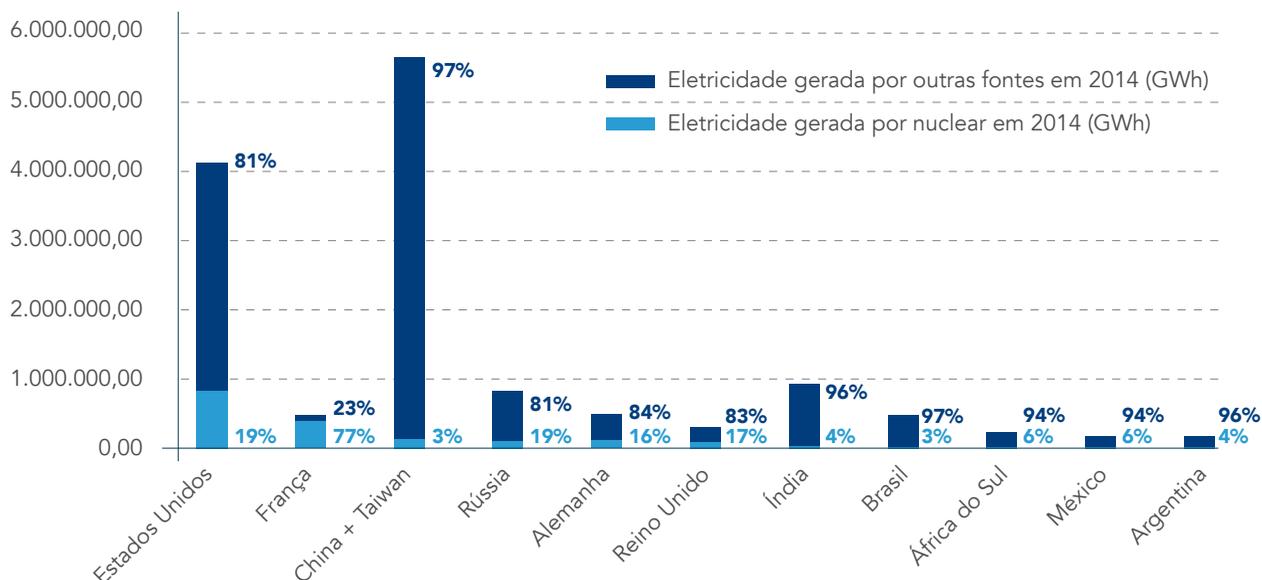
OBS: "China" considera também as usinas no território de Taiwan.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do PRIS/IAEA, 2016 [2].

Na América Latina, México e Argentina possuem, respectivamente, 2 e 3 reatores em operação. A Argentina possui um pequeno reator em construção (CAREM-25, desenvolvido no país) e o governo tem sinalizado um interesse em expandir essa fonte, com colaboração

da Rússia e da China. A Bolívia está desenvolvendo uma parceria com a Rússia para a construção de um centro de pesquisa nuclear e assinou um acordo de cooperação com a Argentina visando construir usinas nucleares em seu território.

FIGURA 13: PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ DE PAÍSES SELECIONADOS (2014).



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do PRIS/IAEA, 2016. [2]

REGULAÇÃO INTERNACIONAL

Após Fukushima, alguns países alteraram suas regulação e política nucleares, mas apenas Alemanha, Itália e Suíça (países onde a oposição à nuclear já era mais forte) tiveram mudanças mais significativas e excluíram a possibilidade de instalar novos reatores. O apoio a esta fonte segue sendo forte no Reino Unido, França, China, EUA, Índia, Vietnã, Oriente Médio, Europa Central, e alguns outros países. A independência dos órgãos reguladores é essencial para o bom desenvolvimento da energia nuclear, e isso exige a disponibilidade de recursos humanos e técnicos necessários para identificar os riscos

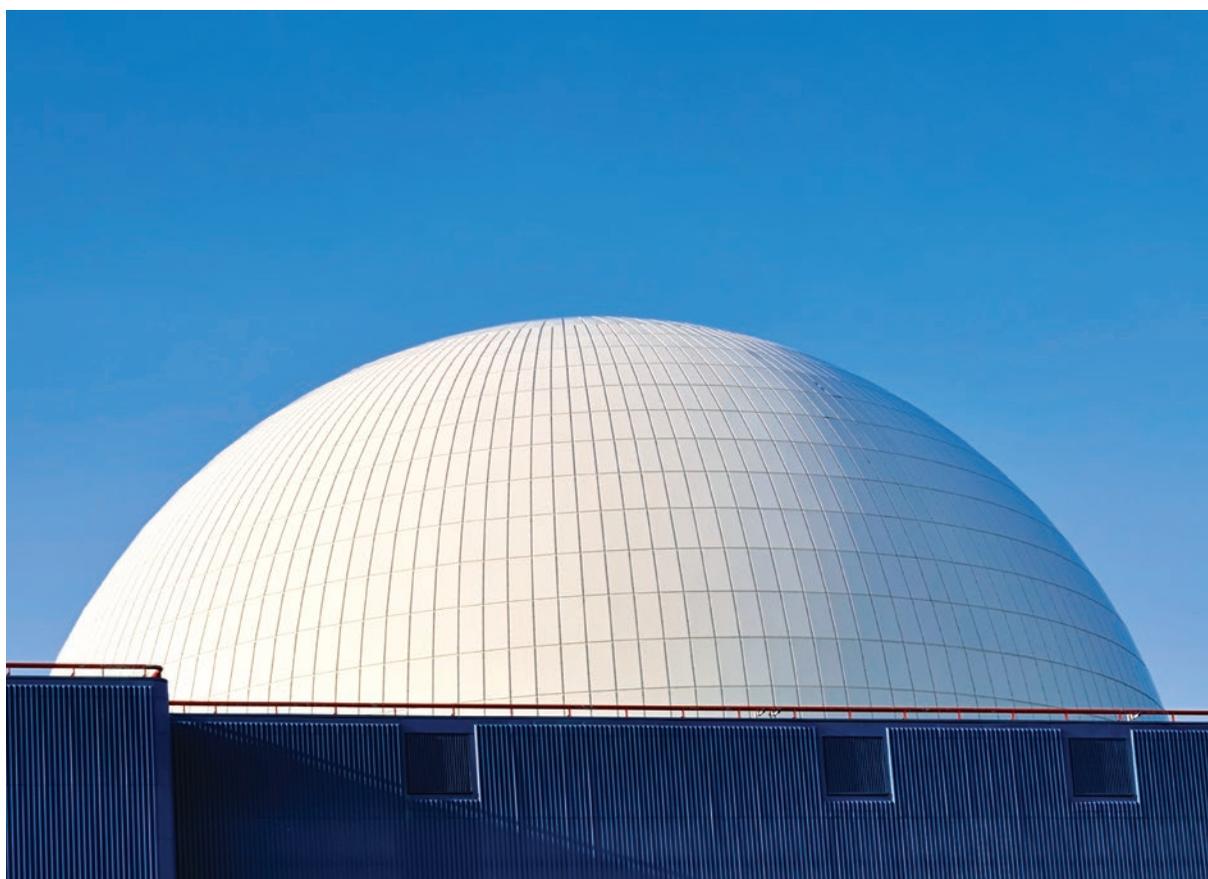
e executar as ações devidas. Em alguns países onde o programa nuclear é operado pelo governo, lapsos de segurança são frequentemente ignorados pelos reguladores [47] [48].

EUA

A partir da década de 1950, a produção de eletricidade a partir de energia nuclear foi aberta para a indústria privada, e hoje os EUA são o país do mundo com maior participação privada no setor nuclear, mas o governo é fortemente envolvido no setor. O governo é responsável pelo licenciamento nuclear e ambiental, financiamento de

P&D, planejamento energético e, desde 1982, assumiu a responsabilidade pelos rejeitos gerados nas usinas nucleares do país. Já o setor privado é, em geral, responsável pela construção e operação das usinas. Quase todos os reatores em operação no país pertencem a proprietários privados. A regulação da energia nuclear nos EUA é feita pela **NRC** (Comissão Reguladora Nuclear), agência governamental independente (pertence ao governo, mas possui autonomia). É dirigida por 5 comissários com mandatos de 5 anos, escolhidos

pelo Presidente da República e aprovados pelo Senado. Foi estabelecida em 1974 e é responsável pela regulação e licenciamento de toda atividade nuclear no país. Visando acelerar o processo de instalação de novas usinas, a NCR criou em 2003 uma certificação da tecnologia, significando que o modelo de reator que for aprovado após extensa análise pode ser construído em qualquer lugar dos EUA (após avaliação específica do local), precisando receber apenas uma Licença Combinada de Construção e Operação²⁷.



27. *Combined Construction and Operating Licence* (COL, na sigla em inglês)

FRANÇA

É o segundo maior gerador e o país com maior dependência da energia nuclear do mundo. O programa nuclear francês foi desenvolvido rapidamente como uma resposta às crises do petróleo da década de 1970. Em 2006, foi criado um órgão governamental independente, a **ASN** (Autoridade de Segurança Nuclear), responsável pela regulação e segurança nuclear. A ASN é dirigida por 5 comissários com mandatos de 6 anos – três nomeados pelo Presidente da República, um pelo presidente do Senado e um pelo presidente da Assembleia Nacional Francesa. A pesquisa no país é feita por outro órgão, a IRSN (Instituto de Proteção Radiológica e Segurança Nuclear). A empresa mais atuante no setor nuclear francês é a estatal Areva, fundada em 2001 e responsável pela mineração de urânio, construção de reatores e desenvolvimento de novas tecnologias. A EDF (*Electricité de France*), também estatal, é a maior concessionária de energia elétrica nuclear do mundo e é responsável pela operação dos reatores franceses. A Areva tem passado por dificuldades e apresentou perdas financeiras de 2 bilhões de euros no ano de 2015.

JAPÃO

O país possui a terceira maior capacidade instalada do mundo, mas seus reatores estiveram desligados entre 2012 e 2015. Antes do acidente, a regulação era feita por três diferentes agências, o que dificultou a coordenação de respostas ao acidente entre eles. Uma dessas era a Agência de Segurança Nuclear e Industrial (NISA), que fa-

zia parte do Ministério de Economia, Comércio e Indústria (METI), também responsável por promover o uso da energia nuclear. O modelo regulatório foi revisto em 2012 e resultou na criação da **NRA** (Autoridade de Regulação Nuclear), 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 [49]. A NRA foi avaliada pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) como sendo um órgão regulador independente e transparente. Até março de 2016, quatro unidades já haviam sido religadas, após passar por sua avaliação, e as demais devem ser nos próximos anos.

ALEMANHA

A decisão da Alemanha de desligar todos os seus reatores nucleares foi tomada antes do acidente de Fukushima, que acabou apenas acelerando essa política [47]. Assim como a França, o apoio a essa fonte surgiu com a crise do petróleo, mas diminuiu no país após o acidente de Chernobyl, fazendo com que nenhuma nova usina fosse comissionada após 1989. Após o desligamento de 8 reatores em 2012, a participação da nuclear tem se mantido relativamente constante em torno dos 16% [50]. O Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMUD) é o responsável pela criação 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.



Perspectivas para o Brasil

A opinião pública tem ficado a margem dos problemas enfrentados pelos projetos nucleares brasileiros, e talvez por isso também não tenha a oportunidade de conhecer os desafios superados pela nossa indústria e o reconhecimento internacional da nossa capacidade de operação segura destas usinas.

Para uma discussão equilibrada devem ser consideradas legítimas as preocupações da sociedade com a proliferação, segurança operacional, redução de custo e gerenciamento de resíduos, bem como a necessidade de aprimoramento do arcabouço legal. Da mesma forma, no entanto, fatos relativos ao setor devem ter igual espaço nesta discussão:

- A opção nuclear pode ter uma importante contribuição para complementar o sistema elétrico brasileiro e apoiar os esforços de desenvolvimento e de crescimento, uma vez que é uma fonte de energia economicamente competitiva, capaz de ser instalada próxima à demanda, com baixa intensidade no uso de água e solo, e praticamente livre de emissões de carbono;
- O país possui no seu subsolo uma fonte energética confiável e abundante, cujo domínio da tecnologia de beneficiamento foi obtido através do esforço de cientistas brasileiros;
- O Estado do Rio de Janeiro, há mais de uma década, tem atendida parte significativa da sua demanda energia elétrica, de forma segura e confiável, por duas usinas nucleares que operam dentro de altos índices de desempenho internacionais, resultado da alta qualificação dos profissionais que atuam no setor;
- A opção nuclear é uma forte indutora de indústria de alta tecnologia, aspecto altamente desejável para a economia brasileira;

A Opção Nuclear como Indutora de Indústria de Alta Tecnologia

As opções de fontes, projetadas para sustentar o desenvolvimento econômico, devem ser decididas em termos de componentes econômicas, ambientais e políticas, nos contextos local, nacional e internacional. Os parâmetros para a avaliação e decisão devem levar em consideração aspectos globais das alterações climáticas, dos compromissos com metas de impacto ambiental, instabilidades políticas regionais e vulnerabilidade econômica frente aos custos e escassez de combustíveis e de aceitação pública.

A história recente mostra que países em desenvolvimento que empreenderam programas de geração elétrica de fonte nuclear em escopo abrangente, foram beneficiados pela diversificação e ampliação do setor industrial de alta tecnologia.

Em meados da década de 1970 o Brasil e a Coreia do Sul possuíam os mesmos indicadores econômicos e ambos os países se decidiram por empreender um amplo programa nuclear, visando à geração de energia elétrica. O programa sul-coreano foi implementado na sua totalidade, trazendo como resultados a disponibilidade de um parque energético confiável e competitivo, apresentando paralelamente um forte avanço tecnológico produzido pela opção nuclear, que requer infraestrutura, formação de recursos humanos, processos gerenciais e tecnologia de ponta. Já o Brasil, em virtude de pressões e indecisões na implementação do seu programa nuclear, teve prejuízos provocados pela exploração em pequena escala dos recursos humanos e infraestrutura criada, além de um baixo aproveitamento de uma fonte energética primária abundante, barata e disponível no subsolo brasileiro [51].

Nos últimos 35 anos, a Coreia do Sul tornou-se uma referência de ações estratégicas apropriadas que levaram o país ao seleto grupo de países desenvolvidos. Em uma trajetória similar à da Coreia do Sul, a China constitui uma referência onde as ações projetadas para os próximos anos, deverão retirar a nação mais populosa do mundo da condição de pobreza para a condição de desenvolvimento autossustentado. Em fevereiro de 2016, os líderes chineses declararam que a estratégia da China consiste em basear o futuro crescimento econômico na inovação e se tornar um fornecedor global de produtos de alta tecnologia [52]. A estratégia é utilizar o avanço da tecnologia nuclear como uma das novas marcas de exportação de alta tecnologia da China, como ocorreu anteriormente com as ferrovias.

Exemplos como os da Coreia do Sul e China mostram que escolhas de projetos de infraestrutura possuem diferentes impactos na economia, em função da amplitude e sofisticação das suas cadeias de valor.

A evolução do programa nuclear brasileiro depende de apoio social e político. Para garantir esse apoio é importante que as vantagens e desvantagens dessa tecnologia sejam estudadas e apresentadas, considerando que:

- i. A competitividade da tecnologia nuclear em relação a outras fontes de energia de base como o gás natural deve ser calculada, levando em conta a elevada demanda de capital e os decorrentes riscos, inerentes aos projetos de usinas nucleares;
- ii. A regulação brasileira deve evoluir para que estes riscos sejam mitigados, possibilitando que o financiamento de novas usinas conte com a participação da iniciativa privada;
- iii. O Brasil precisa de normas de segurança específicas para os novos projetos, garantindo que as evoluções tecnológicas, resultantes de lições aprendidas dos acidentes, sejam aplicadas.



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 ProNuclear, 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 Eletrobras), 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 por falta de verbas.

2020: Prazo estimado pela ANEEL para a entrada em operação de Angra 3.

REGULAÇÃO BRASILEIRA

No Brasil, todas as atividades relacionadas à energia nuclear são entendidas como sendo de competência exclusiva da União. A utilização e comercialização de radioisótopos para pesquisa e usos médicos, agrícolas e industriais podem ser feitas por entidades privadas num regime de permissão²⁸. As principais instituições responsáveis pelo desenvolvimento das atividades nucleares no país são a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e a Eletronuclear (subsidiária da Eletrobras para a energia nuclear, responsável pela construção e operação das usinas).

A CNEN é uma autarquia federal, com autonomia administrativa e financeira²⁹, subordinada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que exerce as funções de orientação, planejamento, supervisão, fiscalização e pesquisa científica³⁰. Uma de suas competências é expedir licenças³¹ e autorizações relativas a instalações nucleares e a verificação do atendimento aos requisitos legais e regulamentares relativos à energia nuclear. Além de exercer estas funções³², a CNEN também é responsável

por promover e incentivar a utilização da energia nuclear, e é acionista majoritária da INB, responsável pela industrialização do combustível nuclear, desde a mineração até a produção dos elementos combustíveis, e da Nuclebras Equipamentos Pesados S.A. (NUCLEP), empresa que produz equipamentos pesados especialmente, mas não apenas, para a indústria nuclear (sem lidar diretamente com o manejo de materiais nucleares).

A Convenção de Segurança Nuclear, da qual o Brasil é signatário, foi convocada pela IAEA em 1994. O acordo entrou em vigor no país em 1998³³, e define que deve haver “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”. O princípio da independência regulamentar é fundamental para o bom desenvolvimento do setor e requer uma vigilância para garantir que ele seja mantido [53].

No caso brasileiro, merece destaque o escopo das atividades da CNEN, visto que esta é responsável simultaneamente pela regulação, licenciamento e fiscalização de instalações nu-

28. Constituição Federal, art. 21, inciso XXIII, alínea b.

29. Lei 4.118/1962, alterada pelas Leis 6.189/1974 e 6.571/1978.

30. Lei 6.189/1974, alterada pela Lei 7.781/1989.

31. O licenciamento nuclear é o processo através do qual, por meio de avaliações e verificações das condições de segurança de uma instalação, a CNEN concede, modifica, limita, prorroga, suspende ou revoga uma licença ou autorização de construção, operação ou descomissionamento da instalação nuclear.

32. Decreto 5.667/2006.

33. Decreto 2.648/1998.

clear; pelo desenvolvimento científico e tecnológico, por meio de seus institutos de pesquisa (CDTN, IEN, IPEN e IRD); além de controlar a INB e a NUCLEP.

A criação de uma agência nacional independente que cumpra o papel de órgão regulador, licenciador e fiscalizador, institucional e financeiramente independente deve fazer parte das discussões sobre o modelo institucional nuclear, não só pelo fato do Brasil estar comprometido com a Convenção Internacional de Segurança Nuclear, mas também pela criação de um ambiente institucional que apresente maior segurança ao empreendedor, no caso da expectativa de participação da iniciativa privada.

ASPECTOS JURÍDICOS DA REGULAÇÃO

A Constituição Federal (CF) de 1988 aborda as atividades nucleares em seus diversos aspectos. Diante do explícito sustento legal, especialistas discutem até que ponto a legislação atual permitiria configurações de negócios que considerem a participação privada em alternativa ao modelo atual, no qual o Estado assume todos os riscos empresariais de um projeto de geração de energia nuclear.

Cabe ressaltar que este trabalho não tem a intenção de apresentar de forma detalhada as

diferentes abordagens jurídicas que levam a essas interpretações. Contudo, é importante pontuarmos o que as diferentes abordagens trazem de consequência para o desenvolvimento de novas usinas nucleares no Brasil com a participação do capital privado. As diferentes abordagens fazem necessárias alterações em disposições constitucionais (grande complexidade e custo político) ou em legislação infraconstitucional, na lei de concessões ou por meio de resoluções da ANEEL e da CNEN (menor complexidade).

Para os que defendem que a CF desautoriza de forma clara a exploração de serviços e instalações nucleares por agentes privados em regime de concessão – partindo-se do princípio que os artigos 21 e 177 instituem a geração de energia elétrica por fonte nuclear como atividade submetida ao monopólio da União – a participação privada dependeria de aprovação de Emenda Constitucional que excluiria o citado monopólio para a construção e operação de reatores nucleares para fins de geração elétrica³⁴.

Há também os que acolhem a tese de que existe uma interpretação possível da legislação que considera a participação da iniciativa privada, destacando-se a que cita apenas a operação da instalação nuclear como de competência exclusiva da União³⁵. Com base nessa interpretação, a geração e a comercialização, bem como

34. Segundo parecer emitido pelo escritório de advocacia Waltemberg, isso se daria acrescentando ao inciso XXIII do artigo 21 da CF uma nova alínea, e ao artigo 177 um § 5º.

35. Parecer emitido por Pinheiro Neto Advogados.



a própria construção da instalação nuclear, podem ser executadas pela iniciativa privada. Ainda sobre essa perspectiva, o empreendedor – selecionado por meio de leilão – estaria obrigado a contratar a União para fiscalização e operação da instalação nuclear.

Apesar de não estabelecermos aqui posicionamento por uma ou outra interpretação jurídica, consideramos possível a análise dos benefícios da participação privada na construção de instalações de geração de energia nuclear. Como visto anteriormente, a Matriz Energética Brasileira prescinde de fontes de geração firme na base, e a participação privada permite maior

agilidade em processos de contratação e traz flexibilidade em negociações com parceiros financeiros, reduzindo riscos do empreendedor e garantindo projetos economicamente viáveis.

Embora sejam claros os benefícios advindos da participação da iniciativa privada, especialmente no que se refere à agilidade da atuação, é indispensável enfatizar pontos de atenção para que esta abertura seja precedida de procedimentos que garantam o desenvolvimento dos projetos de acordo com normas internacionais atualizadas, e em modelo econômico exequível para todo seu ciclo de vida. Entre outros, destacamos os seguintes pontos de atenção:

Disposições constitucionais que citam, entre outros, a atividade de exploração de instalações nucleares como monopólio da União.

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, atendidos os seguintes princípios e condições:

- a. toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional;
- b. sob regime de permissão, são autorizadas a comercialização e a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos médicos, agrícolas e industriais³⁶;
- c. sob regime de permissão, são autorizadas a produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida igual ou inferior a duas horas³⁷;
- d. a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa³⁸;

Art. 22. Compete privativamente à União legislar sobre:

XXVI - atividades nucleares de qualquer natureza;

Art. 49. É da competência exclusiva do Congresso Nacional:

XIV - aprovar iniciativas do Poder Executivo referentes a atividades nucleares;

Art. 177. Constituem monopólio da União:

V - a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados, com exceção dos radioisótopos cuja produção, comercialização e utilização poderão ser autorizadas sob regime de permissão, conforme as alíneas b e c do inciso XXIII do caput do art. 21 desta Constituição Federal³⁹.

§ 3º A lei disporá sobre o transporte e a utilização de materiais radioativos no território nacional. (Renumerado de § 2º para 3º pela Emenda Constitucional nº 9, de 1995)

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

§ 6º As usinas que operem com reator nuclear deverão ter sua localização definida em lei federal, sem o que não poderão ser instaladas.

36. Redação dada pela Emenda Constitucional nº 49, de 2006.

37. Redação dada pela Emenda Constitucional nº 49, de 2006.

38. Redação dada pela Emenda Constitucional nº 49, de 2006.

39. Redação dada pela Emenda Constitucional nº 49, de 2006.

Um fator, visto por alguns especialistas do setor como a causa principal dos atrasos na construção de usinas no Brasil, é a dificuldade da participação privada no setor nuclear.

FINANCIAMENTO

Como todo projeto de infraestrutura, os projetos de geração nuclear são financiados por fundos, levantados por meio de dívidas e capital próprio de investidores e credores, os quais esperam obter resultados positivos, com a remuneração do capital empregado. Porém, além da necessidade de grandes investimentos iniciais, os projetos nucleares apresentam características específicas e perfil de risco que fazem o seu financiamento mais desafiador do que projetos de outras tecnologias de geração de energia [60].

Em projetos nucleares estão presentes riscos empresariais complexos, de grande magnitude e difíceis de serem mitigados [54]. Por conta dos elevados custos de construção, estes projetos podem sofrer acréscimos de custos de capital associados a pequenas alterações no cron-

ograma de implantação, com tempo médio de construção de sete anos. Nos países em desenvolvimento, o alto custo de implantação tem desacelerado a expansão da fonte nuclear [38]. Os custos de construção, porém, podem ser reduzidos através da instalação de mais uma unidade num mesmo sítio, pois os custos de licenciamento são divididos, os equipamentos e instalações de construção são compartilhadas, além de ganhos de experiência serem acumulados ao longo do processo [55].

Um fator, visto por alguns especialistas do setor como a causa principal dos atrasos na construção de usinas no Brasil, é a dificuldade da participação privada no setor nuclear. Empresas estatais precisam cumprir uma série de exigências da Lei 8.666/2013, que tornam o processo mais lento, aumentando os riscos do empreendimento. Atrasos nas obras desestruturam o fluxo de caixa dos projetos, tanto pelo

acrécimo nos custos de investimentos quanto pela postergação da comercialização da energia gerada – o que pode levar a necessidade de compra de energia no mercado livre. De fato, a fase de construção apresenta os maiores riscos empresariais do projeto [54]: além dos custos de financiamento, devem ser considerados custos de desmobilização de empreiteiros, multas contratuais e despesas com a manutenção dos equipamentos de alta tecnologia já entregues por fornecedores.

Esses riscos, capazes de alterar sobremaneira a viabilidade econômica de projetos de usinas nucleares, são, na maioria das vezes, externos ao projeto, de natureza política institucional ou regulatória [60]. Assim, historicamente, o modelo de financiamento pelo Estado, onde governos ou empresas estatais assumiam os riscos de construção das usinas, ganhou destaque no desenvolvimento da indústria nuclear mundial.

O final da década de 80 trouxe, porém, uma nova perspectiva para o papel do Estado no desenvolvimento de projetos de infraestrutura e o desenvolvimento sob gestão governamental de projetos de longo prazo de execução passou a ser percebido como menos eficiente. Nos EUA, a participação da iniciativa privada no setor nuclear teve início na década de 1950 e este é o hoje o país com maior geração nuclear do mundo.

Os países chamados *newcomers* – novos entrantes na inserção de energia nuclear em suas matrizes – como os Emirados Árabes, a Turquia e Belarus, têm optado por dois modelos de negócio distintos para desenvolvimento do seu parque nuclear.

Os Emirados Árabes, com grande poder econômico, optaram pela compra de toda tecnologia e construção, não pretendem se capacitarem para o desenvolvimento de qualquer parte da tecnologia, o Estado será o principal financiador. Nos casos de *newcomers* com menos disponibilidades de recursos, a estratégia adotada tem optado por projetos *Turnkey*, sendo o modelo turco ainda mais dependente de fornecedores estrangeiros. A Turquia firmou contrato com o governo russo para construção de quatro usinas em um modelo conhecido como BOOT (*Build, Own, Operate and Transfer*), prevendo que prevê que durante o período de recuperação do capital pelas empresas russas (previsto em quinze anos), a empresa turca de comercialização tem exclusividade pela energia produzida, após esse período, a Turquia passa a deter parte das ações da empresa.

Países com histórico de projetos de usinas nucleares, como o Brasil, não devem enxergar interesse em relação aos modelos de negócio adotados por novos entrantes, dado o alto potencial de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico dos projetos de usinas nucleares.

Modelo de Negócio para a Geração Nuclear no Brasil

Otávio Mielnik

O Modelo de Negócio tem particular importância para o desenvolvimento de um novo programa de geração nuclear no Brasil considerando (i) a necessidade da renovação da matriz elétrica brasileira em um quadro que garanta a diversidade das fontes de geração elétrica e a segurança de fornecimento, (ii) a participação do setor privado em um contexto de escassez de recursos e controle do gasto público, (iii) a inserção de tecnologias de geração elétrica avançadas com elevado desempenho energético e de segurança, como é o caso da Geração III+ de reatores nucleares, e (iv) a geração de benefícios socioeconômicos tanto pelo desenvolvimento das atividades relacionadas à construção e fabricação dos equipamentos, quanto pela injeção de recursos de natureza tributária, geração de novas atividades e emprego no entorno das novas usinas nucleares.

Cabe salientar que a inserção da geração nuclear na matriz elétrica só tem sentido energético e econômico no quadro de um programa de longo prazo de implantação de várias usinas. A questão central são as economias de escala que se pode auferir com a construção de uma série de usinas nucleares padronizadas. Estudo da FGV Projetos [11] demonstra que a geração nuclear é competitiva no quadro de um programa de implantação de 24 usinas, compondo uma oferta de energia elétrica segura de longo prazo e participando em 15% da matriz elétrica do Brasil em 2040 a um custo de geração de US\$64/MWh (em dólares de 2012).

Modelos de negócio para o desenvolvimento da geração nuclear diferem fundamentalmente em função dos termos de contratação e de propriedade. A estruturação desses dois

aspectos determina a alocação dos riscos e o interesse dos participantes. De modo geral, na fase inicial, em todos os países, o apoio do governo tem sido decisivo para o sucesso de um programa nuclear, tanto no plano institucional, quanto na viabilização de recursos financeiros e, mesmo quando os recursos são privados, das garantias para a implantação das usinas nucleares. Nesta matéria, cabe assinalar os modelos seguidos nos Estados Unidos e no Reino Unido.

O governo dos Estados Unidos vem aplicando procedimento relativo às garantias de financiamento com base na Section 1703 do *Energy Policy Act* (EPAAct) de 2005, aprovado pelo Congresso. A concessão de garantia de financiamento é administrada pelo Departamento de Energia (por meio de seu *Loan Guarantee Programs Office-LPO*), com recursos de mais de US\$30 bilhões a serem aplicados em programas energéticos inovadores utilizando tecnologias livres de emissão, entre os quais a implantação de usinas nucleares avançadas (Geração III+). Em fevereiro de 2014, o governo concedeu garantias de US\$6,5 bilhões ao financiamento dos reatores 3 e 4 de Vogtle (Southern Company). Em setembro de 2014, o Departamento de Energia solicitou a concessão de garantia de financiamento no valor de US\$12,6 bilhões para projetos de geração nuclear.

No Reino Unido, em 2012, o governo introduziu o 2012 *UK Guarantee Scheme* (UKGS), um programa de 40 bilhões de libras (em recursos do

Tesouro) que fornece garantia a projetos de infraestrutura, incluindo energia, e está sendo aplicado a novos projetos de geração nuclear para facilitar seu financiamento e investimento. O custo dessa garantia é função do risco e da estrutura do projeto. O dispositivo legal que permitiu a criação do UKGS foi o *Infrastructure (Financial Assistance) Act 2012*, aprovado pelo Parlamento.

OS COMPONENTES DO MODELO DE NEGÓCIO

Todos os modelos de negócio orientados ao desenvolvimento da geração nuclear contam com três fases comuns e necessárias, nas quais o governo institui regras específicas (Modelo Institucional), estabelece modalidades de apoio financeiro para a construção das primeiras usinas nucleares (Modelo de Financiamento) e define as condições de comercialização da energia gerada (Modelo de Comercialização). Apenas na quarta fase (Modelo de Capitalização), surge a diferenciação relevante entre modelos de negócio para geração nuclear, determinada pelos termos de contratação e de propriedade.

O Modelo de Negócio para o Programa de Geração Nuclear é formado por esses quatro componentes que, integrados, constituem elementos essenciais para a viabilidade e consistência do processo de implantação e operação das novas usinas nucleares no Brasil.



FASE 1

INSTITUCIONALIZAÇÃO DE UM PROGRAMA DE LONGO PRAZO DE GERAÇÃO ELÉTRICA COM BAIXO TEOR DE CARBONO (MODELO INSTITUCIONAL)

Nesta fase, tem lugar a aprovação, pelo governo federal, da construção de usinas no quadro de um Programa de Geração Nuclear, parte integrante de uma Matriz Elétrica Sustentável de Longo Prazo com baixo teor em carbono. A construção de cada usina, para a qual poderão ser formados consórcios, será precedida de um processo de Certificação Técnica da tecnologia a ser empregada. Uma vez habilitadas, as empresas (e consórcios, quando for o caso) concorrentes participarão de um leilão por tarifa mínima, que incluirá a remuneração pela construção, montagem e manutenção de cada usina.

FASE 2

DEFINIÇÃO DO REGIME DE COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA GERADA (MODELO DE COMERCIALIZAÇÃO)

O Modelo de Comercialização viabiliza a garantia, aos financiadores e aos investidores, de recebimento da receita da geração de energia elétrica nuclear sob o regime de Energia de Reserva, nos termos da Lei 12.111 (de 09/12/2009). De fato, a energia de reserva, mecanismo criado para aumentar a segurança no fornecimento de energia elétrica do SIN, integra as características da geração nuclear cujas condições de desempenho, especialmente o fator de capacidade da ordem de 90%, garantem a confiabilidade do sistema e a segurança de fornecimento. Nesse regime, a energia gerada é contratada por leilão promovido pela Aneel, direta ou indiretamente, sendo definido um cronograma para sua entrega.

FASE 3

APROVAÇÃO DE GARANTIAS DE FINANCIAMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DAS PRIMEIRAS TRÊS USINAS NUCLEARES (MODELO DE FINANCIAMENTO)

O Modelo de Financiamento determina as condições para o desenvolvimento do financiamento na modalidade de *project finance* (financiamento por projeto), reduzindo o risco para os investidores privados, justamente na fase pré-operacional, quando os riscos são mais elevados, o que tem por efeito aumentar o custo do financiamento. Neste componente do Modelo de Negócio, devem estar viabilizados os mecanismos de garantia de financiamento, tornando possível o *project finance*. Cabe assinalar a importância dessa condição, uma vez que, até fevereiro de 2016, não havia nenhuma usina nuclear no mundo que tivesse sido financiada na modalidade de *project finance*.

FASE 4

CONTRATAÇÃO E PROPRIEDADE DAS USINAS NUCLEARES (MODELO DE CAPITALIZAÇÃO)

A diferença fundamental entre os modelos de negócio orientados à geração nuclear surge quando se determinam as relações de pro-

priedade entre os agentes públicos e privados (Modelo de Capitalização). Nesse quadro, a propriedade de cada usina pode ser (i) de uma empresa pública (Modelo Estatal), (ii) de uma empresa privada (Modelo Corporativo) ou (iii) de uma associação entre empresa pública e empresa privada (Modelo Híbrido).

O Modelo de Capitalização estabelece a participação de investidores privados na formação do capital próprio (*equity*) de uma Sociedade de Propósito Especial (SPE) que venha a construir as usinas nucleares. Neste componente do Modelo de Negócio, as condições institucionais e regulatórias devem estar reunidas para permitir que o setor privado realize a construção e a montagem das usinas nucleares.

No Brasil, uma restrição, apresentada pelo artigo 21, XXIII, da Constituição Federal, veda ao setor privado a exploração de serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e o controle, pelo setor privado, da propriedade de uma usina nuclear. Para superar esta barreira, empresas privadas do setor nuclear têm considerado apropriado que seja submetida e aprovada pelo Congresso uma emenda constitucional.

A indústria nuclear considera, principalmente, três estruturas principais de contratação e propriedade:

- Construção-Propriedade-Transferência da propriedade (BOT, na sigla em inglês);
- Construção-Propriedade-Operação da usina (BOO, na sigla em inglês);
- Construção-Propriedade-Operação-Transferência da propriedade da usina (BOOT, na sigla em inglês).

Nos três casos, a construção das usinas será realizada por consórcios formados por empresas e investidores privados que concorrem em Leilão para a construção e montagem de cada usina nuclear, sendo responsáveis por prover o financiamento. O que difere fundamentalmente em cada estrutura é a operação das usinas. No primeiro caso (BOT), a operação será da Eletronuclear, tornando possível sua aplicação sem que haja mudança constitucional. Por outro lado, a implementação das duas estruturas seguintes (BOO e BOOT) requer a aprovação, pelo Congresso, de uma emenda constitucional.

Dependendo da estrutura de contratação e propriedade, serão determinados os responsáveis pela obtenção do Licenciamento (Construção, Operação e Ambiental), bem como

Comissionamento, obtenção do Combustível e Operação das Usinas Nucleares.

ALTERNATIVA 1

CONSTRUÇÃO-PROPRIEDADE-TRANSFERÊNCIA DA PROPRIEDADE DA USINA (BOT)

Neste regime, a aplicação do Modelo de Negócio prevê a construção e a propriedade do ativo por uma SPE criada com essa finalidade, ficando a operação com a Eletronuclear. A transferência da usina em algum momento no futuro para a Eletronuclear ocorrerá após a recuperação do investimento pela SPE.

ALTERNATIVA 2

CONSTRUÇÃO-PROPRIEDADE-OPERAÇÃO DA USINA (BOO)

Neste caso, um agente público ou privado – que pode ser uma empresa ou uma SPE – recebe do governo, no quadro de um processo estabelecido em lei, o direito de desenvolver, financiar, construir, ser o proprietário, comissionar, e realizar as atividades de operação e manutenção de uma usina nuclear. Esse direito, exercido e garantido durante determinado período de tempo (geralmente, o tempo

de vida útil da usina), permite que o agente público ou privado seja proprietário da usina, sendo remunerado com a receita proveniente de sua exploração e assumindo, em contrapartida, as responsabilidades e os riscos correspondentes.

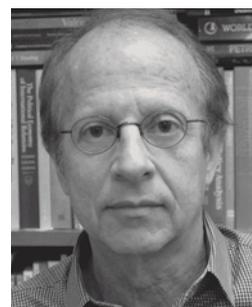
ALTERNATIVA 3 **CONSTRUÇÃO-PROPRIEDADE- OPERAÇÃO-TRANSFERÊNCIA DA PROPRIEDADE DA USINA (BOOT)**

No caso da estrutura BOOT, depois de construir, exercer a propriedade, operar e realizar a manutenção da usina nuclear, sua propriedade é transferida ao governo ainda ao longo de sua vida útil, sob condições estabelecidas em contrato entre o governo e as empresas envolvidas na implantação e desenvolvimento da usina.

MODELO DE NEGÓCIO NO QUADRO DE UM PROGRAMA DE GERAÇÃO NUCLEAR

A definição de um modelo de negócio para a geração nuclear deve integrar a evolução recente de suas características técnicas, econômicas, financeiras e institucionais, bem como à sua capacidade de atender às necessidades apresentadas para a renovação do sistema elétrico brasileiro. Cabe salientar que a inserção da geração nuclear na matriz elétrica só tem sentido energético e econômico no quadro de um Programa de Longo Prazo de Geração Nuclear. De fato, a construção de uma série de usinas nucleares permitirá a realização de economias de escala e a redução no custo de investimento das usinas subseqüentes à primeira por vários fatores, tais como (1) diluição de custos fixos em todas as unidades do programa, (2) partilha de serviços técnicos e infraestrutura e (3) ganhos de produtividade na fabricação de componentes e subcomponentes padronizados e com organização planejada de produção.

Otávio Mielnik – Coordenador de Projetos da FGV Projetos. Doutor em Economia da Energia, Institut d’Economie et de Politique de l’Energie, Université de Grenoble. Trabalho de Pós-Doutorado no Energy and Resources Group, University of California, Berkeley. Tem trabalhado principalmente com economia, política, regulação e gestão empresarial das indústrias de petróleo, gás natural, geração nuclear, hidroeletricidade, geração solar, eólica e biocombustíveis.



Considerações Finais

O Brasil ainda carece de uma estratégia energética de longo prazo realmente comprometida com o aumento da diversidade de fontes, com base em paradigmas de segurança, não só energética, mas também econômica e ambiental. A estrutura de planejamento, que ora prioriza a hidroeletricidade e coloca nas demais fontes o papel de complementariedade, deve considerar de forma integrada o potencial de desenvolvimento econômico e geração de renda das diferentes fontes e a independência de longo prazo na capacidade de suprimento, sem que seja necessário abrir mão do controle de emissões e da sustentabilidade ambiental.

A energia nuclear tem características de projeto muito específicas, e o planejamento da expansão da sua participação na matriz deve prever ganhos de escala, ou seja, o país só se beneficiará com o desenvolvimento de uma cadeia produtiva, com níveis globais de competitividade, e com uma curva decrescente de custos de investimento, quando decidir pelo desenvolvimento de um Programa Nuclear de continuidade mínima.

Questões de ordem tecnológica, jurídica, institucional e econômica, devem ser desmistificadas e apresentadas à sociedade, mas dependem de uma estratégia, um direcionamento

por parte dos tomadores de decisão responsáveis pela política energética de longo prazo.

Neste estudo, buscamos analisar a Energia Nuclear sem vieses, apresentando pontos de divergência que, de alguma forma, têm bloqueado a renovação do Programa Nuclear Brasileiro. Foram identificados pontos prioritários a serem tratados:

- Criação de um ambiente jurídico regulatório estável, que viabilize a participação da iniciativa privada;
 - A redefinição da estrutura institucional, com a efetiva divisão das atividades de desen-
-



volvimento tecnológico, fomento, regulação e fiscalização;

- A mudança do paradigma de planejamento energético de longo prazo no Brasil, com a inclusão de aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica; e
- Criação de diretrizes para entrada de tecnologias da Geração III+ no Brasil.

Cabe lembrar que a energia nuclear tem um potencial de geração de energia de base, em nenhum momento competindo com as fontes

renováveis, que também são desejáveis numa matriz energética diversificada, mas que assumem um papel diferenciado.

Concluimos neste trabalho que a Energia Nuclear de fato pode contribuir para a expansão racional da matriz energética brasileira, possibilitando um aumento do consumo e melhoria da qualidade de vida da população, de modo que as oportunidades para a diversidade de fontes energéticas no Brasil sejam aproveitadas. Para tanto, é preciso que os desafios aqui apresentados sejam estudados e tratados com maior profundidade no futuro e analisados de forma objetiva.

Lista de Siglas

ABWR – BWR avançado

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASN – Autoridade de Segurança Nuclear da França

BfS – Instituto Federal de Proteção contra a Radiação da Alemanha

BIG – Banco de Informações de Geração

BMUD – Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear da Alemanha

BWR – reator a água fervente

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CF – Constituição Federal

CMO – Custo Marginal de Operação

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear do Brasil

COP21 – 21ª Conferência da ONU sobre Mudança Climática

EDF – *Electricité de France*

EIA – *US Energy Information Agency*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPR – PWR Europeu

ESBWR – BWR Simplificado e Econômico

EUA – Estados Unidos da América

FIOCRUZ – Fundação Oswaldo Cruz

FNR – reator a nêutrons rápidos

GCR – reator refrigerado a gás

GEE – gases do efeito estufa

GFR – reator rápido refrigerado a gás

HLW – resíduo altamente radioativo

IAEA – Agência Internacional de Energia Atômica

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IEA – Agência Internacional de Energia

IEN – Instituto de Engenharia Nuclear

INB – Indústrias Nucleares do Brasil

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

INPO – Instituto de Operadores de Reactores Nucleares dos EUA

IRSN – Instituto de Proteção Radiológica e Segurança Nuclear

LACE – custo evitado nivelado de eletricidade

LCOE – custo nivelado de eletricidade

LFR – reator rápido refrigerado a chumbo

LWGR – reator a água leve moderado a grafite

LWR – reator a água leve

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil

METI – Ministério de Economia, Comércio e Indústria do Japão

MME – Ministério de Minas e Energia

MOX – óxido misto de urânio e plutônio

MSR – reator de sal fundido

NEA – *OECD Nuclear Energy Agency*

NISA – Agência de Segurança Nuclear e Industrial

NRA – Autoridade de Regulação Nuclear do Japão

NRC – Comissão Reguladora Nuclear dos EUA

NUCLEP – Nuclebras Equipamentos Pesados S.A.

OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU – Organização das Nações Unidas

PDE – Plano Decenal de Expansão

PEN – Plano da Operação Energética

PHWR – reator a água pesada pressurizada

PIB – produto interno bruto

PRIS – *Power Reactor Information System*

PWR – reator a água pressurizada

SCWR – reator supercrítico refrigerado a água

SFR – reator rápido refrigerado a sódio

SIN – Sistema Interligado Nacional

SPE – Sociedade de Propósito Específico

TCU – Tribunal de Contas da União

URSS – União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

VHTR – reator a temperatura muito elevada

WANO – Associação Mundial de Operadores Nucleares

Referências Bibliográficas

- [1] IEA, "Key electricity trends," Paris, França, 2015.
- [2] PRIS/IAEA, "Power Reactor Information System," 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>. [Acesso em 16 fevereiro 2016].
- [3] IAEA, "Uranium 2014: resources, production and demand," Paris, França, 2014.
- [4] NEI, "6th biennial national survey of US nuclear power plant neighbors," Chevy Chase, EUA, 2015.
- [5] BIG/ANEEL, "Capacidade de Geração do Brasil," [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. [Acesso em 16 fevereiro 2016].
- [6] ONS, "Plano da operação energética 2014/2018," Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [7] ONS, "Plano da operação energética 2013/2017," 2013.
- [8] Eletrobras, "Mapa SIPOT," Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [9] EPE, "Plano decenal de expansão de energia 2024," Brasília, Brasil, 2015.
- [10] CCEE, "Relatórios InfoMercado," 2009-2015.
- [11] FGV Projetos, "O futuro energético e a geração nuclear," São Paulo, 2013.
- [12] MME, "Capacidade Instalada de Geração Elétrica - Brasil e Mundo (2014)," Brasília, Brasil, 2015.
- [13] EPE, "Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2015," [Online]. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricaporclasse\(regi%C3%B5ese-subsistemas\)%E2%80%932011-2012.aspx?CategoriaID=](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricaporclasse(regi%C3%B5ese-subsistemas)%E2%80%932011-2012.aspx?CategoriaID=). [Acesso em 18 fevereiro 2016].
- [14] ONS e EPE, "Previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2016-2020," Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [15] EPE, "Nota técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050," Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [16] IEA, "Key world energy statistics 2015," Paris, França, 2015.
- [17] M. G. d. Silva e L. d. S. Guimarães, "Uso do Índice de Desenvolvimento Humano como instrumento de projeção de demanda de energia elétrica," *Economia e Energia*, vol. 86, 2012.
- [18] MME, "Ranking mundial de energia e socio-economia," Brasília, Brasil, 2015.
- [19] EPE, "Anuário estatístico de energia elétrica," Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [20] InterAcademy Council, "Lighting the way toward a sustainable energy future," Amsterdã, Holanda, 2007.

- [21] EIA, "Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook 2015," Washington, EUA, 2015.
- [22] D. L. Romeiro, E. d. Almeida e L. Losekan, "A escolha de tecnologias de geração elétrica depacháveis versus intermitentes e o caso brasileiro," *5th Latin American Energy Economics Meeting*, 2015.
- [23] NREL, "Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation," Denver, EUA, 2013.
- [24] World Nuclear Association, "Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources," 2011.
- [25] NEA/OECD, "Technology roadmap update for generation IV nuclear energy systems," Paris, França, 2014.
- [26] T. Srinivasan e T. G. Rethinaraj, "Fukushima and thereafter: Reassessment of risks of nuclear power," *Energy Policy*, vol. 52, 2013.
- [27] World Nuclear Association, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/overview/the-many-uses-of-nuclear-technology.aspx>. [Acesso em 01 março 2016].
- [28] M. Siegrist, B. Sütterlin e C. Keller, "Why have some people changed their attitudes toward nuclear power after the accident in Fukushima?," *Energy Policy*, vol. 69, 2014.
- [29] B. Barré, "Third generation nuclear plants," *Comptes Rendus Physique*, vol. 13, 2012.
- [30] World Nuclear Association, "Chernobyl Accident, 1986," 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident/>. [Acesso em 17 dezembro 2015].
- [31] GRS, "The accident and the safety of RBMK-Reactors," 1996.
- [32] OMS, "Health Risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami," Genebra, Suíça, 2013.
- [33] MIT, "Technical lessons learned from the Fukushima-Daichii accident and possible corrective actions for the nuclear industry: an initial evaluation," Cambridge, EUA, 2011.
- [34] ABDAN, "Angra 3 trará avanços estruturais e tecnológicos," *Atividades Nucleares*, vol. 34, 2012.
- [35] NEA-OECD, "Five years after the Fukushima Daiichi accident," Paris, França, 2016.
- [36] J. Conca, Forbes, 06 outubro 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#1c5534d749d2>.
- [37] OMS, "Reducing global health risks," Genebra, Suíça, 2016.
- [38] J. R. Lovering, A. Yip e T. Nordhaus, "Historical construction costs of global nuclear power reactors," *Energy Policy*, vol. 91, 2016.
- [39] IAEA, "Nuclear technology review," Viena, Áustria, 2015.
- [40] MRS Estudos Ambientais Ltda, "Relatório de Impacto Ambiental - RIMA da unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto," Angra, Brasil, 2005.
- [41] World Nuclear Association, "US Nuclear Fuel Cycle," 2016. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle.aspx>. [Acesso em 05 março 2016].

- [42] IEA, "Technology roadmap - nuclear energy," Paris, França, 2015.
- [43] World Nuclear Association, "Nuclear power in the world today," 2016. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>. [Acesso em 16 fevereiro 2016].
- [44] World Nuclear Association, "Nuclear power in Japan," 2016. [Online]. Disponível em: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>. [Acesso em 10 março 2016].
- [45] World Nuclear Association, "Research Reactors," 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors.aspx>. [Acesso em 06 março 2016].
- [46] World Nuclear Association, "Nuclear power in the USA," 2016. [Online]. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>. [Acesso em 06 março 2016].
- [47] T. Srinivasan e T. G. Rethinaraj, "Fukushima and thereafter: Reassessment of risks of nuclear power," *Energy Policy*, vol. 52, 2013.
- [48] S. Thomas, "What will the Fukushima disaster change?," *Energy Policy*, vol. 45, 2012.
- [49] NRA, "Enforcement of the new regulatory requirements for commercial nuclear power reactors," Tóquio, Japão, 2013.
- [50] BMUB, "Nuclear regulatory issues and main developments in Germany," 2015.
- [51] M. S. Dias e J. R. L. d. Mattos, "Nuclear option for a higher sustainable economic growth," *International Nuclear Atlantic Conference*, 2007.
- [52] J. Wübbeke e G. Ting, "China's nuclear industry goes global," *The Diplomat*, Berlim, Alemanha, 2016.
- [53] OECD-NEA, "Five years after the Fukushima Daiichi accident," Paris, França, 2016.
- [54] P. Warren, "Managing risk allocation in nuclear power projects' EPC contracts," 2016 Technical Meeting on Topical Issues in the Development of Nuclear Power Infrastructure, 2016.
- [55] OECD-NEA, "Reduction of capital costs of nuclear power plants," Paris, França, 2000.
- [56] NEI, "Nuclear energy - powering sustainable economies worldwide," Washington, EUA, 2010.
- [57] C. F. Alvim, F. Eidelman, O. Mafra e O. C. Ferreira, "Energia nuclear num cenário de trinta anos," *Estudos Avançados*, vol. 21, 2007.
- [58] FGV Energia, "Energias renováveis complementares," 2015.
- [59] World Nuclear Association, "Three Mile Island Accident," 2012. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>. [Accessed 15 janeiro 2016].
- [60] IFRI, "Financing nuclear power plant projects," Paris, França, 2015.

Mantenedores

Empresas que acreditam e investem em pesquisa para o desenvolvimento do Setor Energético Brasileiro.

A **FGV Energia** agradece a seus **Mantenedores** o apoio dedicado às suas pesquisas e publicações.



Usina Hidrelétrica de Furnas
Resende - RJ

Transparência & sustentabilidade

**Furnas representa um complexo de 19 Usinas Hidrelétricas,
68 subestações e 43 parques eólicos.**

- 40% da Energia do Brasil passa por Furnas.
- Energia para mais 60% dos domicílios brasileiros.
- 24.000 km de linhas de transmissão que interligam o Brasil.
- 100% na geração de energia limpa para o Brasil.

NA NATUREZA, NADA SE PERDE. TUDO SE TRANSFORMA.

ITAIPU GERA MAIS DO QUE A ENERGIA LIMPA QUE VEM DAS ÁGUAS DO RIO PARANÁ. Desenvolve também várias iniciativas na área de energias renováveis, como a utilização do biometano obtido a partir dos dejetos de animais e de resíduos orgânicos das propriedades rurais da região. Com isso, combate as emissões de gases do efeito estufa, protege a natureza ao evitar que dejetos cheguem aos rios e proporciona uma alternativa de renda aos produtores locais, além de desenvolver a tecnologia dos veículos movidos com esse biocombustível. Hoje, Itaipu já conta com 36 deles e, em breve, ampliará ainda mais a sua frota a biometano. Resultado da economia já comprovada e fator de geração de renda e desenvolvimento sustentável, para todo o seu território de atuação.



Para saber mais, acesse www.ciblogas.org

Mantenedores FGV Energia





www.fgv.br/energia