



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO



PNE 2050

PLANO NACIONAL DE ENERGIA



VERSÃO PARA
CONSULTA PÚBLICA



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Energia Nuclear

Conforme pode ser verificado no *Power Reactor Information System (PRIS)* da *International Atomic Energy Agency - IAEA*, a energia nuclear teve forte crescimento no mundo a partir dos anos 1950 até alcançar o patamar em torno de 400 reatores em operação no final dos anos 1980 e uma capacidade operacional superior a 300 GW, muito impulsionada por políticas de segurança energética para lidar com os choques do petróleo. Nos anos 1990 e 2000, verificou-se uma relativa estagnação do total de reatores em operação (de 418 em 1989 até um máximo de 438 em 2002), ainda que a capacidade operacional permanecesse se ampliando até o patamar de 370 GW. Tal estagnação da indústria nuclear no mundo encontra-se relacionada, em boa medida, aos efeitos sobre a aceitabilidade social decorrentes dos acidentes de Three Mile Island (nos EUA em 1979) e Chernobyl (na extinta União Soviética, hoje Ucrânia, em 1986), mas também do contrachoque do petróleo (1986) e da maior competitividade do gás natural (anos 1990, na Europa e nos EUA). Já nos anos 2010, o acidente de Fukushima (no Japão, em 2011) e o desligamento temporário de todas as usinas nucleares japonesas fez com que o patamar de reatores em operação no período caísse para um nível abaixo de 400 reatores, o qual só foi novamente alcançado em 2016. Em março de 2020, havia 443 reatores em operação e uma capacidade operacional de 391 GW, distribuídos por 31 países. Em 2019, 6 novas usinas foram conectadas à rede. Nos últimos dez anos, os novos empreendimentos termonucleares têm se localizado majoritariamente na Ásia.

A tecnologia nuclear pode ter papel destacado nos serviços de abatimento de emissões de gases de efeito estufa, bem como ampliar a resiliência e a robustez dos sistemas elétricos na transição energética, dadas as perspectivas progressivamente significativas de participação de fontes renováveis não-despacháveis ou com alta variabilidade de fornecimento. Atualmente a energia nuclear é responsável por 10% da produção global de energia elétrica e é a segunda maior fonte de energia de baixo carbono no mundo, atrás apenas da hidroeletricidade. Adicionalmente, ainda que seja imediatamente associada à geração de eletricidade (seu uso comercial em maior escala), tem um amplo leque de produtos e serviços relevantes para outros setores, tais como: medicina nuclear, radioisótopos, irradiação de alimentos, controle de pragas, monitoramento de erosão de solos, marcadores industriais, fornecimento de vapor residual (calor de processo), dessalinização, geração de hidrogênio, defesa (submarino com propulsão nuclear), etc.

Apesar da ocorrência restrita de eventos de falhas e danos associados ao uso dessa tecnologia, observou-se a ampliação das regulações de segurança de construção e a operação de usinas termonucleares em todo mundo. Por um lado, existe uma comunidade internacional voltada ao aprimoramento regulatório e à fiscalização mútua entre países (através de *peer review*), e observa-se um crescente aperfeiçoamento da gestão operacional das usinas. Além disso, a tecnologia de reatores e de segurança das usinas teve significativa evolução. Ainda cabe citar a perspectiva de continuidade da evolução tecnológica durante as próximas décadas, abarcando as dimensões de segurança, eficiência e adaptação à operação conjunta às fontes variáveis. Por outro lado, a complexidade dos novos projetos e as novas normas de segurança e licenciamento resultaram na ampliação do tempo de construção e ao crescimento dos custos de investimento de novos projetos termonucleares (*cost escalations*). Ademais, tais condicionantes também conduziram os projetos termonucleares a custos efetivos de projeto superiores aos previstos (*cost overruns*), dificultando, por isso, o acesso ao financiamento para novos projetos de energia nuclear. Parte desses sobrecustos é atribuída à construção das unidades “*first of a kind*” (FOAK), isso é, as primeiras usinas de determinado tipo a serem construídas. Nesse caso, enquadram-se as usinas AP-1000 construídas nos USA (4) e China (4), as usinas EPR construídas na França, Finlândia e China (uma em cada um desses países).

Ressalte-se que se observa uma tendência internacional de construção em paralelo de duas usinas lado a lado, defasadas em 18 a 24 meses, o que contribui para economias no custo de construção (CAPEX), pelo uso compartilhado de toda a infraestrutura de canteiro e mão de obra, bem como para a evolução ao longo da curva de aprendizagem. Isso consiste na aplicação do conceito de construção de reatores em série ou “*nth-of-a-kind*” (NOAK).

Recentemente, o setor elétrico também tem assistido em todo o mundo a um processo de inovações tecnológicas na geração elétrica a fontes renováveis como a eólica, a solar e a biomassa (incluindo biogás, biometano e rejeitos sólidos urbanos), bem como em armazenamento de energia. Esses fatos acrescentam pressão competitiva sobre novos empreendimentos termonucleares, face aos custos associados às respectivas tecnologias, mas também trouxeram oportunidades para a indústria nuclear, ao oferecer uma alternativa de atendimento da demanda dos sistemas elétricos por capacidade. Assim, quando mercados de capacidade e de carbono forem estruturados (o que já ocorre em alguns

países), as usinas termonucleares poderão vender serviços de capacidade e de abatimento de carbono, o que contribuirá para melhorar as análises custo-benefício de novos empreendimentos. O mesmo se aplica a toda a cadeia industrial nuclear, sendo necessário desenvolver e ampliar outros mercados associados à tecnologia nuclear como medicina nuclear, radioisótopos, controle de pragas, irradiação de alimentos, marcadores de erosão, defesa (submarino com propulsão nuclear), dessalinização, geração de hidrogênio, etc.

No Brasil, esses condicionantes internacionais também se verificaram, tornando desafiadora a expansão termonuclear e a consolidação de um complexo industrial que provesse os amplos serviços da tecnologia nuclear. Não obstante, o Brasil possui consideráveis recursos de urânio, ainda que grande parte do território nacional não tenha sido prospectado. O País domina toda a tecnologia do ciclo do combustível nuclear, desde a mineração até a montagem do elemento combustível. Atualmente, uma única etapa do ciclo do combustível (a conversão e parte do enriquecimento) tem sido realizada no exterior por questões de escala. Adicionalmente, se desenvolvem no Brasil pesquisas em reatores e aplicações da energia nuclear, tais como o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) e o submarino com propulsão nuclear (SN-BR).

O País tem duas usinas nucleares (Angra I e Angra II) em operação e uma em construção (Angra III), com previsão de início da operação comercial em janeiro de 2026. Apesar dos condicionantes desafiadores para a geração termonuclear no mundo e no Brasil, com incertezas sobre o aproveitamento de seu potencial, há também novas perspectivas para a energia nuclear associadas a seu papel em um cenário com significativa restrição de carbono e alta participação de fontes renováveis não despacháveis, bem como ao desenvolvimento de novos negócios (inclusive no setor elétrico) e outras aplicações da tecnologia nuclear.

Políticas em Vigor para o Setor de Energia Nuclear

A Política Nuclear Brasileira (PNB), estabelecida pelo Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro 2018, consolida um conjunto de diretrizes norteadoras, com a finalidade de orientar o planejamento, as ações e as atividades nucleares e radioativas no País, em observância à soberania nacional, com vistas ao desenvolvimento, à proteção da saúde humana e do meio ambiente. Adicionalmente, elenca 19 objetivos gerais para a área nuclear, 5 objetivos específicos do setor de mineração nuclear e 7 objetivos específicos relativos à indústria do setor nuclear.

Entre esses objetivos destaquem-se:

- *preservar o domínio da tecnologia nuclear no País;*
- *atender às decisões futuras do setor energético quanto ao fornecimento de energia limpa e firme, por meio da geração nucleoeletrônica;*
- *garantir o uso seguro da tecnologia nuclear e fortalecer as atividades relacionadas com o planejamento, a resposta a situações de emergência e eventos relacionados com a segurança nuclear e a proteção física das instalações nucleares;*
- *promover a conscientização da sociedade brasileira, de forma transparente, a respeito dos benefícios do uso da tecnologia nuclear e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura;*
- *fomentar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação da tecnologia nuclear;*
- *fomentar a pesquisa e a prospecção de minérios nucleares no País;*
- *incentivar a produção nacional de minérios nucleares e de seus subprodutos, inclusive nas ocorrências associadas a outros bens minerais, com vistas ao atendimento da demanda interna e das exportações;*
- *incentivar a formação continuada de recursos humanos necessários ao desenvolvimento da tecnologia nuclear e a sua fixação nesse setor;*
- *estimular a capacitação técnico-científica e industrial compatível com as necessidades do setor nuclear;*
- *incentivar o planejamento e a execução de projetos destinados ao setor nuclear, com vistas a garantir a fixação e a otimização do capital intelectual formado no País; e*
- *garantir o gerenciamento seguro dos rejeitos radioativos.*

Outros objetivos também importantes remetem a outros usos da tecnologia nuclear que trazem benefícios socioeconômicos ao País como, por exemplo, a medicina nuclear, a produção, o fornecimento e a exportação de radioisótopos.

Perspectivas Tecnológicas

Nos próximos anos, as perspectivas tecnológicas relativas à energia nuclear serão dominadas pela consolidação da nova geração de reatores (III+) cujas primeiras unidades entraram em operação nos últimos dois anos. Também se espera o desenvolvimento e a implantação dos primeiros reatores pequenos modulares (SMR), atualmente em processo inicial de licenciamento em diversos países. Reatores da chamada geração IV ainda estão em fase de concepção, não sendo esperada uma entrada significativa dessa tecnologia no horizonte desse plano. Nas próximas décadas a expansão da geração de energia nuclear no mundo será baseada em modelos da Geração III+ e SMRs.

No Brasil, a opção tecnológica foi por reatores a água pressurizada (do inglês *pressurized water reactor* - PWR), a tecnologia mais adotada em todo o mundo, com mais de 60% das usinas em operação. Essa opção será mantida para Angra III e para novos projetos de usinas que sejam eventualmente definidos ao longo da década de 2020. Após 2030, novos projetos poderão se basear em tecnologias de PWR, SMR e reatores de quarta geração, caso essas últimas alcancem maturidade tecnológica e competitividade.

Em relação ao combustível, o Brasil possui recursos consideráveis e domínio das tecnologias do ciclo. Contudo, para ampliar seu grau de autonomia necessitará complementar a capacidade instalada nas várias etapas do ciclo. Além disso, são necessários tanto aportes em P&D das tecnologias de gerenciamento, processamento e armazenamento de combustíveis usados, bem como ações de CT&I para se obterem combustíveis de alto desempenho de Geração III+. Cabe destacar que se tratam também de oportunidades para desenvolver atividades, inclusive ao longo da cadeia de fornecedores de bens e serviços, que se caracterizam pela alta agregação de valor, pela geração de recursos humanos altamente qualificados e pela alta geração de renda.

Sobre a questão do armazenamento do combustível usado, a opção brasileira foi por não o considerar como rejeito. Isso porque há esforços mundiais no desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento desse combustível, que apresenta ainda teor energético (são usados apenas cerca de 5% do seu potencial energético). De tal forma que o país adotou a política de estocar o seu combustível usado no sítio das usinas no aguardo do desenvolvimento dessas novas tecnologias de reprocessamento e aproveitamento.

Uma tendência que se observa em todo o mundo é a construção em paralelo de duas usinas lado a lado, defasadas em 18 a 24 meses, o que tem trazido importantes economias no custo de construção (CAPEX), pelo uso compartilhado de toda a infraestrutura de canteiro e mão de obra.

Por fim, o Brasil deverá se beneficiar do grande desenvolvimento das tecnologias de desmantelamento por conta do expressivo número de projetos que serão descomissionados no mundo até a década de 2040.

Desafios Principais

1. *Comunicar de forma efetiva o papel da energia nuclear*

A comunicação do papel da energia nuclear neste contexto é particularmente desafiadora, e deve ser apresentada de forma transparente e informada para promover a conscientização da sociedade brasileira a respeito dos benefícios da energia nuclear e de seus outros usos. Em particular, é preciso aperfeiçoar a comunicação à sociedade acerca de aspectos relacionados à segurança das usinas e da armazenagem de combustível usado, visto que, mesmo com ocorrências restritas de eventos com usinas nucleares, houve o aumento da percepção de risco, sobretudo, após o acidente de Fukushima. Nesse sentido, é fundamental prover informações mais amplas ao público em geral acerca dos padrões de segurança da tecnologia nuclear, protocolos de armazenamento de combustíveis e planos de contingência a fim de que a percepção de risco se torne mais aderente ao registro de eventos da indústria. Adicionalmente, a fonte nuclear pode ter um papel relevante na redução de emissões de GEE provenientes da geração elétrica no País e no mundo, conforme tem sido apontado por diversos estudos internacionais recentes (MIT, 2018; IEA, 2019; Zappa et al., 2019). Nesse sentido, arranjos institucionais, legais e regulatórios têm sido estabelecidos no mundo para internalizar as externalidades associadas às mudanças climáticas globais, sendo um dos instrumentos relevantes a criação de mercados de certificados de abatimento de emissões de carbono. Adicionalmente, a característica de uma fonte com alto fator de capacidade a torna um importante elemento agregador de estabilidade ao sistema elétrico, contribuindo assim para compensar a entrada expressiva na matriz de fontes variáveis como eólica e solar e manter o perfil de baixo carbono da matriz elétrica do Brasil.

2. *Promover adequações institucionais, legais e regulatórias à expansão da energia nuclear*

Alguns desafios institucionais, legais e regulatórios precisam ser superados para que os empreendimentos termonucleares possam ter oportunidade de participar em um mercado competitivo. É preciso, por exemplo, resolver sobre a flexibilização de monopólios da União na cadeia nuclear, visto que compete à União 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 (CF 1988, Art. 21, XXIII), e definir modelos de Parceria Público-Privada com arranjos comerciais, e financeiros que tornem os empreendimentos termonucleares atrativos frente às alternativas e com riscos compatíveis com sua economicidade (em especial, o tratamento da responsabilidade civil por danos nucleares após a flexibilização do exercício do monopólio da União). Há também outros desafios como: regulamentar o §6º do Artigo 225 da Constituição Federal do Brasil, o qual estabelece que *as usinas que operem com reator nuclear deverão ter sua localização definida em lei federal, sem o que não poderão ser instaladas*; e, o enquadramento em leilões de energia (Lei nº 10.848/2004) e seus normativos. A Modernização do Setor Elétrico deve avaliar a forma adequada de acolhimento da energia nuclear nas transformações em curso.

3. *Avaliar a magnitude da expansão termonuclear associada à implementação da Política Nuclear Brasileira*

A expansão da geração nuclear no Brasil tem efeitos positivos à implementação da Política Nuclear Brasileira, em função dos ganhos de economia de escala e escopo. Por exemplo, caso se alcance economia de escala suficiente, a fabricação de combustíveis pode gerar a possibilidade de exportação de combustível nuclear. Entretanto, é um desafio quantificar a magnitude desses efeitos, já que abrangem outros mercados e segmentos econômicos, como a medicina nuclear, radioisótopos, controle de pragas, irradiação de alimentos, marcadores de erosão, defesa, etc. O estabelecimento da metodologia de cálculo é passo importante, especialmente articulado com outros entes governamentais com atribuições institucionais sobre o tema, conferindo transparência, motivação e justificativa à política pública.

4. *Garantir a segurança das instalações nucleares e do ciclo do combustível*

A questão da segurança das usinas nucleares constitui-se uma das principais prioridades da geração nuclear. A Política Nuclear Brasileira elenca o objetivo de garantir o uso seguro da tecnologia nuclear e fortalecer as atividades relacionadas com o planejamento, a resposta a situações de emergência e eventos relacionados com a segurança nuclear e a proteção física das instalações nucleares. Além disso, é essencial manter os mais altos níveis de segurança nas atividades de operação das usinas e de todo o ciclo do combustível nuclear.

5. *Expandir a vida útil de reatores e definir regras de descomissionamento*

A maioria das operadoras nucleares do mundo está fazendo investimentos para garantir a operação de suas fábricas para além da vida útil original do projeto. Os reatores da Geração II têm vida útil estimada em 40 anos, porém muitos estão tendo seu período de operação prolongado em 20 anos. As licenças de extensão justificam a P&D e despesas de capital significativas para a substituição de equipamentos desgastados e sistemas de controle desatualizados. Projetos de extensão de vida útil têm se mostrado competitivo no mundo, e no Brasil, a usina de Angra 1 iniciou recentemente esse processo. Estratégias de descomissionamento deverão ser desenvolvidas, em sintonia com o avanço da experiência internacional. No caso de usinas presentes no mesmo sítio, a tendência internacional é manter a usina fechada e iniciar o descomissionamento coletivo de toda a central quando a última unidade atingir o final de sua vida útil.

6. *Ampliar o conhecimento sobre os recursos minerais nacionais aplicáveis ao ciclo do combustível nuclear*

O Brasil tem um dos maiores recursos de urânio do mundo. Entretanto, questões de natureza socioambiental e econômica têm causado a interrupção ou atrasos, como no caso da mina de Cachoeira, em Caetité, Bahia. Adicionalmente, os recursos brasileiros podem ser ainda maiores, uma vez que grande parte do país ainda não foi prospectada. O dimensionamento desse potencial é fundamental para o aprimoramento do desenho de estratégia de inserção da fonte no longo prazo, a começar pela bacia uranífera de Lagoa Real na Bahia.

Exercícios Quantitativos

Os exercícios qualitativos relacionados às perspectivas de expansão das usinas termonucleares (UTNs) foram centrados em dois aspectos no horizonte do PNE 2050:

1. O efeito de reduções de custo (CAPEX e/ou OPEX) sobre as perspectivas de inserção de UTNs
2. Uma política energética definindo a inserção de 8 GW a 10 GW de UTN.

Ambos tratam do papel da geração nuclear na matriz elétrica e suas implicações para o desenho de estratégia de longo prazo do planejador (uma das questões de interesse no longo prazo para o desenho da estratégia de longo prazo do planejador, conforme lista na página 11), no contexto da implementação da Política Nuclear Brasileira. Importante reiterar que os exercícios quantitativos deste PNE não consideraram as possíveis receitas auferidas de serviços que a fonte possa fornecer e que podem vir a ser valorados pelo setor elétrico, como oferta de potência e a emissão de GEE quase nula.

1. Qual o efeito de reduções de custo (CAPEX e/ou OPEX) sobre as perspectivas de inserção de UTNs?

A inserção da geração termonuclear está atrelada a uma redução expressiva dos atuais níveis de CAPEX ao longo das próximas décadas, podendo chegar a valores próximos de US\$ 2.400/kW. Isso representa uma redução expressiva em relação ao nível atual de aproximadamente US\$ 5.000/kW. De acordo com ETI (2018), com aperfeiçoamentos nos projetos de usinas nucleares seria possível obter uma redução de custo da ordem de 35% desde que as principais rubricas de custos dos novos projetos atingissem os valores médios mundiais obtidos em estudo de uma amostra de 33 projetos de usinas nucleares finalizados. MIT (2018), por sua vez, analisa um cenário chamado “*Extremely Low Cost*” no qual a tecnologia nuclear alcançaria uma redução de 50% no custo em relação aos valores projetados para 2050, patamar na casa dos US\$ 2.500/kW, que consistiria em um objetivo de custo no longo prazo para várias tecnologias avançadas de reator, de acordo com DOE (2016).

Considerando inicialmente apenas reduções de CAPEX, as simulações indicam que a geração termonuclear ganha participação (adicional às UTNs Angra 1, 2 e 3) na matriz elétrica para decréscimos no custo de investimento superiores a 50% nos casos em que a cesta de hidrelétricas com áreas de interferência não está disponível para expansão. Contudo, levando em conta também reduções no OPEX, (esta perspectiva deve ser igualmente considerada pelo fato de o Brasil possuir o domínio sobre o ciclo de processamento do combustível), decréscimos de 45% a 50% no CAPEX e no OPEX podem levar a potência instalada total de UTN ao patamar de 10 GW a 23 GW em 2050 (Figura 53).

No entanto, cabe destacar que o tempo requerido de licenciamento e construção de uma nova usina, a capacidade de oferta de combustível nacional e a escala da indústria de fornecimento são fatores que acabam por balizar a expansão termonuclear, além do complexo de Angra, a 10 GW no horizonte do PNE 2050. De qualquer forma, vê-se ainda que, mesmo no caso de maior expansão (isto é, próximo a 20 GW), a expansão das demais fontes não se altera de modo tão significativo no horizonte de 2050.



Figura 53 - Capacidade Instalada em 2050 em trajetórias selecionadas de redução de custo de novos empreendimentos no caso em que não há expansão de UHes em áreas de interferência

Em resumo, é possível a inserção competitiva de capacidade termonuclear desde que os custos de instalação (CAPEX) e/ou operação (OPEX) se reduzam de forma significativa em relação às perspectivas atuais de evolução de custo desta fonte no horizonte do PNE 2050. Tal desafio requererá ações fundamentais na direção de padronização de projetos, redução de tempo de construção e avanço na curva de aprendizagem na construção de novos empreendimentos.

2. Qual o efeito de uma expansão de UTNs via Política Nuclear Brasileira?

É preciso avaliar a expansão da geração nuclear considerando-se igualmente aspectos relacionados a uma política energética vinculada à Política Nuclear Brasileira. Esta política energética, por sua vez, deve estar baseada em uma análise de custo-benefício mais geral não restrita apenas a seus serviços no setor elétrico (incluindo-se possíveis ganhos de escala), mas também às economias de escopo em atividades como defesa (submarino com propulsão nuclear), medicina nuclear (equipamentos de diagnósticos, radiofármacos, etc.), agricultura (controle de pragas, irradiação de alimentos, etc.), entre outros. Em outras palavras, é preciso estimar os efeitos de transbordamentos econômicos e tecnológicos

(*spillovers*) e de compartilhamento de custos do complexo nuclear, os quais poderiam justificar decisões de políticas públicas para catalisar a expansão da geração nuclear e outras atividades do complexo nuclear. Tratar-se-ia, nesse sentido, de uma lógica de minimizar o máximo arrependimento (um valor de opção, como um seguro), assegurando expertise e posicionamento estratégico nesse mercado de alto conteúdo tecnológico. Alguns países (EUA, Reino Unido e França, por exemplo) têm adotado essa estratégia, reconhecendo a relevância que a nuclear pode ter em um mundo com restrição de carbono.

Dessa forma, de modo a analisar os efeitos no perfil da matriz elétrica de uma entrada mais significativa de UTN por razões de política energética, foram realizadas as simulações com entrada de 8 GW e 10 GW no horizonte do PNE 2050 (Figura 54). A configuração da matriz elétrica em 2050 é praticamente igual nos dois casos, a menos de uma pequena retração de 6 GW na expansão de Solar PV, no caso em que a expansão de UTN (adicional ao complexo de Angra) alcança 10 GW ao invés de 8 GW.

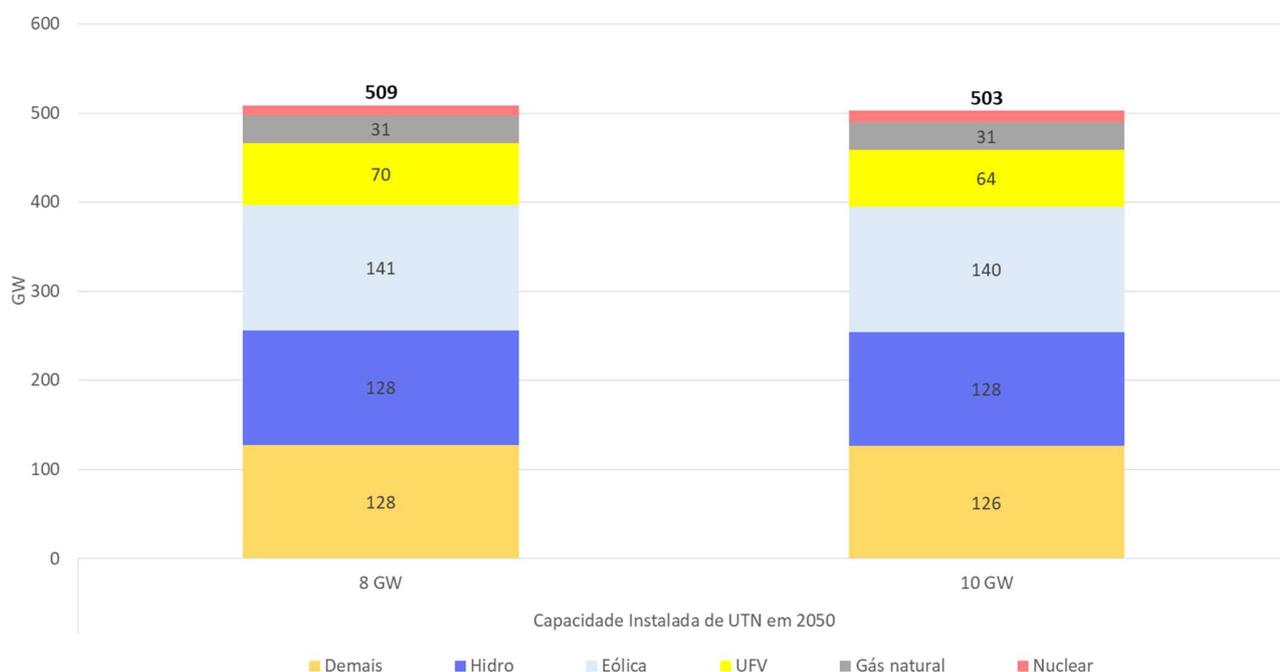


Figura 54 - Capacidade Instalada em 2050 considerando expansão de UTN via Política Nuclear Brasileira no caso em que não há expansão de UHEs em áreas de interferência

Recomendações

- Ampliar a comunicação com a sociedade brasileira, especialmente com as áreas candidatas a novos projetos, desde a mineração até o depósito de resíduos, passando pelas usinas nucleares*

O debate junto a sociedade sobre novas usinas term nucleares é primordial. Para que se alcance uma decisão de maneira estruturada e que traga confiança a todos os envolvidos, deve-se continuar a dar transparência sobre seus potenciais efeitos positivos e negativos. Assim, com o nivelamento de toda a informação, preserva-se a legitimidade do processo. Nesse sentido, uma importante ação seria montar um plano de comunicação reforçando as melhorias em relação à questão da segurança das usinas nucleares. Para isso é necessário manter um diálogo permanente com a sociedade na divulgação de informações relevantes para toda e qualquer decisão relacionada à energia nuclear, o que inclui plano de mitigação de riscos e benefícios, como segurança energética e contribuição em relação aos GEE.
- Aprimorar o marco regulatório associado à energia nuclear, passando pela flexibilização do monopólio da União, pela estrutura organizacional do setor e pela sua regulamentação*

Em relação à competência da União para explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, a INB detém a delegação para o exercício do monopólio da exploração do

urânio e a Eletronuclear exerce com exclusividade a geração de eletricidade com usinas nucleares. A flexibilização destes monopólios, assegurando os interesses nacionais através da devida fiscalização e regulação das instituições competentes, pode tornar o ambiente de negócios mais atraente para parcerias público-privadas, que modernizariam o setor.

A decisão de flexibilizar o monopólio da União nas atividades da cadeia da energia nuclear deve ainda ser acompanhada pela definição de modelos de negócios e estruturas de financiamento que efetivamente viabilizem a decisão de investimento do setor privado para que novos empreendimentos termonucleares sejam propostos em Parcerias Público-Privada. Nesse sentido, a aproximação formal com empresas detentoras de tecnologia e expertise, bem como com outros *stakeholders* (bancos, seguradoras, fornecedores, etc.), será fundamental para identificar os pontos críticos para o sucesso da política.

3. *Estabelecer metodologia de cálculo da magnitude da expansão da capacidade termonuclear no âmbito de análise de ganhos de economias de escopo associados à Política Nuclear Brasileira*

O desenvolvimento e a ampliação de outros mercados associados à tecnologia nuclear permitem auferir ganhos de economias de escopo relacionados a uma expansão de capacidade termonuclear de acordo com diretrizes da Política Nuclear Brasileira. A magnitude da expansão termonuclear pode ser impactada pela análise de custo e benefício mais sistêmica de todos esses efeitos que transbordam ao setor elétrico, além daqueles benefícios próprios da fonte em particular (em termos de segurança energética, emissões evitadas, serviços ancilares, etc.).

4. *Estabelecer maior padronização dos projetos para apropriação de ganhos de escala e aprendizagem*

Trata-se da elaboração de um conjunto de especificações técnicas que deverão ser atendidas pelos fornecedores das futuras usinas. Esse trabalho é constituído por critérios de requisitos de segurança, características operacionais, de projeto, etc. Tais especificações permitirão que se obtenha escala, sequência, padronização e aprendizagem nos projetos termonucleares a fim de se alcançar reduções de seus custos no País, em linha com o que vem acontecendo no mundo. Tais especificações são relevantes para o fortalecimento da cadeia produtiva no Brasil.

5. *Articular políticas nuclear, de comércio exterior, de C&TI e de formação de recursos humanos*

As iniciativas ligadas à tecnologia nuclear podem se beneficiar pela maior articulação entre diversas esferas de governo devido aos seus impactos que vão além do setor de energia. Isso perpassa o comércio exterior, C&TI e formação de recursos humanos. Por exemplo, o desenvolvimento da capacitação e da renovação de recursos humanos com expertise em tecnologia nuclear deve ocorrer em ritmo adequado à evolução requerida da indústria nuclear no Brasil. Essas ações devem abranger não apenas a construção e a operação das usinas termonucleares, mas toda a cadeia industrial, atividades de contingências e respostas em caso de acidente e de comunicação com *stakeholders* e a sociedade.

6. *Manter a garantia de segurança da gestão dos rejeitos radioativos*

O Brasil desenvolve o projeto RBMN, com objetivo de construir repositório para dar destino aos rejeitos de baixo e médio nível de atividade pelo tempo necessário até que a sua intensidade radioativa atinja o nível de isenção estabelecido pelas normas internacionais e da CNEN. O acompanhamento dessa atividade deve ser mantido ao longo das próximas décadas, até no caso da entrada de novos atores na geração termonuclear.

7. *Aprimorar a cultura de segurança nuclear*

Além do contínuo aprimoramento da garantia de qualidade e do controle de estruturas nucleares, sistemas e componentes, a cultura de segurança nuclear deve buscar a modernização frente ao surgimento de novas ameaças como a segurança cibernética e os eventos extremos. Nessa direção, a troca de informações e o compartilhamento de experiências entre os reguladores e entre os operadores de usinas nucleares pode ser um caminho proveitoso.

8. *Preservar a segurança de fornecimento de combustíveis*

O aumento da segurança do fornecimento também pode ser alcançado por meio de acordos intergovernamentais ou internacionais que tratam de *leasing* de combustível e bancos de combustível. O desenvolvimento da cadeia produtiva para que todo ciclo do combustível seja produzido no País contribuiria para preservar a segurança do fornecimento, ao reduzir a dependência externa das usinas termonucleares no Brasil.

9. *Avaliar as implicações de extensão da vida útil das usinas existentes em termos regulatórios e comerciais e adequada preparação para descomissionamento de usinas existentes*

No caso de Angra 1 e 2, ações de CT&I podem ser oportunas para melhorar as condições de extensão de vida útil por mais 20 anos, além do aumento de potência da usina, obtido com a substituição de equipamentos de melhor eficiência, e da modernização na instrumentação e no controle. Adicionalmente, devem-se proceder estudos técnicos e científicos para avaliar a integridade e a segurança de componentes e sistemas que não podem ser substituídos. Os aspectos regulatórios e comerciais também precisam ser endereçados. Em particular, é necessário rever regularmente a adequação dos fundos acumulados para o descomissionamento.

10. *Retomar a prospecção de urânio em todo o território nacional*

Com o objetivo de avaliar a extensão das reservas de urânio no país, é necessário estimular a prospecção de recursos minerais no território nacional, analisando possíveis entraves ao seu melhor conhecimento, a fim de identificar e mensurar as reservas de urânio do país.

Mapa do Caminho - Energia Nuclear

Desafios	Recomendações		
	2020 - 2030	2030 - 2040	2040 - 2050
Comunicar de forma efetiva o papel da energia nuclear	Ampliar a comunicação com a sociedade brasileira especialmente com as áreas candidatas a novos projetos, desde a mineração até o depósito de resíduos, passando pelas usinas nucleares		
Promover adequações institucionais, legais e regulatórias à expansão da energia nuclear	Aprimorar o marco regulatório, passando pela flexibilização do monopólio, pela estrutura organizacional do setor e pela regulamentação		
Avaliar a magnitude da expansão da capacidade termonuclear associada à implementação da Política Nuclear Brasileira	Estabelecer metodologia de cálculo da magnitude da expansão da capacidade termonuclear no âmbito de análise de ganhos de economias de escopo associados à Política Nuclear Brasileira		
	Estabelecer maior padronização dos projetos para apropriação de ganhos de escala e aprendizagem		
Garantir a segurança das instalações nucleares e do fornecimento e transporte de combustíveis	Articular políticas nuclear, de comércio exterior, de C&TI e de formação de recursos humanos		
	Manter a garantia de segurança da gestão dos rejeitos radioativos		
	Aprimorar a cultura de segurança nuclear		
Expandir a vida útil de reatores e definir regras de descomissionamento	Preservar a segurança de fornecimento de combustíveis		
	Avaliar as implicações de extensão da vida útil das usinas existentes em termos regulatórios e comerciais e adequada preparação para descomissionamento de usinas existentes		
Ampliar o conhecimento sobre os recursos minerais nacionais aplicáveis ao ciclo do combustível nuclear	Retomar a prospecção por reservas de urânio em todo o território nacional		