



ABDAN Associação Brasileira
para Desenvolvimento
de Atividades Nucleares

FÓRUM EPE e ABDAN de SMALL MODULAR REACTORS – SMRs 2022 – 2024

OUTUBRO DE 2025

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Colaboradores EPE

Coordenação Geral

Thiago Ivanoski Teixeira

Giovani Vitória Machado

Equipe Técnica – DEA/SMA

Clayton Borges da Silva

Gabriel de Almeida de Barros

Hermani de Moraes Vieira

Equipe Técnica – DEA/SEE

Caroline Chantre Ramos

Danily Andrade Veloso

Marcelo Wendel

Equipe Técnica – DEE/SGR

Caio Monteiro Leocadio

Davi José Marques Vieira

Daniel Francisconi Oliveira

Rafael Pinho Furtado

Jorge Gonçalves Bezerra Junior

Imagens da Capa

Adaptado de RHJ/Getty Images;
Google Earth; Westinghouse;
Rosatom; China Services Info; US
Department of Energy

Colaboradores ABDAN

Celso Cunha

Presidente

Carlos Leipner

Vice-Presidente do Conselho Curador

Orpet Peixoto

Vice-Presidente do Conselho Curador

Leonam Guimarães

Diretor-Técnico

Thayana Melo

Gerente de Relações Institucionais

Gabriela Sales

Assistente de Relações Institucionais



Valor Público

A realização do Fórum SMR pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em parceria com a ABDAN, representa uma iniciativa estratégica voltada à formação de conhecimento técnico e institucional sobre tecnologias nucleares com foco nos Small Modular Reactors (SMRs). Ao reunir agentes públicos, privados, reguladores e acadêmicos, o Fórum promoveu o compartilhamento de experiências e a construção coletiva de uma base de conhecimento que contribui diretamente para o aprimoramento dos estudos de planejamento energético de longo prazo.

O Fórum SMR reforça o papel da empresa como produtora de conhecimento aplicado, capaz de subsidiar decisões de política pública com base em evidências, diálogo técnico e visão estratégica. A abordagem adotada permitiu explorar os desafios e oportunidades dos SMRs em diferentes dimensões: técnicas construtivas, flexibilidade operacional, localização, aplicações industriais, ciclo de combustível e modelos de negócio.

Ao sistematizar e tornar público esse conhecimento, a EPE contribui para reduzir assimetrias de informação, apoiar o desenvolvimento de políticas energéticas mais robustas e preparar o setor para avaliar, com maior precisão, o papel dos SMRs na diversificação da matriz energética brasileira. A iniciativa também está alinhada com as diretrizes do Plano Nacional de Energia - PDE 2050.

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo

Arthur Cerqueira Valério

Secretário de energia elétrica

João Daniel Cascalho

Secretária de Geologia, Mineração e

Transformação Mineral

Ana Paula Lima Vieira Bittencourt

Secretário de Planejamento e Transição Energética

Gustavo Cerqueira de Ataíde

**Secretário de Petróleo, Gás Natural e
Biocombustíveis**

Renato Cabral Dias Dutra

<http://www.mme.gov.br>

Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

**Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e
Ambientais**

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

**Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e
Biocombustíveis**

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa
Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

Resumo

A indústria nuclear tem buscado nos *Small Modular Reactors* (SMRs) uma solução para os desafios associados aos altos custos e longos prazos de construção dos reatores nucleares convencionais. No Brasil, o Plano Nacional de Energia (PDE) 2050 indica que novas usinas nucleares poderão ser implementadas a partir de 2030 com base em tecnologias de SMRs desde que sejam alcançadas a maturidade tecnológica, operacional e a competitividade necessárias.

Dadas as oportunidades desta fronteira tecnológica, a EPE buscou aprofundar o conhecimento sobre essa nova tecnologia e estabeleceu uma parceria com a ABDAN para a promoção de um ambiente no qual fosse possível o debate, com diferentes empresas e agentes, dos principais desafios e oportunidades para o desenvolvimento e implementação de SMRs no Brasil e no mundo.

Uma relevante iniciativa nesse contexto é o Fórum de SMRs, que promoveu discussões e o compartilhamento de conhecimento sobre o desenvolvimento e o planejamento da implementação desses reatores.

O fórum reuniu agentes do setor, institutos de pesquisa, órgãos reguladores nacionais e internacionais, consultores e representantes de empresas da área nuclear das Américas, Europa e Ásia. Entre abril de 2022 e março de 2024, foram realizadas 13 reuniões *online*, nas quais foram debatidos seis grandes temas relacionados a técnicas construtivas, desenvolvimento tecnológico, regulação, modelos de negócios e aplicações dos SMRs, incluindo geração de energia, produção de hidrogênio, dessalinização e fornecimento de calor para processos industriais.

O Fórum de SMRs representa um avanço significativo no debate sobre a energia nuclear no Brasil, contribuindo para aprimorar a precisão das estimativas e a qualidade das recomendações de políticas energéticas relacionadas a essa tecnologia.

Aviso

Para preservar a confidencialidade das informações das empresas participantes, o relatório produzido a partir dessas discussões limita-se a análises gerais sobre rotas tecnológicas, ambientes regulatórios e modelos de negócios. O documento não tem como objetivo recomendar fabricantes, modelos específicos ou aplicações exclusivas, mas sim fornecer uma base técnica e estratégica para o planejamento energético nacional.

As opiniões, análises e informações contidas neste documento têm caráter meramente informativo e refletem a interpretação e o entendimento disponíveis na data de sua elaboração. Tais manifestações não necessariamente representam, de forma integral ou definitiva, as posições institucionais, deliberações formais ou opiniões mais recentes da organização/autoria. Recomenda-se a verificação de fontes oficiais e atualizadas antes de qualquer utilização ou tomada de decisão com base neste conteúdo.

Agradecimentos

A Empresa de Pesquisa Energética- EPE e a Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares - ABDAN agradecem às empresas, organizações sem fins lucrativos, consultores, institutos de pesquisa e governamentais que se dispuseram a compartilhar seu tempo, conhecimento e experiência em cada um dos 13 encontros deste fórum.

- Amazul
- Carlos Leipner
- *China National Nuclear Corporation - CNNC*
- Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
- *Electric Power Research Institute - EPRI*
- *Électricité de France - EDF*
- *Holtec International*
- Indústrias Nucleares do Brasil - INB
- *Nuclear Innovation Alliance - NIA*
- *Rosatom*
- *Tractebel*
- *United States Nuclear Regulatory Commission - USNRC*
- *Westinghouse*

Sumário

1	Introdução e contexto geral	7
1.1	Objeto Geral	7
1.2	Contextualização geral do relatório da EPE	7
1.3	A retomada da indústria nuclear e a importância dos estudos sobre SMR	8
2	Organização do Fórum de SMRs	12
3	Tópico I: Abordagens construtivas de plantas nucleares do tipo SMR.....	14
3.1	Reunião Plenária	15
3.2	Reunião técnica	15
3.3	Comentários e conclusões	20
4	Tópico II: Características de concepção e de funcionamento dos SMRs.....	22
4.1	Reunião plenária	23
4.2	Reunião técnica	24
4.3	Comentários e conclusões	31
5	Tópico III: Aspectos críticos para a localização de usinas SMR	32
5.1	Reunião plenária	32
5.2	1ª Reunião técnica	33
5.3	2ª Reunião técnica	35
5.4	Comentários e conclusões	41
6	Tópico IV: Aplicações de calor para processos industriais e produção de hidrogênio a partir de SMRs.....	43
6.1	Reunião plenária	44
6.2	Reunião Técnica.....	45
6.3	Comentários e conclusões	51
7	Tópico V: Aplicações e características dos SMRs em Sistemas Isolados e Áreas Remotas	53
7.1	Reunião Plenária	54
7.2	Reunião técnica	57
7.3	Comentários e conclusões	63
8	Tópico VI: Oportunidades e desafios para o ciclo de combustível dos SMRs.....	66
8.1	Reunião Plenária	67
8.2	Reunião técnica	73
8.3	Comentários e conclusões	82
9	Considerações finais e próximos passos	83
10	Referências	86

Lista de abreviações e acrônimos

ABDAN	Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares
AgNSNQ	Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade
Azul	Amazônia Azul Tecnologias de Defesa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNNC	<i>China National Nuclear Corporation</i>
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COP 27	27ª Conferência das Partes
CRP	<i>Coordinated Research Project</i>
EDF	<i>Électricité de France</i>
ENBpar	Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
F-SMR	Fórum Small Modular Reactor
GESEL	Grupo de Estudos do Setor Elétrico - UFRJ
HGTR	<i>High-Temperature Gas-Cooled Reactor</i>
HALEU	<i>High-Assay Low-Enriched Uranium</i>
IEA	Agência Internacional de Energia
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRA	<i>Inflation Reduction Act</i>
LABGENE	Laboratório de Geração Nucleoelétrica
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
MOX	<i>Mixed Oxide Fuel</i>
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i>
NIA	<i>Nuclear Innovation Alliance</i>
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PNE	Plano Nacional de Energia
PROSUB	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
SFR	<i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
TRISO	<i>Tristructural-isotropic</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USNRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i>

1 Introdução e contexto geral

O objetivo desse capítulo é introduzir e contextualizar o tema abordado por esse documento. Para tal, a seguir, aborda-se o objeto geral e, na sequência, a contextualização do presente relatório da EPE.

1.1 Objeto Geral

O objeto geral do presente relatório é apresentar os resultados do Fórum SMR, promovidos pela EPE em parceria com a ABDAN, contando com a contribuição de suas associadas, institutos de pesquisa e consultores convidados para discutir sobre o atual estágio de desenvolvimento dos SMRs, suas oportunidades e desafios para o desenvolvimento e implantação dessa tecnologia no mundo, especialmente no Brasil.

1.2 Contextualização geral do relatório da EPE

A EPE tem como objetivo prestar serviços na área de estudos e pesquisas para subsidiar o planejamento do setor energético em áreas como energia elétrica, petróleo, gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, entre outras, conforme estabelecido pela Lei n. 10.847/2004.

No escopo de suas competências institucionais, elencadas na Lei n. 10.847/2004 e em seu Estatuto Social, a EPE desenvolve estudos, pesquisas e estatísticas energéticas para subsidiar a formulação, implementação e avaliação da política energética nacional.

Nos termos da lei, os estudos e pesquisas desenvolvidos pela EPE subsidiarão a formulação, o planejamento e a implementação de ações do Ministério de Minas e Energia (MME) no âmbito da política energética nacional. Nesse sentido, a EPE é responsável por fornecer subsídios técnicos e estratégicos ao MME.

É de fundamental importância que a EPE considere em seus estudos de planejamento as diversas alternativas tecnológicas de transformação armazenamento e consumo de energia que possam estar disponíveis nos seus horizontes de análise, sobretudo no longo prazo. Os estudos do Plano Nacional de Energia (PNE 2050) apontam que eventuais novos projetos de usinas nucleares no Brasil poderão, a partir de 2030, ser baseados em tecnologias de SMR, desde que sejam alcançadas as condições de maturidade tecnológica, operacional e de

competitividade. Para que a EPE possa considerar essa alternativa de geração nuclear em seus estudos de planejamento é necessário que sejam feitos diversos estudos e análises considerando suas diferentes propostas e rotas tecnológicas, nível de maturidade dos projetos, características de funcionamento, operação, potencialidades de uso, características de segurança e modelos de negócios considerando as particularidades do sistema energético brasileiro.

Considerando a oportunidade destacada pelo PNE 2050 de utilizar *Small Modular Reactors* (SMRs) no Brasil, identificou-se a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre as novas tecnologias do setor nuclear. Diante disso, a EPE estabeleceu uma série de parcerias com instituições dedicadas ao desenvolvimento da energia nuclear, entre as quais se destaca a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Em maio de 2020, a EPE submeteu à AIEA o *Coordinated Research Project (CRP)* intitulado "*Economic Assessment of the Potential for Small Modular Reactors on a National Level*", visando avaliar o potencial econômico dos SMRs em nível nacional.

O objetivo desse projeto era desenvolver, ao longo de dois a três anos, estudos técnicos sobre a aplicação de SMRs no Brasil, com foco na abordagem econômica e na formulação de políticas energéticas em âmbito nacional. Após a aprovação da proposta pela AIEA em novembro de 2020, a EPE iniciou o planejamento desse estudo, realizando reuniões com a Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN) e diversas empresas interessadas em explorar o potencial dos SMRs no setor energético brasileiro.

Nesse contexto, surgiu a iniciativa de criar o Fórum de SMRs (F-SMRs), com o propósito de reunir empresas e instituições, estabelecer sinergias entre os agentes envolvidos e promover o compartilhamento de conhecimentos e experiências. O Fórum, além de complementar as ações da EPE, tendo como referência o PNE 2050, consolida o aprendizado e o esforço conjunto em um formato inovador, que integra indústria, setor público e academia, visando construir um consenso sobre o papel dos SMRs, seus desafios e as ações necessárias para o desenvolvimento da tecnologia no Brasil.

1.3 A retomada da indústria nuclear e a importância dos estudos sobre SMR

A transição energética é uma das principais prioridades globais atualmente, com um foco significativo na importância das energias de baixo carbono. Entre essas fontes, a energia

nuclear destaca-se como uma opção com grande potencial para ajudar a alcançar as metas de descarbonização.

O Brasil possui uma grande diversidade de fontes energéticas de baixo carbono como hidráulica, solar, eólica e biomassa. No entanto, apesar da abundância de recursos energéticos e da competitividade favorável no mercado, essas fontes apresentam intermitência e sazonalidade em sua geração. Nesse cenário, o acionamento das termoeletricas surge como uma alternativa.

Além disso, com a grande reserva de urânio disponível no país, a energia nuclear ganha importância ao se apresentar como uma fonte firme, proporcionando confiabilidade e segurança ao sistema. Assim, ela se torna uma forte candidata a ser uma das fontes base do sistema nacional, assegurando a diversidade da matriz energética do Brasil.

Nos últimos anos, o interesse mundial pelo setor nuclear tem crescido, acompanhado de altos investimentos governamentais e políticas industriais focadas na energia nuclear. Declarações importantes têm sido feitas, reforçando o papel dessa fonte energética no futuro. John Kerry, enviado especial dos Estados Unidos para o clima, destacou durante a COP 27 a importância da energia nuclear para alcançar a meta de uma economia *net zero* até 2050. Em fevereiro de 2022, o presidente francês, Emmanuel Macron, reforçou essa visão ao anunciar a construção de seis novas centrais nucleares até 2050, com a possibilidade de mais oito, visando garantir a independência e a liberdade energética da França (DW, 2022).

Além de sua contribuição para a geração de energia elétrica, a energia nuclear tem aplicações significativas em diversas áreas, como medicina nuclear, produção de radioisótopos, agricultura (como alternativa a pesticidas e para segurança alimentar), e no controle de doenças, exemplificado pelo combate ao Zika vírus no Brasil. Esses avanços tecnológicos destacam o papel multifacetado da energia nuclear no desenvolvimento sustentável e na inovação global.

O potencial da energia nuclear também vem crescendo em aplicações que vão além da geração de eletricidade, como a produção de hidrogênio, a dessalinização da água marinha e o fornecimento de calor ou vapor para processos industriais. Esses usos não elétricos têm a capacidade de gerar externalidades positivas e impulsionar avanços tecnológicos, trazendo inúmeros benefícios para a sociedade.

Eventos geopolíticos recentes têm elevado os preços do petróleo e do gás natural na Europa e na América do Norte, criando um cenário propício para a expansão da energia nuclear e aumentando a demanda por combustível nuclear. Essa conjuntura pode representar uma oportunidade estratégica para o Brasil, que detém vastas reservas de urânio, além de conhecimento e tecnologias avançadas para o desenvolvimento de combustíveis utilizados em reatores. Com esses recursos, o Brasil tem o potencial de se tornar um importante exportador de combustível nuclear para mercados como Europa, Ásia e Estados Unidos, fortalecendo sua posição no cenário energético global.

No entanto, existem desafios históricos que precisam ser superados para que a expansão e o desenvolvimento da energia nuclear ocorram, tanto no Brasil quanto no resto do mundo. A energia nuclear é frequentemente associada a acidentes, como os de *Three Mile Island* (1979), *Chernobyl* (1986), Césio-137 em Goiânia/GO (1987) e *Fukushima* (2011). Esses eventos contribuíram para a elevação da percepção de risco da fonte, tornando a aceitação social um dos maiores desafios para o setor. Reconhecendo a importância do engajamento da sociedade como fator crucial para o sucesso dos empreendimentos nucleares, diversos estudos têm sido conduzidos globalmente com o objetivo de desmistificar a energia nuclear e destacar os benefícios que ela pode trazer para as comunidades locais. A falta de informação e a desinformação sobre esta fonte aumentam a percepção de riscos e impedem o acesso aos benefícios da energia nuclear pela sociedade.

Outro desafio significativo está relacionado aos altos custos de investimento inicial (Capex) combinados com os longos prazos de construção das usinas nucleares tradicionais. O intervalo prolongado entre o início do financiamento e o início da geração de energia, somado aos atrasos frequentes nos cronogramas, dificulta a atração de investimentos e aumenta os riscos associados aos projetos.

A energia nuclear também enfrenta desafios relacionados à cadeia de suprimentos, à operação flexível, ao descomissionamento de usinas e à gestão dos resíduos radioativos. Nesse contexto, os SMRs surgem como uma solução promissora. Por serem menores em escala, essa tecnologia permite aplicações mais flexíveis que a dos grandes reatores e promete reduzir os riscos associados à sua construção. A questão da modularidade permite que sejam construídos em etapas, facilitando a logística de montagem e reduzindo o tempo necessário para o início da geração de energia, o que resultaria em uma significativa redução de custos. Caso confirmadas, essas características tornam os SMRs uma possível alternativa

para superar muitos dos desafios enfrentados pela energia nuclear tradicional, ainda que os reatores de maior potência permaneçam como soluções tecnológicas robustas.

O objetivo da nova tecnologia é tornar a energia nuclear mais acessível e competitiva, ampliando a diversidade de suas aplicações. No entanto, dependendo da aplicação, há uma grande variedade de *designs*, tamanhos e características entre os pequenos reatores modulares, o que exige uma compreensão e avaliação mais detalhadas.

Além da referência no PNE 2050, a energia nuclear foi incluída na resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) como uma das áreas prioritárias para investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação (BRASIL, 2021). Portanto, é recomendável adaptar e aprimorar os estudos de planejamento energético, incorporando essa nova tecnologia, para que a EPE possa subsidiar as decisões do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

O Fórum de SMRs foi criado com o propósito de discutir abordagens para a avaliação técnica e econômica de conceitos de reatores nucleares em avançado estágio de desenvolvimento. Isso inclui a análise de metodologias de planejamento, custos, estruturação de projetos, modelos de negócios e avaliações econômico-financeiras. O fórum buscou coletar informações relevantes, alertas, contribuições e percepções de instituições brasileiras e internacionais sobre a tecnologia e seu potencial, visando enriquecer os estudos de planejamento energético.

O compartilhamento de conhecimentos, experiências e preocupações entre os participantes do fórum permitiu à EPE e à sociedade brasileira aprimorar a precisão das estimativas e a qualidade das recomendações de políticas energéticas nessa área. Essa troca de informações é fundamental para garantir que as decisões tomadas estejam alinhadas com as melhores práticas globais e com as necessidades específicas do Brasil.

2 Organização do Fórum de SMRs

O Fórum sobre *Small Modular Reactors* (F-SMRs) reuniu diversos agentes do setor nuclear, incluindo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia, a Associação Brasileira para o Desenvolvimento das Atividades Nucleares (ABDAN) e seus associados, a Eletronuclear, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear, a Diretoria Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha, a Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade da Marinha do Brasil, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), entre outros.

A dinâmica do F-SMRs foi organizada em dois tipos de reuniões para cada tópico específico: a reunião plenária e a reunião técnica. As reuniões plenárias foram encontros com a participação de representantes seniores dos agentes envolvidos. Este espaço serviu como um fórum aberto para comentários, questionamentos e a definição das dúvidas relacionadas ao tópico em discussão e que seriam aprofundadas na reunião técnica subsequente. As reuniões plenárias também foram espaços nos quais especialistas convidados expunham apresentações sobre o tema a ser discutido na próxima reunião técnica.

O objetivo deste fórum é ser um grande guia para o desenvolvimento dos estudos sobre os SMRs e contribuir para desmistificar esse tema

Celso Cunha, presidente da ABDAN

Já as reuniões técnicas contaram com a participação de representantes técnicos das empresas associadas à ABDAN, que estão diretamente envolvidos no desenvolvimento, projeto, construção e futura operação de SMRs. Normalmente incluíam técnicos e representantes de diferentes países, como Europa, Ásia e América do Norte. Essa diversidade de atores enriqueceu as discussões com diferentes perspectivas e experiências globais, contribuindo para uma visão mais abrangente dos desafios e oportunidades relacionados aos SMRs.

Ambas as reuniões, plenária e técnica, foram reservadas, com acesso restrito a convidados e membros do fórum.

Nas discussões de organização do fórum foram definidos seis tópicos principais a serem abordados ao longo desses encontros:

- I. Abordagens construtivas de plantas nucleares do tipo SMR;
- II. Características de concepção e de funcionamento dos SMRs;
- III. Aspectos críticos para a localização de usinas SMR;
- IV. Especificidades das aplicações de calor para processos industriais e produção de hidrogênio;
- V. Aplicações e características dos SMRs em áreas remotas ou *off-grid*;
- VI. Oportunidades e desafios para o ciclo de combustível nuclear dos SMRs.

As reuniões técnicas foram estruturadas em blocos ou painéis de discussão, normalmente três ou quatro painéis por tópico. Para cada painel, foi elaborada uma pergunta principal, focada no tema central, acompanhada de três ou quatro subperguntas que auxiliaram na condução das discussões. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada e organizada dos tópicos, garantindo que todas as dúvidas e aspectos relevantes fossem explorados de maneira sistemática. As perguntas e subperguntas relacionadas a cada tema foram enviadas previamente para as empresas participantes da reunião técnica.

Celso Cunha, presidente da ABDAN, abre a primeira reunião, realizada no dia 29 de abril de 2022 explicando que, no intuito de desmistificar o tema dos SMRs, uma diversidade de estudos tem sido desenvolvida, além disso, uma série de palestras e apresentações tem sido realizadas e este Fórum objetiva se tornar um grande guia para o desenvolvimento do tema. Em seguida, passa a palavra para o então presidente da EPE, Thiago Barral, apresentar suas motivações e expectativas da iniciativa. A sequência das reuniões e as discussões realizadas em cada tópico são apresentadas nos próximos capítulos.

“O Fórum visa complementar um conjunto de iniciativas que teve início em 2019, enquanto trabalhávamos na elaboração do PNE 2050. Ele contribuirá para consolidar o aprendizado e amadurecer o papel dessa tecnologia para o Brasil sob a ótica do planejamento energético.”

Thiago Barral, ex-presidente da EPE

3 Tópico I: Abordagens construtivas de plantas nucleares do tipo SMR

Construction approaches for SMR-based power plants

Com o objetivo de reduzir as incertezas relacionadas aos longos prazos e custos de construção dos grandes reatores ocorridos nas últimas décadas, especialmente no Ocidente, a indústria nuclear tem proposto, a partir dos SMRs, uma possível solução para a redução do tempo de implantação baseada na construção modular. De acordo com a AIEA (2020),

os SMRs são reatores de nova geração projetados para gerar energia elétrica de até 300 MW, cujos componentes e sistemas podem ser construídos e montados nas fábricas e depois transportados como módulos para os locais de instalação conforme a demanda.

O aspecto modular das tecnologias SMR está normalmente associado a dois conceitos diferentes. O primeiro relacionado à possibilidade de compartilhar algumas instalações com várias unidades de reatores, o que viabiliza o aumento progressivo da capacidade instalada da usina. O segundo é relacionado à ideia de transferência de etapas do processo de construção para a indústria reduzindo as fases de trabalho *in loco* o que pode reduzir prazos, custos e riscos da construção. Ainda não é claro como será implementada essa abordagem de construção e se este entendimento está consolidado entre os diferentes fornecedores de SMR.

O objetivo principal do tópico foi reunir informações sobre estas características e bem como analisar os desafios e benefícios da modularidade e construção fora do sítio nuclear. Tais informações são necessárias para estabelecer uma estrutura conceitual adequada em termos de experiência do setor e necessidades de política energética.

Como ponto de partida foram utilizadas três referências para embasamento da discussão:

1. Wrigley, P.A., Wood, P., O'Neill, S., Hall, R., Robertson, D., **Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review**, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 134, 2021.
2. Lloyd, C.A., **Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems**, University of Cambridge, 2019.

3. IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) – 2020 Edition*, 2020.

3.1 Reunião Plenária

Em 29 de abril de 2022 foi realizada a primeira reunião plenária na qual foram discutidos os temas que seriam explorados no fórum e a estrutura dos encontros. Ainda foram apresentados os temas dos painéis de discussão da reunião técnica.

3.2 Reunião técnica

Em 27 de maio de 2022 foi feita a primeira reunião técnica por meio da qual as empresas convidadas puderam debater sobre as abordagens conceituais e práticas da construção dos SMRs. A discussão do tema ocorreu em quatro painéis distintos, cada um deles dedicado à análise de uma pergunta principal específica, complementada por perguntas adicionais que orientaram o debate.

3.2.1 Painel 1 – Conceitos de modularidade

Q1 “Quais devem ser os critérios em termos de modularidade sob os quais um determinado projeto poderia ser classificado como SMR?”.

Q1.1 “Existe alguma escolha de projeto conceitual que seja fundamental para a capacidade de modularizar a usina de geração de energia (por exemplo, se a escolha de um tipo de reator integral facilita ou não a modularização)?”

Q1.2 “Quais partes da usina de geração de energia devem ser modularizadas em qualquer projeto de SMR (por exemplo, ilha nuclear, balanço da usina, partes civis)?”

Q1.3 “Seria razoável definir um limite quantitativo para o nível de modularidade entre os projetos de SMR?”.

A modularidade é um conceito central no desenvolvimento dos SMRs, mas sua aplicação deve ser cuidadosamente avaliada para garantir que atenda aos objetivos do projeto. Os participantes destacaram que a modularidade oferece benefícios significativos, como a padronização, a repetibilidade, a redução de custos e a agilidade na implantação de reatores. No entanto, é consenso no setor que a modularidade não é um fim em si mesma, mas uma ferramenta para alcançar objetivos mais amplos, como segurança, eficiência, controle de custos, gestão de riscos e cumprimento de cronogramas. Nesse sentido, o foco não deve ser

simplesmente maximizar a modularidade, mas sim equilibrar essa característica com outros objetivos estratégicos. Os desenvolvedores de SMRs ressaltaram que a modularidade traz tanto vantagens quanto desvantagens, e as decisões de projeto são altamente individualizadas, dependendo dos custos-benefícios e dos objetivos específicos de cada reator.

Quanto à definição de um limite quantitativo para a modularidade, esta é uma abordagem considerada inviável devido à grande variedade de designs e objetivos dos projetos de SMR. Cada projeto tem requisitos específicos, e a modularidade deve ser adaptada para atender a esses requisitos, considerando os *trade-offs* entre custos, benefícios e riscos. A abordagem mais adequada é avaliar a modularidade caso a caso, garantindo que ela contribua para os princípios fundamentais da nova geração de reatores nucleares. Embora a modularização possa ser um importante recurso para agilizar a implementação do empreendimento e reduzir seus custos, existem outros aspectos críticos para o sucesso dos projetos como, por exemplo, a adoção de tecnologias consolidadas e cadeias de suprimentos bem estabelecidas.

Por fim, a discussão não deve se limitar à classificação da modularidade em si, mas sim avaliar se os novos reatores estão cumprindo os princípios da nova geração de tecnologia nuclear, como segurança avançada, eficiência e competitividade econômica.

3.2.2 Painel 2 – Relação entre potência e graus de modularização

Com relação à questão entre modularidade e capacidade de energia, Lloyd (2019) afirma que “devido ao seu menor tamanho, até 80% de uma usina SMR pode ser modularizada e transportada por estrada, em comparação com apenas 20% para reatores grandes”. Ainda acrescenta que “para alcançar um maior grau de modularização, reatores deveriam ser de 450 MWe ou menos”.

Q2 “Quais são os principais fatores por trás da aparente troca entre a capacidade de energia e o nível de modularidade que pode ser alcançado?”

Q2.1 “Quais características são intrinsecamente diferentes entre a construção modular de uma usina SMR e a construção modular de uma usina nuclear de maior escala (por exemplo, Westinghouse AP 1000)?”

Q2.2 “Qual é o maior tamanho prático para um projeto de reator integral?”

Q2.3 “Até que ponto o limite superior de 300 MWe normalmente definido para o SMR pode ser visto como arbitrário?”

Os desenvolvedores presentes no debate não reconhecem uma relação direta entre a capacidade de 300 MWe e o nível de modularidade, nem concordam com a afirmação de que usinas tradicionais podem atingir apenas 20% de modularidade.

A título de exemplo, a Westinghouse destacou que mesmo usinas tradicionais, como as que utilizam o modelo AP 1000, já incorporam princípios de padronização e modularidade. Os representantes também não veem diferenças fundamentais entre o processo de modularização de SMRs e usinas tradicionais, uma vez que a modularidade, em essência, envolve a montagem de componentes na fábrica, algo que já ocorre em muitos sistemas de usinas convencionais. Por outro lado, embora o *design* integral facilite a construção e a ampliação progressiva da capacidade instalada, ele não é um requisito obrigatório para que um reator seja considerado modular.

Não há, assim, consenso sobre uma relação direta entre potência e modularidade e se reconhece que reatores de menor potência facilitam a logística e o transporte, o que pode contribuir para uma maior modularização. Um *design* integrado, que apresente viabilidade logística, teria dificuldades de abarcar os custos, caso a potência do reator seja muito grande. Esta questão se torna crítica em sistemas de suporte e construção civil, que representam a maior parte dos custos e não são modularizados. Compreende-se, então, que a limitação de viabilidade para a modularização se relaciona com os componentes em si.

A Holtec, por exemplo, a partir de estudos pós-Fukushima, estabeleceu um limite máximo de 160 MWe para seus reatores, priorizando sistemas de segurança 100% passivos e a redução de custos e riscos. A Westinghouse endossou essa abordagem, destacando que a simplificação dos sistemas, sem comprometer a segurança, é uma das chaves para a redução dos custos.

3.2.3 Painel 3 – Métricas construtivas dos SMRs

De acordo com Lloyd (2019), o “Grau de Modularização (DoM) refere-se à fração de trabalho, que pode ser considerada com base no peso, no tempo ou no custo, que é transferida do local de construção *in situ* para uma fábrica no local ou uma fábrica fora do local” e a “Modularização Efetiva (Meff) refere-se ao conteúdo do trabalho contido nos módulos dividido

pelo conteúdo total do trabalho de uma NPP e pode ser calculada com base no tempo ou no custo”.

Q3 “Considerando-se estas métricas e os marcos construtivos de uma usina nuclear, qual seria o conjunto de métricas que melhor caracterizaria o aspecto modular de um determinado projeto de SMR?”

Q3.1 “Existem outras definições úteis para medir a modularidade que sejam essencialmente diferentes daquelas fornecidas por Lloyd (2019)?”

Q3.2 “Se o objetivo for criar estatísticas significativas, as medições devem ser feitas com base no peso, no tempo ou no custo?” “Até que ponto se acredita que essas métricas estão correlacionadas com riscos menores e tempos de construção mais curtos?”

Q3.3 “Espera-se que o tamanho médio dos módulos esteja fortemente correlacionado com riscos mais baixos e tempos de construção mais curtos?”.

O grau de modularidade, de fato, é algo importante para os desenvolvedores, mas, do ponto de vista do usuário, o que importa é se a usina irá produzir a energia projetada respeitando os cronogramas físico e financeiro determinados. Logo, a mensuração da modularidade não é o essencial, mas, por consenso entre os presentes, o que realmente faz a diferença é a quantificação das consequências resultantes dessa característica. Algumas das consequências da modularidade dos novos reatores que podem ser mensuradas são justamente a redução do cronograma e custo e controle de riscos.

Quanto à correlação entre modularidade e a capacidade dos reatores, os presentes confirmaram que peças grandes e pesadas impactam muito o custo de entrega evidenciando a preocupação com a logística que, dependendo das condições locais, pode ser um desafio conciliar altos níveis de modularidade e baixos custos.

Por fim, concordou-se que o ponto chave da problemática é como a implementação da modularidade será realizada, pois questões como tamanho e capacidade dos reatores estão relacionadas com fatores como localização de sítios, questões de logística, entregas de componentes e desenvolvimento dos sistemas de segurança.

3.2.4 Painel 4 – Implicações da modularidade na logística e cadeia de suprimentos

Os projetos de SMR com altos níveis de modularidade provavelmente exigiriam investimentos em diferentes tipos de ativos e diferentes classes de partes interessadas em comparação com as usinas nucleares convencionais. É de se esperar que haja implicações em toda a cadeia de suprimentos. Além disso, como o transporte é o que parece limitar o tamanho máximo dos módulos, a escolha do projeto também poderia resultar em restrições adicionais de localização.

Q4 “Quais são as possíveis implicações da escolha de um projeto com um alto nível de modularidade em termos de cadeia de suprimentos e localização?”

Q4.1 “Seria razoável se preocupar com projetos adaptados a países com infraestrutura de transporte melhor do que a existente no Brasil?”

Q4.2 “Em caso de infraestrutura de transporte precária, até que ponto seria possível reprojeter a usina de energia e/ou usar uma oficina no local (em vez de uma fábrica fora do local)?”

Q4.3 “No caso de projetos com altos níveis de modularidade, quais são as questões específicas da cadeia de suprimentos que devem ser abordadas com antecedência a partir do ponto de vista da política nacional?”

Com relação à cadeia de suprimentos e localização de usinas, os desenvolvedores são categóricos em afirmar que a modularidade leva à padronização, o que representa ganhos tanto na redução de custos, quanto facilitando o transporte e logística.

Da parte dos vendedores, assume-se que, a depender da usina e de sua localização, projetos poderão sofrer modificações, o que pode levar a um adicional de custo, porém, sem que se transformem em condição impeditiva para a realização do projeto. Para equacionar o problema, estes se colocaram à disposição para viabilizar parcerias internacionais para fabricação de componentes e estabelecimento de cadeias de suprimentos, caso haja necessidade. Somado a isso, reconheceram a importância do engajamento do poder público desde o início do processo como uma oportunidade de comunicar as necessidades e desafios. Dessa forma, será possível gerenciar tais questões e o elaborador de políticas públicas poderá se organizar e agir para viabilizar a execução dos projetos.

3.3 Comentários e conclusões

- A modularidade não deve ser vista como um fim em si mesma, mas como um recurso de planejamento que visa atingir uma variedade de objetivos diferentes, dentre os quais reduzir os custos, os cronogramas e os riscos da construção.
- A concretização desses benefícios dependerá do projeto, da capacidade de implantação e do desenvolvedor de projetos. Cada desenvolvedor tem necessidades e abordagens diferentes para a modularização. Por exemplo, definição de estratégias de adaptação da abordagem modular às capacidades locais de um país caso tal país não tenha capacidade de fabricação.
- No caso do sistema de suprimento de vapor nuclear, dependendo das condições locais, talvez não seja possível montar o reator inteiro em uma única peça e enviá-la para o local. Pode, então, ser necessário transferir parte do trabalho para o local a fim de atender aos requisitos de localização ou ainda dividi-lo em módulos menores.
- Dependendo das condições locais, como restrições devido a infraestrutura de transporte, capacidade de fabricação ou falta de qualificação da mão de obra, muita modularidade pode ter o efeito contrário e levar a níveis mais baixos de certeza, cronogramas de construção mais longos e custos de construção mais altos.
- A cadeia de suprimentos precisa ser considerada no estágio inicial, antes que o projeto seja finalizado. A decisão sobre quais componentes da usina serão modularizadas depende do mercado e de outras considerações, como o custo da mão de obra, porém, a decisão sobre como serão dimensionados é fundamental para que seja possível o transporte por caminhões ou, alternativamente, por trilhos e barcas.
- Quanto mais padronizado for o projeto, mais se reconhecerão os benefícios de custo que advêm de um SMR. Seu princípio básico é transferir o trabalho para uma fábrica, proporcionar repetibilidade, aumentar a padronização, aumentar a capacidade de implantação, proporcionar um ambiente produtivo, usar componentes prontos para uso que estejam amplamente disponíveis em outros setores e aumentar a segurança inerente.
- O cumprimento de um cronograma de construção específico leva o projeto, inerentemente, a um determinado nível de construção e modularização de fábrica.

Desta forma, é importante pensar a usina inteira em termos de modularidade, e não apenas no sistema de fornecimento de vapor nuclear.

- Um cronograma de construção mais curto caracteriza o SMR, mas não faz parte da definição. Chamar o projeto de SMR não implica que ele garantirá os benefícios inerentes esperados dos reatores modulares pequenos.
- Um reator integral não é um requisito, nem faz parte da definição de SMR. Tampouco a montagem das peças no local significa que o projeto seja modularizado.
- Os reatores modulares pequenos podem ter começado como um conceito, mas há uma grande variedade de projetos sendo propostos atualmente. A modularidade não se limita à quantidade de energia que sai do reator, inclusive o grau de aplicação da modularização em uma usina pequena ou maior pode ser o mesmo.

A modularidade, em essência, envolve a montagem de componentes na fábrica, algo que já ocorre em muitos sistemas de usinas convencionais



**Construção do SMR
ACP100 na usina
nuclear de Changjiang.
Localizado na província
chinesa de Hainan, o
ACP100 é um reator
tipo PWR com potência
de 125MWe.**

Imagem: CNNC

4 Tópico II: Características de concepção e de funcionamento dos SMRs

Distinctive design and operational characteristics of SMR

Tem sido amplamente divulgado que reatores do tipo SMR oferecem uma gama mais ampla de aplicações em comparação com as tecnologias convencionais de energia nuclear, como o fornecimento de serviços de rede, vapor de alta temperatura para processos industriais e eletricidade para pequenas redes. Para a maioria dessas aplicações, a adequação de uma determinada tecnologia SMR parece ser altamente dependente do grau de flexibilidade que pode ser alcançado, bem como de outras características operacionais e de projeto. No entanto, a falta de dados contribuiu para uma compreensão deficiente das diferenças entre as tecnologias SMR em termos dessas características operacionais e de projeto.

O objetivo principal desse evento foi reunir informações qualitativas e quantitativas sobre as características operacionais e de projeto do SMR que seriam necessárias para a inclusão dessas tecnologias nos estudos de planejamento energético realizados pela EPE. Outro objetivo fundamental foi chegar a um entendimento claro de como essas características variam entre os diferentes projetos de SMR que estão sendo propostos e quão bem essas características poderiam se adequar a cada uma das aplicações potenciais para SMR no Brasil.

De acordo com a *Nuclear Energy Agency - NEA* (2011), “a maioria dos reatores nucleares modernos de água leve é capaz (por projeto) de operar em um modo de acompanhamento de carga, ou seja, de alterar seu nível de potência uma ou duas vezes por dia na faixa de 100% a 50% (ou até menos) da potência nominal, com uma taxa de rampa de até 5% (ou até mais) da potência nominal por minuto”. No entanto, pelo menos para essas usinas nucleares convencionais, isso tem um custo.

A *NEA* (2011) destaca um dos problemas da seguinte forma: “[o] ciclo de carga leva a variações na temperatura do refrigerante e, portanto, nas temperaturas de diferentes componentes. Essas variações periódicas de temperatura levam a mudanças cíclicas na carga mecânica em algumas partes do equipamento e podem induzir a danos estruturais localizados (fadiga) desses elementos se os gradientes de temperatura forem grandes.” Do ponto de vista do planejamento energético, é importante entender até que ponto esse quadro poderia ser diferente para as tecnologias SMR.

Como ponto de partida foram utilizadas quatro referências para embasamento da discussão:

4. Nuclear Energy Agency, **Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants**, 2011.
5. Bruynooghe, C., Eriksson, A., Fulli, G., **Load-following operating mode at Nuclear Power Plants (NPPs) and incidence on Operation and Maintenance (O&M) costs**, 2010.
6. Carlson, L., Miller, J., Wu, Z., **Implications of HALEU fuel on the design of SMRs and micro-reactors**, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 389, 2022.
7. IAEA, **Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) – 2020 Edition**, 2020.

4.1 Reunião plenária

No dia 12 de agosto de 2022 realizou-se a reunião plenária que contou com a participação de representantes do Grupo de Estudos do Setor Elétrico - GESEL do Instituto de Economia da UFRJ, os quais apresentaram o trabalho "*The Small Modular Reactors (SMRs) and the Brazilian Electric System*". A apresentação iniciou com uma revisão bibliográfica sobre o tema, destacando que os Estados Unidos e China lideram as publicações sobre SMRs, seguidos por Canadá e Coreia do Sul.

Além da revisão bibliográfica, o grupo entrevistou uma série de agentes do setor, entre eles: ONS, EPE, BNDES, IPEN, INB, CNEN, ENBpar, Eletronuclear, Embaixada Brasileira em Dublin, AgNSNQ e Rosatom. As entrevistas abordaram diversos aspectos críticos como desafios e barreiras para o desenvolvimento de SMRs, oportunidades, participação do setor privado, aplicação no sistema elétrico brasileiro, questões de licenciamento, segurança, transporte, prazos e custos de implementação, além do tema do combustível nuclear.

Os principais pontos observados nessas entrevistas remetem à necessidade de ampliar o conhecimento e engajamento da sociedade sobre a tecnologia nuclear, com iniciativas para desmistificar os SMRs quanto a aspectos tecnológicos, de custos, prazos e segurança. Destacou-se também a relevância da geração nuclear para a transição energética e a importância de construir uma demanda sustentável como elemento chave para o desenvolvimento do setor. Outros pontos críticos incluem a capacitação de recursos

humanos, a inclusão de projeções de investimento nos documentos de planejamento energético (PDE e PNE), e o engajamento em cooperações internacionais.

A partir dessas informações, elaboraram um Plano de Ação cujas diretrizes são:

- a. Cooperação e Informação;
- b. Recursos humanos e infraestrutura;
- c. Política industrial;
- d. Inclusão dos SMRs no planejamento elétrico;
- e. Plano de comunicação;
- f. Política pública;
- g. Regulação, licenciamento e padronização;
- h. Fase de desenvolvimento – Suporte Financeiro.

Durante os debates que se seguiram à apresentação, foram levantados pontos adicionais relevantes. Discutiu-se a importância de métricas como horas de construção para o sucesso de projetos de SMR, embora se reconheça a ausência de dados históricos para comparação. Quanto à inserção nos documentos de planejamento, o diretor da EPE esclareceu que o PDE é atualizado anualmente e não há impedimentos para inclusão mais explícita dos SMRs, desde que demonstrem viabilidade comercial no período estudado.

A reunião encerrou com o consenso de que, embora permaneçam muitas questões em aberto - como o papel do setor privado e as lacunas na cadeia de suprimentos - os desafios precisam ser compreendidos e abordados progressivamente para viabilizar o alcance das metas do setor nuclear brasileiro.

4.2 Reunião técnica

A reunião técnica foi realizada em 09 de setembro de 2022. Considerando-se os pontos já discutidos anteriormente, iniciaram-se os painéis de discussão.

4.2.1 Painel 1 – Flexibilidade operacional dos SMRs

Relatório publicado pela NEA (2011) afirma que usinas tradicionais já têm a capacidade de variar sua carga e se adaptar à demanda. No entanto, para essas usinas, essa flexibilidade vem com um custo. A variação de carga gera mudanças periódicas de temperatura que, por sua vez, produz mudanças de ciclo de carga mecânica o que poderia levar à fadiga mecânica.

Q1 - “Qual flexibilidade operacional pode ser esperada das tecnologias SMR, mesmo sem considerar a operação combinada de calor e energia?”.

Q1.1 “Há dados quantitativos disponíveis sobre as capacidades de aumento e redução de rampas, potência mínima permitida e tempo mínimo de funcionamento e de inatividade (tON e tOFF)?”

Q1.2 “Quais são as implicações técnicas e econômicas de desligamentos frequentes, variação de potência e operação com carga parcial?”

Q1.3 “Até que ponto esses recursos e implicações da operação flexível dependem do tipo de reator?”

Q1.4 “Até que ponto a flexibilidade pode ser melhorada por meio da operação combinada de calor e energia?”

Os desenvolvedores foram unânimes em afirmar que estão projetando SMRs que tenham capacidade de modular carga, variação que pode ir de 20% a 100% da carga máxima. Alguns afirmaram já terem experiência com esse tipo de operação flexível, garantindo a confiabilidade e precisão dos números informados. A rampa relacionada a essa modulação deve atingir por volta de 5% a 6% por minuto. O design do combustível utilizado também deve auxiliar esse processo. Apesar da viabilidade técnica de modulação da carga, todos os presentes reforçaram que o cenário ideal é aquele em que o reator opera em sua capacidade máxima, visto o alto investimento realizado no projeto.

Como uma operação abaixo da capacidade máxima do reator não tem um bom custo-benefício, os presentes sugeriram alternativas para o aproveitamento da energia excedente. Dentre essas, foi mencionado tecnologias de armazenamento de energia, produção de hidrogênio e dessalinização.

Outra solução para a flexibilidade da operação, sem redução da eficiência do processo, seria considerar um conjunto de reatores. Nesse caso, ao invés, de uma modulação da carga de um reator específico, o gerenciamento estaria focado no acionamento de reatores em paralelo, cada um operando em sua carga máxima. Esse modelo reduziria o uso de combustível, por exemplo. Entretanto, vale ressaltar que esse tipo de operação leva a uma quantidade maior de operações de desligamento e retomada dos reatores, o que também induz fadiga mecânica pelas variações de temperatura e pressão sobre os equipamentos.

Apesar das ressalvas, os desenvolvedores confirmaram que compreendem os desafios enfrentados nas redes elétricas modernas, portanto, já estão projetando SMRs com essa capacidade de modularização de carga, visto que essa é uma decisão a ser tomada logo no início do projeto.

4.2.2 Painel 2 – Fator de capacidade dos SMRs

Os altos níveis de disponibilidade da usina de energia são frequentemente mencionados como uma das possíveis vantagens das tecnologias SMR. Conforme Carlson *et al.* (2022), “os SMRs podem operar com ciclos mais longos e espera-se que tenham tempos de reabastecimento mais curtos”.

Q2 - “Que desempenho pode ser esperado das tecnologias SMR em termos de fator de capacidade e vida útil, especialmente quando comparadas às usinas nucleares convencionais?”

Q2.1 “Há dados quantitativos disponíveis sobre a frequência esperada e a duração média das paradas não planejadas, bem como sobre a frequência e a duração média das paradas para reabastecimento e manutenção programada?”

Q2.2 “Até que ponto o desempenho da usina em termos de interrupções e desligamentos não planejados depende do tipo de reator?”

Q2.3 “Existe alguma característica intrínseca das tecnologias SMR que poderia afetar a vida útil da usina de forma diferente em comparação com as usinas nucleares convencionais?”

Q2.4 “Qual é a relação de troca entre a disponibilidade da usina e o nível de operação flexível?”

Os representantes apresentaram números otimistas, com fatores de capacidade variando de 90% a 92%, com um ciclo de vida que, considerando extensões de vida útil, pode atingir 60 anos, alguns participantes acreditam que esse ciclo de vida pode chegar a 100 anos.

Já para o reabastecimento de combustível, as respostas variaram um pouco. Alguns reatores estão sendo projetados visando um reabastecimento a cada 2 anos, outros a cada 4 anos, e outros a cada 6 anos, ou mais.

Nesse momento, pontos relevantes foram levantados como: a importância do planejamento da manutenção e do reabastecimento ser essencial para garantir altos fatores de capacidade; o fato de ser estratégico conciliar momentos de reabastecimento e manutenção periódica para reduzir os tempos de parada da usina. Algumas empresas, inclusive, sugeriram usinas com mais de um reator para garantir a continuidade da operação, mesmo durante a parada de manutenção de um dos reatores na localidade.

Discutiu-se a alternativa de fazer a manutenção dos reatores na própria fábrica, com a substituição do reator localizado no sítio, de forma que a abordagem modular poderia ser aproveitada, não apenas em termos de fabricação, mas também em termos de manutenção.

Ao se discutir rotas tecnológicas observa-se que a maioria das empresas está partindo de designs PWR, utilizando água pressurizada. Ao serem questionados a respeito, esclareceram que é uma tecnologia já conhecida e bem estabelecida, o que auxilia nas perspectivas e cálculos.

4.2.3 Painel 3 - Tipos de combustível utilizados pelos SMRs

É provável que algumas das possíveis vantagens das tecnologias SMR dependam de um melhor desempenho do combustível. Com relação a fatores de capacidade mais altos, Carlson et al. (2022) descreve a relação da seguinte forma:

Por conter mais material físsil, a implementação de urânio de alto teor de enriquecimento e baixo teor de urânio (HALEU) pode aumentar o fator de capacidade e reduzir os custos de combustível de um reator, aumentando a produção de energia de um núcleo entre o reabastecimento. Embora a produção de um conjunto de combustível seja mais cara, o aumento resultante na queima de combustível provavelmente resultaria em custos líquidos de combustível mais baratos. O aumento da queima aumenta a vida útil do ciclo e melhora o fator de capacidade do reator.

Com relação às capacidades de variação de potência das usinas nucleares convencionais, a NEA (2011) afirma: “Um dos requisitos mais importantes para o acompanhamento de carga (ou qualquer variação significativa de potência) é o nível suficiente de confiabilidade do combustível. A capacidade de manobra do reator pode ser limitada pela falha do revestimento devido à interação pellet-revestimento, rachaduras por corrosão sob tensão e outros efeitos.” Do ponto de vista do planejamento energético, seria importante compreender melhor essas compensações técnicas e econômicas associadas ao desempenho do combustível.

Q3 - *“Sem considerar a infraestrutura nacional adicional, como se deve pensar sobre os desafios e as oportunidades para a SMR em termos de desempenho do combustível?”.*

Q3.1 *“Até que ponto um combustível não convencional (por exemplo, HALEU, TRISO) é necessário para melhorar a operação da usina, em particular no que diz respeito a: (a) maior segurança; (b) fatores de capacidade mais altos; e (c) níveis mais altos de operação flexível?”*

Q3.2 *“Algumas tecnologias SMR são mais flexíveis do que outras em termos da possibilidade de usar diferentes tipos de combustível nuclear?”*

Q3.3 *“Até que ponto e a que custo o mesmo reator pode operar usando diferentes tipos de combustível nuclear?”*

Q3.4 *“A decisão sobre o(s) tipo(s) de combustível nuclear deve ser tomada em um estágio inicial do projeto?”.*

A escolha do combustível tem sido feita por abordagens e estratégias distintas, alinhadas a experiências prévias, parcerias logísticas e objetivos em diferentes horizontes temporais (curto, médio e longo prazo) estabelecidos por cada fabricante. Enquanto alguns ainda utilizam combustíveis convencionais, outros já migraram para opções avançadas, como HALEU (*High-Assay Low-Enriched Uranium*) e partículas de TRISO (*Tristructural Isotropic*).

Ainda que algumas empresas demonstrem interesse na adoção de combustíveis avançados, reconhecem que seu desenvolvimento demanda tempo. Entretanto ressaltaram que, à medida que essas tecnologias amadurecerem, elas serão gradualmente incorporadas aos projetos de novos reatores. Por outro lado, os combustíveis convencionais oferecem vantagens imediatas: custo reduzido, ampla validação técnica e maior confiabilidade operacional, o que facilita os processos de licenciamento por adotarem tecnologias já bem conhecidas. Destaca-se também as vantagens de aproveitar a infraestrutura já estabelecida e os conhecimentos prévios de montagem de reatores convencionais tornando, então, a operação tradicional como impulsionadora das inovações dos SMRs.

Os representantes confirmaram ainda que, apesar de estarem utilizando os combustíveis convencionais, as características dos SMRs estão sendo alcançadas. A entrega dos equipamentos principais de maneira integrada e a implementação de sistemas passivos são

algumas das soluções utilizadas para garantir uma maior segurança aos novos reatores e alcançar as metas de desempenho esperadas.

Uma das empresas participantes do fórum informou que já está utilizando o HALEU, e que optou por utilizar um o combustível que combina cerâmica e alumínio, desenvolvido especificamente para o design de seus reatores. Dentre seus motivos, afirmou que as características do combustível reduzem a probabilidade de rachaduras e corrosões, auxiliando à flexibilidade do reator para acompanhar a carga, além de garantir longos períodos sem a necessidade de reabastecimento. Por atender integralmente aos requisitos da AIEA, passar com êxito pelos testes de validação e contar com experiência consolidada em sua produção, a empresa decidiu incorporar exclusivamente o HALEU como combustível no design de seus SMRs.

*O desenvolvimento e adoção de combustíveis avançados, demanda tempo.
À medida que essas tecnologias amadurecerem, elas serão gradualmente
incorporadas aos projetos de novos reatores*

Durante o debate foi questionado se existe correlação entre a redução do tamanho do reator e a necessidade de combustíveis avançados, considerando que a literatura técnica frequentemente associa as características inovadoras dos SMRs a melhorias no combustível.

Os representantes confirmaram que, no caso de microrreatores – voltados principalmente para operações remotas, em regiões isoladas com infraestrutura limitada ou aplicações militares - a adoção de combustíveis avançados é de fato essencial devido às exigências de portabilidade, autonomia e segurança. Dessa forma, reconheceu-se que há uma relação entre tamanho, peso do reator e a escolha do combustível. No entanto, observou-se que, em um primeiro momento, essa preocupação não tem sido prioritária para a maioria dos SMRs em desenvolvimento, uma vez que muitos projetos ainda se baseiam em combustíveis convencionais. Essa abordagem inicial busca garantir maior viabilidade técnica e econômica, aproveitando a infraestrutura existente e acelerando o licenciamento.

4.2.4 Painel 4 – Métodos de dissipação de calor e consumo de água

Q4 “O que é específico das tecnologias SMR no que diz respeito à rejeição de calor para a atmosfera?”

Q4.1 “Até que ponto as tecnologias SMR oferecem uma oportunidade melhor para reduzir o consumo específico de água?”

Q4.2 “Em que medida as oportunidades de resfriamento híbrido ou a seco variam entre os diferentes tipos de reatores?”

Q4.3 “Quais são as implicações técnicas e econômicas de ter projetos alternativos com resfriamento híbrido ou seco?”

Q4.4 “Existe alguma complexidade adicional ou problema significativo associado ao resfriamento híbrido para as tecnologias SMR?”

Q4.5 “Em comparação com as usinas térmicas convencionais, há algo que torne a operação e o desempenho da usina mais sensíveis à temperatura ambiente?”

Q4.6 “Existem dados quantitativos disponíveis sobre o consumo específico de água?”

Existem diversas estratégias e abordagens sendo utilizadas para atender os requisitos de arrefecimento, como resfriamento à água, com torres convencionais de resfriamento úmidas, com torres de resfriamento secas e por resfriamento a ar.

A escolha do sistema de resfriamento depende das características da localização da usina, temperatura e disponibilidade de água. Por exemplo, se for um local extremamente frio ou com clima desértico, optar por torres secas seria a melhor alternativa, contudo, são mais caras que as úmidas e tal variável deve ser considerada no projeto.

O foco no desenvolvimento dos sistemas de resfriamento tem sido no aumento de segurança e confiabilidade dos reatores. Além disso, há a expectativa de uma redução do consumo de água, tanto absoluta quanto por MW produzido, fato que estaria relacionado a menor potência dos SMRs se comparada a uma tecnologia de 1 GW. Contudo, há ainda poucos dados disponíveis e informações detalhadas a respeito de quanto seria essa redução do consumo de água. Observa-se, assim, a importância de aplicação de testes e levantamento de dados quantitativos corroborando as afirmações.

4.3 Comentários e conclusões

- O acompanhamento da carga por um reator SMR individual não é econômico. Pode-se avaliar a alternativa de operar com um grupo de reatores para otimizar o acompanhamento da carga. Principalmente se estiver associado a outras demandas, como calor e energia combinados (CHP), dessalinização ou produção de hidrogênio.
- Espera-se que os SMRs possam operar entre 20% e 100% da carga, com uma taxa de rampa de 5% a 6% por minuto.
- Em geral, os SMRs devem ter fator de capacidade de 90% a 92% e até 60 anos de vida útil (considerando a vida útil estendida). Também é mencionada uma vida útil de 100 anos.
- O planejamento da manutenção e do reabastecimento é fundamental para ter um alto fator de capacidade bem como se o local da manutenção será na planta ou fábrica (o que pode demandar uma frota de SMR para substituí-lo).
- Os combustíveis convencionais são mais baratos e mais testados, o que pode ser ponto importante para as demonstrações de segurança aos órgãos reguladores. No entanto, novos combustíveis (HALEU, TRISO etc.) podem promover uma melhor correspondência entre o projeto e o desempenho do combustível.
- Apesar de ausência de dados quantitativos, espera-se que os requisitos de água para SMR sejam menores do que para usinas convencionais. A escolha do sistema de arrefecimento, resfriamento com água (torres de resfriamento convencionais e torres de resfriamento a seco) ou resfriamento com ar, dependerá da disponibilidade de água e das temperaturas dos locais.
- Alguns especialistas levantaram a questão que os ciclos termodinâmicos dos SMRs tendem a possuir menor rendimento devido às menores temperaturas, logo, a economia de água poderia ser sustentada em termos absoluto, mas não em termos relativos. Outro ponto relevante foi a queima do combustível, que tende a ser mais eficiente em reatores de grande porte, reduzindo os custos de operação da usina.
- É preciso aumentar a base quantitativa de dados para comprovar e sustentar as alegações de economia de recursos dos novos reatores.

5 Tópico III: Aspectos críticos para a localização de usinas SMR

Critical siting aspects for SMR-based power plants

Graças ao tamanho reduzido, combinado à abordagem de segurança aprimorada e a outras características construtivas e de operação, espera-se que as tecnologias SMR enfrentem menos restrições de localização em comparação com as tecnologias convencionais de reatores. A viabilidade de alocar a instalação nuclear próxima aos centros de demanda representaria uma condição crítica para algumas aplicações como o fornecimento de vapor de alta temperatura para processos industriais e eletricidade para pequenas redes. Entretanto, a falta de compreensão do que é realisticamente viável em termos de localização pode afetar a consideração das tecnologias SMR na política energética.

O principal objetivo desta reunião foi buscar melhor compreensão dos seguintes aspectos: (I) desafios técnicos e regulatórios para a instalação de usinas elétricas baseadas em SMR mais próximas dos centros de demanda no Brasil; e (II) possíveis abordagens metodológicas para a incorporação de tecnologias SMR em estudos de localização em todo o país.

Como ponto de referência foram utilizados três documentos para embasamento da discussão:

8. *International Atomic Energy Agency, **Site Evaluation for Nuclear Installations** 2019.*
9. *Oak Ridge National Laboratory, **Advanced Reactor Siting Policy Considerations**, 2019.*
10. *Comissão Nacional de Energia Nuclear, **Normas para Escolha de Locais para Instalação de Reatores de Potência**, Resolução CNEN 09/69, 1969.*

5.1 Reunião plenária

A reunião plenária do tópico III foi realizada no dia 28 de novembro de 2022 e contou com a presença da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, que apresentou os trabalhos que estão sendo executados no órgão.

A CNEN está utilizando como referência a norma americana, 10CFR54, da *Nuclear Regulatory Commission* - NRC, a exemplo do que se tem feito em relação a extensão de vida das usinas tradicionais, além de normas da agência norte americana e da AIEA. O órgão estava trabalhando na atualização das normas de escolhas de sítios. Comentaram, ainda, que o guia do *Electric Power Research Institute* - EPRI é bem similar a essas outras duas normas.

O representante esclareceu que os trabalhos para atualização das normas devem considerar tanto os SMRs quanto usinas de grande porte que sigam uma tecnologia diferente do PWR. Ainda esclareceu como se dá o processo interno para atualização dessas normas.

Por fim, o representante da comissão nuclear apresentou as iniciativas da instituição que visam o desenvolvimento do setor e das tecnologias nucleares avançadas, demonstrando participação em parcerias nacionais e internacionais envolvendo SMRs.

5.2 1ª Reunião técnica

O tópico III contou com uma reunião técnica extra contando com a presença de institutos de pesquisa e órgãos de regulação brasileiras e norte americanas. Participaram da primeira reunião técnica: a CNEN, Idaho National Laboratory – INL, *United States Nuclear Regulatory Commission* – USNRC e o EPRI. O encontro virtual ocorreu em 05 de dezembro de 2022. Cada instituição fez uma apresentação seguida de uma discussão geral sobre o tema.

O representante da CNEN iniciou sua apresentação comentando as novas normas sobre localização de usinas nucleares e as que estão sendo atualizadas. Esclareceu questões sobre a norma N.N 1.04 – Licenciamento de Instalações Nucleares, informando que estão sendo concedidas licenças parciais à medida que os requisitos vão sendo alcançados por quem submete o projeto. Já a norma 06/69 traz definições importantes, como: áreas de exclusão, zona de população reduzida, distância dos centros de demanda, e os fatores a serem avaliados após uma seleção de sítio. Apresentou em seguida a norma 1.03 – Aprovação de Local para Centrais Nucleoelétricas que traz definições como: licença prévia do sítio e design preliminar da usina, além de apresentar os títulos dos demais capítulos dessa norma.

A CNEN respondeu às perguntas direcionadoras da EPE informando que está considerando uma composição entre as normas da USNRC e da AIEA para a elaboração da norma específica para Planos de Emergência Local. Reforçou que não escolhe localização de sítios, mas avalia as escolhas ante os requisitos das normas e que tem acompanhado o desenvolvimento de projetos internacionais, a exemplo do projeto da NuScale. Esclareceu que estão elaborando e atualizando as normas de Resposta e Preparação de Emergência, considerando que é possível a aprovação de um sítio antes de uma definição do design do reator, algo que só é possível pelas características e vantagens dos SMRs.

Seguindo a programação, o representante da USNRC apresentou a instituição, suas competências e responsabilidades, e frisou a importância da cooperação com demais

instituições e organizações como ações estratégicas. Citou também o 10CFR, uma nova estrutura regulatória que está sendo elaborada com intuito de licenciar novos reatores nucleares, incluindo SMRs. Em sua elaboração estão sendo considerados requisitos que equilibram flexibilidade e previsibilidade. A finalização da norma está prevista para 2025.

Ao final, o representante da USNRC comentou sobre a elaboração de normas que já estão considerando o licenciamento em envelope, que seria o responsável por agilizar e facilitar o licenciamento dos novos reatores nucleares. Esclareceu que a norma não está seguindo designs específicos de reatores, mas requisitos genéricos. Assim, uma vez que o projeto submetido demonstrar que atende a esses requisitos e se enquadra às regras, uma quantidade significativa de tempo pode ser poupada em seu licenciamento.

Após um momento de perguntas e respostas, o representante do EPRI apresentou o guia de Seleção de Sítios e Avaliação dos Critérios para Novas Instalações de Geração Nuclear. O guia, revisado em 2022, foi publicado e disponibilizado pela primeira vez online. O EPRI esclareceu o passo a passo para utilização desse guia. Primeiramente, há a necessidade da definição geral dos requisitos de projeto, por ser uma metodologia tecnologicamente neutra, é necessário conhecer a potência a ser gerada e definir se haverá apenas geração elétrica ou térmica também, por sua vez, não é necessário a definição do design ou tecnologia que será utilizada ainda. A seguir, esclareceu que a escolha do sítio e as definições de tecnologia não seguem uma ordem específica, podendo, inclusive, ocorrer de maneira paralela.

Um dos tópicos abordados pelo EPRI envolveu o Envelope de Parâmetros da Usina e o Envelope de Parâmetros dos Sítios. A norma NEI 10-01, também disponível online, trata do Guia Industrial para Desenvolvimento do Envelope de Parâmetros da Usina em Apoio a uma Licença de Localização Prévia. Essa norma descreve conceitualmente os passos para se elaborar um envelope de parâmetros para as usinas nucleares.

Por fim, o EPRI esclareceu que, apesar do guia ter sido desenvolvido pensando no contexto estadunidense, pode ser utilizado internacionalmente, visto que traz uma abordagem genérica, com neutralidade tecnológica, partindo de ideias mais gerais, caminhando para descrições mais detalhadas de cada projeto. Assim, adquire características de uma metodologia.

A última apresentação da reunião contou com a participação do INL que compartilhou sua experiência com a localização de SMRs, utilizando o guia de Seleção de Sítios elaborado pelo EPRI.

O INL apresentou definições de um ambicioso projeto que previa a operação de um sítio de SMRs em 2030, contendo 6 reatores, com potência para gerar 462 MWe. O laboratório seguiu os passos do guia da EPRI e estudos das estradas disponíveis na região, as características do solo, considerando exposição aos riscos, finalmente, chegando em potenciais candidatos para localização do sítio para o projeto. Após filtrar e reduzir para locais preferenciais, estudos físicos mais detalhados seriam realizados para se tomar a decisão final.

Finalizada a apresentação do INL, houve a discussão se a padronização dos reatores seria um fator para acelerar a seleção de sítios e, conseqüentemente, o licenciamento e início de operação. Apesar de haver essa expectativa, levantou-se uma ressalva, ainda que os projetos sejam padronizados, a escolha das características do reator, da sua aplicação e de sua localização trará certas particularidades a cada projeto. Assim, concluiu-se que haverá uma agilidade no processo, mas ainda assim, cada projeto deve ser tratado como sua devida individualidade.

À medida que os sítios entrarem em operação, espera-se que sirvam de modelo para a sociedade de como esse tipo de usina opera e se comporta, o que auxiliaria à aceitação social da nova tecnologia. Os presentes reconheceram que é uma boa prática incluir a sociedade na escolha da localização dos sítios nucleares ainda nos estágios iniciais do processo.

5.3 2ª Reunião técnica

A segunda reunião técnica do tópico III ocorreu dia 16 de março de 2023. Além dos representantes das empresas associadas da ABDAN a CNEN esteve presente apresentando a perspectiva do regulador brasileiro ao tópico. Esta reunião voltou ao seu formato tradicional de apresentação de painéis de perguntas como forma de fomentar o debate.

5.3.1 Painel I - Estudos de sítios para locação de SMRs

Q1 “Quais seriam as alternativas metodológicas para incorporar as tecnologias SMR de forma genérica em estudos de localização em nível nacional?”

Q1.1 “Até que ponto é possível levar em conta as possíveis vantagens da SMR em termos de localização ao realizar esses estudos de âmbito nacional?”

Q1.2 “Até que ponto é analiticamente viável levar em conta a diversidade tecnológica dos conceitos de SMR, especialmente em termos de tamanho, características de segurança e consumo de água?”

Q1.3 “Considerando a possibilidade de critérios baseados no risco e no desempenho para a localização de reatores de potência no Brasil, seria estritamente necessário escolher um reator específico antes de realizar um estudo de localização?”

Q1.4 “A orientação de localização existente (por exemplo, a orientação do EPRI ou da AIEA) fornece critérios conceitualmente diferentes para SMR em comparação com usinas nucleares convencionais?”

Um dos aspectos mais importantes na escolha de um sítio é o risco radiológico, ou seja, o risco de exposição à radiação ionizante. Segundo a representante da *Électricité de France - EDF*, se esse risco for baixo, haverá uma maior flexibilidade para a seleção do local para instalação da usina nuclear. Tal risco está ligado à escolha da tecnologia e ao plano de prevenção e segurança. Outro aspecto importante a ser considerado na localidade é a disponibilidade de recursos para resfriamento do reator.

Representantes da Holtec comentaram sobre a análise de envelope de parâmetros, um conjunto de parâmetros e características do local. Tal abordagem permite avaliar se o local é propício e possui as características necessárias para operação de um reator nuclear. A USNRC tem seguido o guia do INL para elaborar esse envelope de parâmetros para os locais candidatos e utilizado essa metodologia para emitir licenças prévias para os sítios. Uma das vantagens desta abordagem é ela ser independente da tecnologia do reator.

O representante da Rosatom informou que tem utilizado outra abordagem na escolha dos sítios e optado por dar prioridade aos potenciais aplicações de um reator em um local específico. Tendo como ponto de partida a cadeia de suprimentos estratégica já instalada na região, avaliam qual tecnologia seria mais interessante para suprir a demanda naquela região. A partir de então, aplicam os guias e metodologias para fazer um filtro para a escolha dos melhores sítios. Na ocasião, a empresa levantou a necessidade e importância de tropicalização destes guias e metodologias para uma melhor adaptação à realidade brasileira.

Representantes da Westinghouse dividiram sua resposta entre comentários sobre parâmetros do local e aspectos regulatórios. Quanto aos parâmetros do sítio, há muitos a serem considerados como: tamanho do terreno, temperatura, disponibilidade de recursos naturais, dentre outros. Porém, a empresa já vem desenvolvendo SMRs com uma abordagem em envelope, ou seja, um projeto que consiga se adaptar facilmente a uma variedade de condições locais, aumentando, desta forma, sua capacidade de desenvolver, produzir e comercializar os novos reatores para diferentes localidades e aplicações.

Com relação a aspectos como a proximidade do sítio e o centro de demanda, a empresa compreende que está intimamente ligado ao órgão regulador de cada país e suas particularidades regulatórias. Logo, vai depender de como o regulador brasileiro decidirá fazer, se irão utilizar uma abordagem mais relacionada ao risco ou se irão utilizar critérios mais determinísticos, como a potência de cada usina. Os esforços da Westinghouse são para a padronização dos reatores e há expectativa de não haver grandes mudanças no projeto, ainda assim, será necessário conversas mais específicas com o órgão regulador brasileiro.

Os representantes acrescentaram novamente a importância do engajamento da sociedade local para o sucesso do projeto. Além da importância de possuir clara compreensão da aplicação de cada reator, geração elétrica, aproveitamento do calor em processos industriais, produção de hidrogênio, aplicação híbrida, esse é um aspecto novo que precisa ser considerado na escolha de sítios ao se tratar de SMRs.

5.3.2 Painel 2 – Expectativas regulatórias no Brasil

Q2 “De uma perspectiva regulatória, até que ponto seria razoável esperar que as usinas elétricas baseadas em SMR pudessem ser instaladas mais perto dos centros de demanda no Brasil?”

Q2.1 “Até que ponto a regulamentação atual para a localização de reatores de potência no Brasil é inclusiva em termos de tecnologia?”

Q2.2 “Espera-se que a regulamentação brasileira para a localização de reatores de potência seja mais prontamente aplicável à tecnologia de água leve?”

Q2.3 “O órgão regulador nuclear brasileiro já identificou problemas específicos na regulamentação atual para a instalação de usinas elétricas baseadas em SMR no Brasil? Quais seriam essas questões?”

Q2.4 “O órgão regulador nuclear brasileiro pretende revisar a regulamentação atual para a instalação de reatores de potência? Quais são as iniciativas planejadas?”

O representante da CNEN informou que a norma brasileira para a avaliação de sítios nucleares estava em processo de revisão, incluindo uma fase de audiência pública para receber contribuições da sociedade. Destacou ainda que a norma de licenciamento nuclear também está sendo atualizada. Nestas revisões, a CNEN já estava integrando as inovações e

expectativas do setor quanto à entrada de novas tecnologias e reatores nucleares. Além disso, o órgão destacou suas iniciativas em curso, como a formação de grupos de trabalho especializados no tema e colaborações com a AIEA e com o órgão regulador norte-americano.

Sobre a possível implementação de SMRs mais próximos a centros urbanos ou áreas industriais, o representante destacou a necessidade de análises criteriosas dos riscos envolvidos, incluindo as probabilidades de exposição radioativa, testes de segurança, planos de emergência e medidas de proteção. Destacou ainda a necessidade de aprofundar o entendimento sobre cada projeto, compreendendo melhor suas características operacionais e estruturas das instalações para uma avaliação mais precisa dos riscos envolvidos.

Quanto a possíveis ajustes nas zonas de exclusão, o representante da CNEN discute sobre uma eventualidade de acidentes simultâneos em SMRs operando paralelamente em um mesmo sítio. Nesse cenário, seria importante compreender os riscos e como o contingenciamento de uma unidade pode impactar às demais e ao sítio como um todo. Para ilustrar a possibilidade de alteração de parâmetros a depender do tipo de tecnologia utilizada, a CNEN mencionou que a zona de emergência de Angra está sendo revisada, uma vez que houve o desenvolvimento e avanço da tecnologia utilizada na operação da usina, como o aumento da precisão dos equipamentos.

Por fim, esclareceu que, embora a CNEN tenha maior experiência com reatores de água pressurizada, já em operação no Brasil, ela também está preparada para receber requerimentos de licenciamento de projetos que utilizem tecnologias diferentes. Admitiu, no entanto, que análises dessa natureza exigirão mais tempo e recursos da instituição, mas não constituem impeditivos para a aprovação de novos projetos.

Quanto menor a percepção de risco, maior a receptividade da sociedade em relação a instalações nucleares próximas a seus domicílios ou locais de trabalho.

5.3.3 Painel 3 - Comparações de tecnologias no contexto brasileiro

Q3 *“Seria possível fazer algumas comparações preliminares entre diferentes tecnologias em termos de quão perto o reator poderia ser instalado dos centros de demanda antes de entrar nas especificidades do processo de licenciamento?”*

Q3.1 *“Qual seria o conjunto de variáveis que apresentaria a correlação mais forte com a distância mínima permitida dos centros populacionais?”*

Q3.2 *“A localização exata da usina deve ser escolhida antes de se fazer qualquer estimativa sobre o tamanho da área de exclusão e da zona de baixa população?”*

Q3.3 *“Até que ponto os conceitos de área de exclusão, zona de baixa população e zona de planejamento de emergência usados no Brasil podem ser considerados equivalentes aos conceitos definidos pela NRC e outras instituições?”*

Q3.4 *“Os tamanhos das diferentes zonas (por exemplo, área de exclusão, zona de baixa população, zona de planejamento de emergência) precisam ser levados em conta separadamente ou podem ser considerados como funções uns dos outros?”*

Destacou-se a importância da percepção de risco para o desenvolvimento da tecnologia nuclear no Brasil. Quanto menor a percepção de risco, maior a receptividade da sociedade em relação a instalações nucleares próximas a seus domicílios ou locais de trabalho.

Destacou-se que, nas proximidades de Angra, a aceitação social é maior, o que facilitaria a implementação de novas usinas na região. No entanto, para um desenvolvimento amplo do setor, outras localidades deveriam ser consideradas. Especialmente se o objetivo for aproveitar as vantagens dos SMRs como tamanho reduzido, menor potência e suas novas possibilidades de aplicações.

Para alcançar este objetivo será necessário um trabalho intensivo para apresentar a tecnologia SMR à sociedade brasileira, enfatizando seus mecanismos de segurança e os benefícios que uma usina pode trazer para uma região.

Por fim, sugeriu-se a divulgação em meios de comunicação conhecidos sobre o setor nuclear e o SMR. Utilizando palavras simples, demonstrando a evolução da tecnologia, as melhorias de segurança, desmistificando pré-conceitos a respeito da fonte. Essa seria apenas uma

forma simples de melhorar a percepção de risco e aumentar a percepção de benefício da fonte nuclear.

5.3.4 Painel 4 - Perspectiva Industrial quanto à localização dos SMRs

Q4 “Do ponto de vista dos fornecedores de SMR, quais parecem ser os principais desafios para a instalação de usinas elétricas baseadas em SMR mais próximas dos centros de demanda?”

Q4.1 “Os fornecedores de SMR estão mais preocupados com os desafios técnicos ou regulatórios?”

Q4.2 “Algumas questões técnicas ou regulatórias são menos desafiadoras para algumas tecnologias SMR do que para outras? Por quê?”

Q4.3 “Os fornecedores de SMR identificaram problemas específicos no Brasil para a localização de usinas elétricas baseadas em SMR em comparação com o contexto internacional? Quais seriam esses problemas?”

Q4.4 “Os fornecedores de SMR teriam alguma recomendação de política para o Brasil relacionada à localização de usinas elétricas baseadas em SMR? Qual seria a recomendação?”

Os projetistas manifestaram que suas maiores preocupações estão relacionadas às incertezas regulatórias. Embora tenham controle sobre os designs, desenvolvimento e produção dos reatores para atender aos requisitos de proximidade com centros consumidores, ainda estariam dependentes das determinações impostas pelos órgãos reguladores.

As empresas buscam aproveitar as vantagens dos SMRs como tamanho compacto, modularidade e segurança aprimorada para se aproximar dos mercados consumidores, avaliando e reconhecendo que suas aplicações são diferentes daquelas empregadas para usinas nucleares tradicionais. No entanto, reforçam que ainda são necessários mais estudos e desenvolvimento tecnológico, além de maior clareza no posicionamento das agências regulatórias.

Além dos aspectos nucleares, foi destacada a importância do licenciamento ambiental, uma vez que a operação de novas usinas pode impactar características ambientais e climáticas do local.

Por fim, discutiu-se sobre as vantagens da instalação de vários SMRs em um mesmo sítio onde se reconhecem benefícios semelhantes às das usinas tradicionais como a geração de empregos, atração de investimentos regionais e benefícios econômicos e logísticos. Essa abordagem pode ainda aumentar a aceitação social.

A representante da EDF trouxe uma importante reflexão ao distinguir entre medidas efetivas de segurança e aquelas que, embora não sejam estritamente necessárias, contribuem para o aumento da percepção de segurança. Por exemplo, manter zonas de exclusão amplas, mesmo que não sejam tecnicamente necessárias, pode aumentar a aceitação social. A reflexão é de que todas as questões devem ser vistas de uma perspectiva mais geral, considerando o maior número de variáveis possível, e não apenas as necessidades regulatórias de um requisito.

5.4 Comentários e conclusões

- Os participantes enfatizaram a importância de difundir as inovações tecnológicas dos SMRs para a sociedade com o objetivo de desmistificar pré-conceitos à fonte, reduzir a percepção de risco e aumentar a percepção de benefício.
- As fabricantes de SMRs reconhecem as vantagens metodológicas do licenciamento por envelope, no entanto, ainda se mostram receosos das incertezas relacionadas ao processo de licenciamento. Essas incertezas, no entanto, devem ser reduzidas a partir da emissão das primeiras licenças.
- A CNEN acredita, a depender das inovações tecnológicas, na possibilidade de alteração do tamanho do sítio e da distância mínima necessária entre os SMRs e centros de demanda como áreas urbanas ou industriais.
- Em algumas situações pode ser interessante extrapolar os requisitos mínimos de segurança definidos pelo fabricante e órgãos reguladores com o objetivo de reduzir a percepção de risco da população e aumentar a aceitabilidade do empreendimento.
- Os projetistas demonstraram conhecimento das novas metodologias para seleção de sítios e têm adotado os guias do EPRI e INL em seus projetos. Esse alinhamento entre o setor privado, órgãos regulatórios e instituições técnicas indica progresso no desenvolvimento da indústria nuclear.

- No entanto, ainda são observadas incertezas regulatórias que precisam ser resolvidas para permitir o pleno desenvolvimento da tecnologia e a exploração de suas vantagens, incluindo a possibilidade de instalação próxima a centros consumidores de energia.

É preciso distinguir entre medidas efetivas de segurança e aquelas que, embora não sejam estritamente necessárias, contribuem para o aumento da percepção de segurança

A flexibilidade locacional é um importante aspecto de alguns modelos de SMRs. Na imagem, o SMR flutuante Akademik Lomonosov com potência elétrica de até 70MW. Este SMR tem como principal característica a capacidade de se deslocar por corpos hídricos

Imagem: ROSATOM



6 Tópico IV: Aplicações de calor para processos industriais e produção de hidrogênio a partir de SMRs

Specificities of heat applications for industrial processes and hydrogen production.

Uma motivação fundamental para considerar a opção de SMR na matriz energética brasileira está relacionada ao fato de que as tecnologias de SMR representam uma oportunidade mais promissora para a descarbonização de setores de difícil de abatimento de carbono em comparação com as tecnologias convencionais de energia nuclear. As tecnologias SMR poderiam ser mais facilmente acopladas a instalações industriais de utilização de calor e poderiam permitir uma gama mais ampla de rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio. Para que se tenha uma visão clara dessas oportunidades de mercado no Brasil, é necessária uma melhor compreensão não apenas das exigências das instalações que utilizam calor em seus processos, mas também o que os diferentes modelos e tecnologias de SMR podem fornecer economicamente. Os tópicos de interesse incluíram: comparações econômicas entre as tecnologias SMR de baixa e alta temperatura para a produção de hidrogênio; desafios típicos de engenharia para acoplar as instalações; requisitos técnicos e econômicos para limitar o risco de contaminação radioativa das instalações de utilização de calor; temperatura efetivamente utilizável para calor de processo; caracterização dos requisitos de carga (por exemplo, distribuição espacial, perfis temporais, níveis de temperatura, alterações necessárias no projeto).

O objetivo do tópico foi reunir informações sobre aspectos técnicos, econômicos e de localização, além dos usos alternativos de centrais elétricas baseadas em SMR, em particular, processos de aquecimento industrial e produção de hidrogênio. Outro objetivo foi alcançar uma compreensão clara sobre os avanços e desafios relativos à produção de hidrogênio através da energia nuclear. Finalmente, este evento buscou alcançar o entendimento de qual seria o modelo de negócios mais adequado para SMR no Brasil.

As principais referências utilizadas para embasamento da discussão foram:

1. IAEA, **Hydrogen Production with Operating Nuclear Power Plants – Business Case**, Viena, 2023.
2. Jianu, O.A., Naterer, G.F., Rosen, M.A., **Hydrogen co-generation with Generation IV nuclear power plants**. In: PIORO, I. (ed.). *Handbook on Generation IV nuclear reactors*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. v. 1, p. 637-659.

3. MIT Energy Initiative, *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*, 2018.

6.1 Reunião plenária

No dia 14 de abril de 2023 o consultor em tecnologia nuclear, Carlos Leipner, apresentou durante a reunião plenária do Tópico IV uma análise sobre os potenciais usos dos SMRs na produção de hidrogênio como vetor energético para a descarbonização. Sua exposição abordou desde o contexto do setor nuclear até as aplicações práticas e desafios dessa integração.

O consultor destacou o avanço dos SMRs no cenário global, enfatizando sua modularidade e flexibilidade, características que os tornam adequados para geração de energia elétrica e para outras aplicações, como a produção de hidrogênio. Em seguida, discutiu o papel atual do hidrogênio na matriz energética, ressaltando seu potencial para reduzir emissões em setores de difícil descarbonização, como aviação, transporte marítimo, siderurgia e processos industriais de alta temperatura. Embora seu uso ainda seja limitado, o hidrogênio não deve ser visto como uma solução de nicho, mas sim como uma alternativa viável para múltiplas cadeias produtivas.

Um dos pontos centrais da apresentação foi a relação entre a tecnologia do reator nuclear e a viabilidade da produção de hidrogênio. Reatores como os LWRs, que são refrigerados a água e operam entre 100°C e 300°C, são mais adequados para aplicações como dessalinização e aquecimento urbano. Já a produção de hidrogênio por reforma do metano exige temperaturas mais elevadas (400°C a 800°C), o que demandaria reatores avançados, como os de sal fundido ou resfriados a sódio. Além disso, Leipner comparou os métodos de produção de hidrogênio por eletrólise, destacando que a eletrólise de alta temperatura (a partir de vapor d'água) é mais eficiente e economicamente competitiva do que a eletrólise convencional (a partir de água líquida), especialmente quando acoplada a reatores nucleares avançados.

Por fim, o consultor mencionou iniciativas internacionais que estão impulsionando essa integração, como o *Inflation Reduction Act*- IRA dos EUA, que inclui incentivos específicos para energia nuclear e hidrogênio limpo.

6.2 Reunião Técnica

A reunião técnica do tópico IV foi realizada no dia 19 de maio de 2023 e contou com a presença de representantes da Rosatom, Westinghouse e Holtec.

6.2.1 Painel 1 - Perspectiva técnica de utilizações alternativas de usinas de energia SMR.

Q1 “Ao considerar usos alternativos da energia nuclear além da geração de energia, quais seriam os impactos e as diferenças de projeto relacionados aos tipos de reatores e às tecnologias de trocadores de calor?”

Q1.1 “Qual seria o projeto mais adequado para cada aplicação? Para processos de aquecimento industrial? Para a produção de hidrogênio? Ou outra aplicação (dessalinização, por exemplo)?”

Q1.2 “Quais seriam as temperaturas do refrigerante e de operação para cada aplicação: processos de aquecimento industrial, produção de hidrogênio ou outros usos?”

Q1.3 “Quais seriam as eficiências elétrica, térmica e geral do processo para cada aplicação: processos de aquecimento industrial, produção de hidrogênio ou outros usos?”

Q1.4 “Quais seriam os desafios de licenciamento de outros usos de SMRs considerando especificamente essas aplicações?”

Conforme discutido pelos projetistas e representantes da indústria as aplicações não elétricas de reatores nucleares apresentam um potencial significativo para a diversificação do uso da energia nuclear. A viabilidade dessas aplicações está diretamente relacionada ao tipo de tecnologia dos reatores. Reatores avançados, capazes de atingir temperaturas mais elevadas, mostram-se mais adequados para processos industriais que demandam alto calor, enquanto reatores PWR convencionais são mais indicados para aplicações em temperaturas moderadas, como processos industriais que utilizam vapor e sistemas de dessalinização.

Neste contexto, o representante da Holtec destacou o desenvolvimento de uma tecnologia que utiliza um boiler associado ao SMR para produção de vapor em altas temperaturas. O sistema inclui capacidade de armazenamento térmico do calor produzido pelo reator e teria a possibilidade de aumentar ainda mais a temperatura através de aquecimento elétrico com

energia fornecida pelo próprio sistema. Embora promissora, esta tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento, com estudos em andamento para avaliar sua viabilidade econômica e eficiência energética. Um dos principais focos de aplicação seria a produção de hidrogênio, onde a utilização o vapor em alta temperatura poderia superar a baixa eficiência da eletrólise convencional, especialmente em processos como a pirólise de metano.

As discussões também evidenciaram o potencial de aproveitamento do vapor residual, normalmente descartado, que poderia aumentar a eficiência operacional dos reatores de 33% para 44% através de sistemas de cogeração. A tecnologia PWR apresenta vantagens significativas nestas aplicações, principalmente devido ao seu sistema de isolamento que mantém o circuito primário (radioativo) separado do secundário (vapor limpo), permitindo maior flexibilidade operacional e segurança quando comparado a sistemas do tipo BWR.

A implementação destas soluções requer, no entanto, estudos adicionais para compreender como a usina se comportará, caso comece a redirecionar parte do vapor gerado para outras aplicações. Essa consideração poderá influenciar inclusive o processo de licenciamento, uma vez que poderá suscitar questionamentos do regulador.

6.2.2 Painel 2 - Perspectiva econômica de usos alternativos de usinas de energia SMR.

Q2 “Qual seria o aumento da competitividade da geração baseada em SMR em relação aos diferentes usos, incluindo eletricidade, produção de hidrogênio e aplicações de calor?”

Q2.1 “Quais seriam os custos comparativos das diferentes aplicações?”

Q2.2 “Do ponto de vista dos fornecedores de SMRs, quais seriam as oportunidades de modelos de negócios mais viáveis para cada aplicação? Há algum caso de negócios para compartilhar?”

Q2.3 “De fato, haveria um efeito de portfólio? Quais seriam seus benefícios?”

Q2.4 “Com relação à possibilidade de diferentes produtos na mesma instalação, como os fornecedores de SMR veem a possibilidade de produção flexível (por exemplo, etanol vs. açúcar vs. eletricidade vs. etanol 2G)? Como os fornecedores de SMR avaliam os possíveis mercados? Existe alguma capacidade mínima de cada produto?”

A competitividade das aplicações não elétricas da energia nuclear apresenta forte dependência de fatores contextuais específicos. Como a aceitação social da tecnologia

nuclear no país de implantação; a disponibilidade de recursos e infraestrutura local; as demandas específicas do mercado; o posicionamento do órgão regulador frente a inovações; e o arcabouço de políticas públicas vigentes. Neste contexto, o ideal seria ter um olhar abrangente do cenário, e não apenas concentrar-se no uso não elétrico em si.

Os participantes do debate concordam na perspectiva de que a diversificação de aplicações nucleares tende a ampliar a competitividade da tecnologia como um todo. Contudo, essa análise tende a ser específica para cada projeto, e varia substancialmente entre diferentes contextos nacionais e regionais sendo complexo fazer afirmações generalizadas.

Quanto à produção de hidrogênio a partir de energia nuclear, os especialistas concordam que reatores nucleares de altas temperaturas garantiriam a maior eficiência se comparado a qualquer outro método. A pirólise do metano, além de já ser o processo mais eficiente, também produz carbono em formato sólido como resíduo da produção. Este subproduto poderia ser reutilizado como insumo em outras atividades como, por exemplo, a produção de fibras de carbono.

Quanto aos reatores em fase de desenvolvimento, persistem questões em aberto sobre a operação combinada para geração elétrica e térmica. A ausência de dados operacionais concretos dificulta a avaliação precisa das restrições inerentes a estes sistemas em operação híbrida (elétrica/não elétrica). Neste cenário, a compreensão detalhada dos requisitos operacionais da usina é essencial, uma vez que há especificações de projeto que podem ou devem ser definidas com intuito de otimizar uma ou outra aplicação.

Independentemente do mercado-alvo, os especialistas destacam princípios fundamentais para o desenvolvimento de reatores nucleares, incluindo análises de custo-benefício, confiabilidade operacional, reatividade, capacidade de resposta e transparência. O foco está em maximizar a performance do reator para oferecer a eficiência que o cliente deseja, combinando características universais (como acompanhamento de carga) com flexibilidade para adaptação a demandas específicas. Essa abordagem busca oferecer soluções robustas e versáteis, buscando um reator flexível que possa atender demandas alternativas, se adequando facilmente a realidade de cada cliente.

6.2.3 Painel 3 - Aspectos de localização relacionados aos usos da usina de energia baseada em SMR para processos de aquecimento industrial e produção de hidrogênio.

Q3 “Do ponto de vista dos fornecedores de SMRs, como o aspecto da localização poderia afetar os aspectos técnicos e econômicos dos SMRs em relação à produção de hidrogênio, serviços de aquecimento industrial e outros usos?”

Q3.1 “Quais seriam os recursos naturais e os aspectos de localização necessários para cada aplicação?”

Q3.2 “Existe algum recurso suficientemente crítico para definir a localização da usina elétrica baseada em SMR?”

Q3.3 “Há alguma diferença em relação à demanda de recursos naturais para produzir hidrogênio ou aplicação de calor a partir de SMRs?”

Q3.4 “Além dos recursos naturais, há outras características de localização que devem ser consideradas para delimitar áreas que favoreçam o uso de SMRs para a produção, o armazenamento e o transporte de hidrogênio ou para a produção e o envio de calor para usos industriais?”

A infraestrutura necessária para cada aplicação específica influencia diretamente a escolha do sítio, embora esta decisão permaneça altamente dependente de características particulares de cada projeto. Fatores como o país onde o reator será instalado, o nível de desenvolvimento da região e a cadeia de suprimentos disponível no local se mostram determinantes nesta equação.

Os desenvolvedores de SMRs admitem possuir conhecimento limitado sobre as especificidades detalhadas de cada local potencial. Diante desta realidade, a estratégia adotada tem sido projetar reatores com máxima adaptabilidade, capazes de se adequar à maior variedade possível de condições e ambientes. Esta abordagem se traduz no estabelecimento de um envelope de parâmetros técnicos amplos, garantindo que os SMRs possam ser instalados em diferentes tipos de solo, suportar variações climáticas significativas e resistir a diversas cargas operacionais.

No que diz respeito aos critérios de seleção de sítios, os projetistas têm concentrado seus esforços em aspectos fundamentais como a redução da zona de emergência e o

dimensionamento das estruturas de suporte do reator - elementos que mantêm sua relevância independentemente da aplicação final escolhida. A expectativa do setor é que os SMRs possam ser instalados mais próximos aos centros de demanda, beneficiando-se da redução das áreas de exclusão e das vantagens logísticas desta proximidade, além de facilitar o aproveitamento do vapor quente em processos industriais próximos.

Entretanto, esta proximidade com centros populacionais introduz desafios significativos, particularmente relacionados à aceitação social das comunidades vizinhas. Independentemente da aplicação escolhida alguns fatores críticos devem ser necessariamente considerados na seleção do sítio: a disponibilidade de área física suficiente para acomodar tanto o reator quanto a infraestrutura associada à aplicação; o acesso a recursos naturais adequados para o sistema de resfriamento; e as características geológicas do local, incluindo a qualidade do solo e do subsolo. Estes elementos formam a base para qualquer análise de viabilidade de localização de SMRs.

6.2.4 Painel 4 - Produção de hidrogênio a partir de usinas de energia baseadas em SMR.

Q4 “Do ponto de vista dos fornecedores de SMRs, como seriam as alternativas de produção de hidrogênio a partir de usinas de energia baseadas em SMR?”

Q4.1 “Quais seriam as rotas tecnológicas de produção de hidrogênio mais promissoras? Isso depende do tipo de reator, da localização ou de algum tipo de recurso?”

Q4.2 “Qual é o grau de maturidade desses processos? O armazenamento e o transporte de hidrogênio seriam um desafio?”

Q4.3 “Quais seriam os principais desafios para a produção de hidrogênio no Brasil (perspectiva do regulador, por exemplo)?”

A produção de hidrogênio através de energia nuclear apresenta diversas rotas tecnológicas, cada uma com características distintas. A eletrólise da água, método amplamente conhecido, requer eletricidade como insumo principal. Enquanto o chamado "hidrogênio verde" tradicionalmente utiliza fontes renováveis, a superioridade nuclear em fator de capacidade (90% contra 20-25% das renováveis) posiciona os reatores como alternativa competitiva. Esta vantagem se amplifica quando se considera o uso de reatores avançados de alta temperatura,

onde o vapor quente adicional pode incrementar significativamente a eficiência do processo, com potencial para redução drástica nos custos de produção.

Os presentes debateram que um dos métodos mais baratos para a produção hidrogênio, a partir de fonte nuclear, seria a utilização de vapor d'água a altas temperaturas para realizar a pirólise do metano. Para esse processo, seria necessário um SMR a sal fundido que atingiria temperaturas na ordem de 500°C. Além de ser o mais barato, teria uma eficiência ainda maior e o carbono produzido no processo estaria em formato sólido, evitando a necessidade de tecnologias de captura.

Existem ressalvas, entretanto quanto aos benefícios e vantagens da produção de H₂ a partir de vapor a altas temperaturas. Foi levantada a existência de questões industriais que poderiam dificultar a operação e o andamento do processo, como o consumo mais rápido do catalisador utilizado na reação, o que tenderia a aumentar o custo de operação. Outra preocupação seriam as consequências das altíssimas temperaturas para as partes mecânicas e para os sistemas, as formações de sólidos, dentre outros aspectos operacionais. Diante do exposto, os debatedores concordaram que tais benefícios ainda precisam ser demonstrados e comprovados de forma prática.

Como alternativa intermediária, ganha espaço a produção combinada utilizando eletricidade e vapor em temperaturas moderadas. Esta solução, embora menos eficiente, apresenta menor risco tecnológico de modo que esta é uma rota tecnológica reconhecidamente interessante por contar com uma combinação de desempenho satisfatório e confiabilidade operacional mais conhecida.

Por fim, quanto à segurança de se armazenar hidrogênio no sítio, próximo aos SMRs, os representantes esclareceram que já desenvolvem reatores com intuito de serem robustos. Isto é, o projeto já envolve uma vasta análise de riscos potenciais como, colisão de aeronaves, terremotos, certos tipos de explosão, terrorismo, dentre outros. A presença de um combustível altamente inflamável no sítio, como o H₂, com certeza, seria mais um aspecto a ser considerado e abordado nos projetos. Os projetos incluem avaliações específicas de probabilidade de ocorrência e medidas de mitigação robustas, assegurando que os padrões de segurança nucleares sejam mantidos mesmo com a introdução deste novo vetor energético.

6.3 Comentários e conclusões

- Apesar da flexibilidade operacional, alguns modelos e rotas tecnológicas podem ser mais apropriadas para a oferta de serviços ou produtos específicos.
- A produção de hidrogênio é um exemplo em que existem diferentes rotas tecnológicas para a produção. As que utilizam temperaturas muito altas parecem ser mais eficientes e com menor pegada de carbono.
- Considerando as tecnologias de água leve, a PWR tem vantagem sobre a BWR devido ao seu ciclo adicional de troca de calor que produz vapor sem contato com material radioativo, o que a torna mais flexível para ser adotada em diferentes aplicações, apesar de sua menor eficiência de transformação de energia.
- Os sistemas de armazenamento de calor (como tipo de reserva) podem melhorar significativamente a flexibilidade de funcionamento das centrais eléctricas, incluindo a cogeração.
- O licenciamento pode apresentar desafios diferentes de acordo com a tecnologia e as suas diferentes formas de produção de calor, vapor ou temperatura a atingir.
- A forma como a central nuclear é integrada com a central adicional pode trazer desafios regulamentares, uma vez que os mecanismos de troca de calor entre as duas centrais devem ser analisados e se isso pode afetar o funcionamento e a segurança da central nuclear.
- A competitividade das diferentes aplicações depende muito do país, do mercado, da necessidade, do tipo de consumidores e das infraestruturas existentes.
- A viabilidade técnica e econômica de aplicações alternativas é dependente da disponibilidade de matérias-primas (água para a produção de calor de processo, gás natural para pirólise ou reforma a vapor).
- A competitividade depende da política energética nacional e dos requisitos ambientais e regulamentares.
- A infraestrutura é um ponto-chave relacionado com a competitividade econômica.
- A proximidade de zonas densas pode trazer vantagens como o aumento da eficiência térmica para o abastecimento industrial ou distrital de calor. No entanto, também pode apresentar desafios relacionados à aceitação pública e CAPEX mais elevado devido ao preço dos terrenos.

- No caso do hidrogênio, o armazenamento e o transporte podem ter um impacto significativo no custo e na viabilidade.
- Foram apontadas diferentes rotas tecnológicas de produção de hidrogênio com o uso de SMRs, como pirólise do metano, reforma a vapor, eletrólise ou a combinação de diferentes processos.
- Algumas vantagens teóricas relacionadas com a produção de hidrogênio podem não ser adequadas para o ambiente industrial, uma vez que podem exigir estruturas e processos dispendiosos.
- A pirólise do metano produz carbono sólido que pode ser um subproduto para indústrias específicas.



Três indústrias pesadas: química, siderurgia e cimento, são responsáveis por quase 60% de todo o consumo energético industrial e por cerca de 70% das emissões de CO₂ do setor industrial mundial (IEA 2021). Um dos motivos dessa alta taxa de emissões é a

massiva utilização de combustíveis fósseis como o carvão e gás natural para geração de calor de alta temperatura, essencial na fabricação de ferro, aço, cimento e diversos produtos químicos.

Estes setores de difícil descarbonização, representam potenciais mercados para a utilização de hidrogênio e calor de alta temperatura gerados por determinados modelos de SMRs.

7 Tópico V: Aplicações e características dos SMRs em Sistemas Isolados e Áreas Remotas

Specificities of remote and off-grid applications

O alto custo de geração de eletricidade em locais remotos do Brasil, especialmente na Bacia Amazônica, representa uma oportunidade de mercado atraente para sistemas de fornecimento de energia em pequena escala que podem ser flexíveis e despacháveis, como seria o caso de uma tecnologia SMR. Entretanto é ainda necessário entender melhor quais são as tecnologias SMR específicas que poderiam abordar adequadamente as preocupações específicas desses locais, especialmente relacionadas à segurança ambiental e à necessidade de garantir o fornecimento adequado de eletricidade em condições incomuns. Além das questões de flexibilidade e das várias características que afetam o fator de capacidade da usina de geração de energia, os tópicos de interesse também incluem, mas não se limitam a: viabilidade técnica da operação sem supervisão; até que ponto a usina de geração de energia dependeria de manutenção especializada; possibilidade de usar fontes de calor de reserva para o ciclo de energia

Diante de tais questões o objetivo principal deste tópico foi reunir informações sobre economia, operação, segurança e proteção, logística e infraestrutura de microrreatores. Outro objetivo fundamental foi obter um entendimento claro sobre as vantagens e os desafios da operação remota de microrreatores e entender qual é o modelo de negócio mais adequado para a operação de microrreatores em áreas isoladas ou off grid.

As principais referências utilizadas neste tópico são:

1. BLACK *et al* ***Prospects for Nuclear Microreactors: A Review of the Technology, Economics, and Regulatory Considerations***, 2022.
2. GILBERT, Alexander Q.; BAZILIAN, Morgan D. ***Can distributed nuclear power address energy resilience and energy poverty?*** *Joule*, v. 4, n. 9, p. 1839-1843, 2020.
3. NEI Report; ***Cost Competitiveness of Micro-Reactors for Remote Markets***. Washington, 2019.

7.1 Reunião Plenária

A reunião plenária do tópico V foi realizada no dia 04 de agosto de 2023.

Representantes da Diretoria de Energia Elétrica da EPE, fizeram uma apresentação sobre as regiões isoladas no Brasil. O intuito dessa apresentação foi caracterizar tais regiões, a sua demanda energética, a sua localização, obstáculos ou dificultadores da logística nessa região.

As regiões isoladas foram definidas como aquelas que não estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), seja por razões técnicas ou econômicas. Apesar dessa característica comum, cada local possui suas especificidades e diferentes ordens de demanda de pico. São exemplos dessas regiões, a ilha de Fernando de Noronha, com demanda de 5,6MW, a cidade de Afuá, com demanda de 2,3MW, e a cidade de Manacapuru, com demanda de 0,3MW.

Essas regiões estão mais concentradas no norte do Brasil, somando mais de 200 localizações diferentes. Essas representam aproximadamente 3 milhões de consumidores, 0,6% do consumo energético total brasileiro e 40% do território nacional.

Essas regiões são caracterizadas pelas altas taxas de queda de energia e uma qualidade energética baixa. Assim, a principal fonte de energia elétrica nesses locais é o óleo diesel.

Geradores a diesel são confiáveis e simples de serem operados e mantidos além de possuírem uma cadeia de suprimentos madura. No entanto, têm um custo operacional alto com a aquisição do combustível, além dos altos índices de emissões de gases de efeito estufa.

O analista da EPE explicou o processo de planejamento do suprimento energético para essas regiões, assim como, do processo de autorização e leilão para suprimento dos sistemas isolados. Este processo conta com várias etapas e atores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério de Minas e Energia (MME), a EPE e as distribuidoras.

Foram apresentados os principais desafios para o fornecimento de energia elétrica nesses locais. Esses desafios podem ser agrupados em restrições logísticas locais, falta de trabalhadores qualificados e condições climáticas. A logística de suprimento se vale dos rios como via de transporte o que limita seu alcance no período de seca. As longas distâncias fazem com que o acesso a determinadas regiões de barco demore até sete dias de viagem. Quanto ao clima, os locais alcançam altas temperaturas, com a umidade próxima a 90% na

temporada chuvosa, e meses com 22 dias chuvosos, principalmente, no período de dezembro a maio.

Quanto a uma análise de demanda dos sistemas isolados, cerca de 100 deles tem demanda de pico inferior a 0,1MW. Apenas 30 locais possuem uma demanda superior a 5MW, sendo que há a expectativa de que metade dessas localidades serão conectadas ao SIN até 2027. A Figura 1 apresenta um mapa com a localização dos sistemas isolados no Brasil em 2024.

A expectativa de entrada de gás natural e biomassa nos próximos anos tende a reduzir a participação do óleo diesel nos sistemas isolados. No entanto, apesar das dificuldades logísticas e as emissões, o diesel continua sendo uma tecnologia confiável para essas regiões. Assim, há uma série de requisitos a serem atendidos para ser habilitado em um leilão para fornecer energia para os sistemas isolados no país.

A EPE apresentou uma das alternativas que está sendo analisada, uma interconexão entre os sistemas isolados. Essa análise considera os requisitos técnicos e o custo-benefício da interligação e avalia os impactos como: a redução dos custos da expansão das linhas de transmissão e/ou de distribuição em regiões sensíveis ambientalmente; a redução da dependência local do óleo diesel; a garantia energética em regiões remotas considerando um conjunto entre geração local e expansão das linhas do SIN.

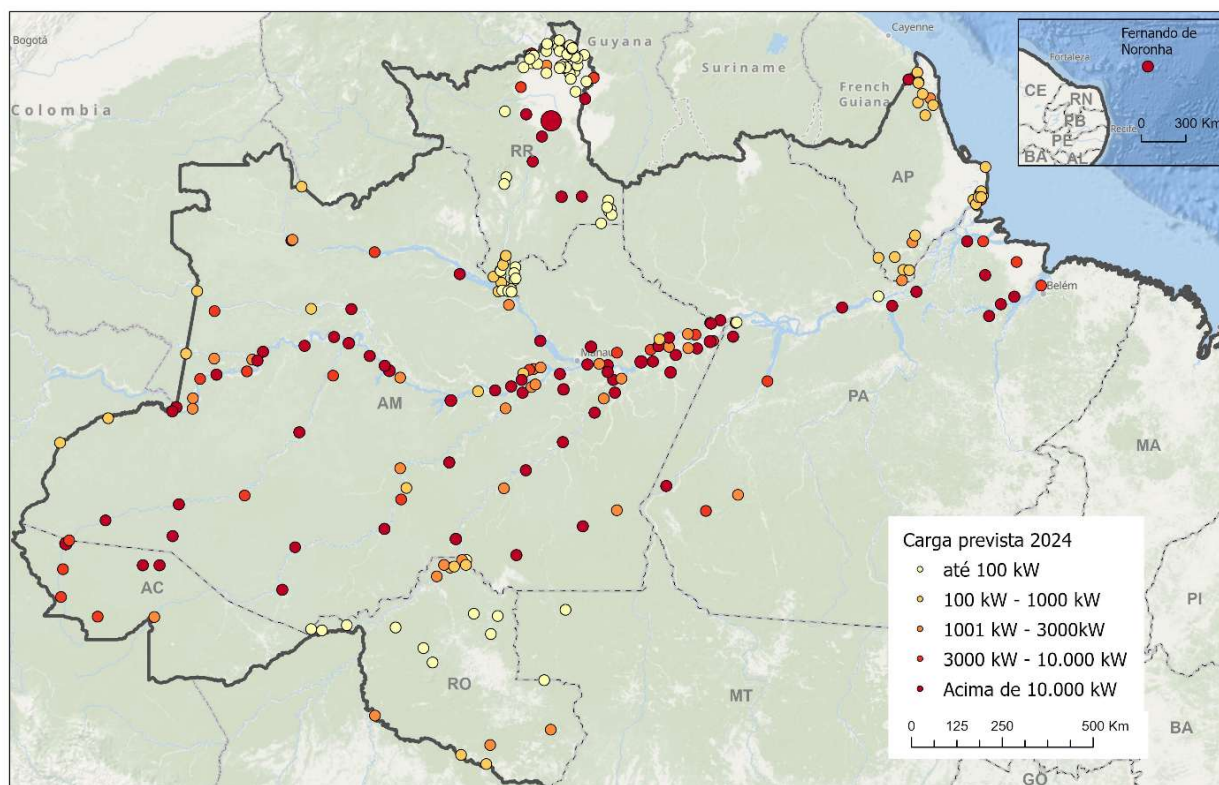


Figura 1 - Localização dos Sistemas Isolados no Brasil. 2024

Tecnologias ideais para o atendimento elétrico em áreas isoladas necessitam atender alguns requisitos: Entre eles: a capacidade de arranque autônomo, unidades modulares e de tamanhos reduzido, pequenas instalações com baixos custos de operação, capacidade de acompanhar carga, capacidade de operar com uma estrutura de rede mais instável e capacidade de fornecer energia confiável.

Alguns representantes demonstraram interesse no processo de leilão para os sistemas isolados. O representante da Westinghouse apresentou o microrreator que está sendo desenvolvido pela empresa, o eVinci, cujas características atendem a vários dos requisitos elencados.

Os presentes comentaram sobre a análise de competitividade das fontes para os sistemas isolados. Questionou-se se o custo de instalação de um SMR ou de um microrreator seria justificável ante a outras opções como diesel e biodiesel. Concluiu-se sobre a importância de estudos mais aprofundados comparando as alternativas, reunindo assim, dados sobre a viabilidade das tecnologias.

Outra alternativa citada foi a instalação de um SMR para fornecer energia elétrica para uma interligação de regiões remotas, formando uma pequena rede. Em teoria, poderia ser economicamente viável, com extensões menores de linhas de transmissão a construir. Tal opção também merece maiores estudos e desenvolvimento, visto que ainda são longas distâncias a serem conectadas e há restrições da vegetação local que limitaria instalação das linhas, e travessias em grandes rios como o Rio Amazonas.

A tecnologia ideal de atendimento elétrico em áreas isoladas deve apresentar tamanho reduzido, unidades modulares, baixos custos de operação, capacidade de arranque autônomo e acompanhamento de carga, capacidade de operação em estruturas de rede instáveis e fornecer energia confiável

7.2 Reunião técnica

A reunião técnica foi realizada no dia 13 de setembro de 2023. Os painéis de discussão foram divididos em quatro subtópicos com foco nas análises da perspectiva econômica, perspectiva operacional, segurança e proteção, logística e infraestrutura.

7.2.1 Painel 1 – Perspectiva econômica

Q1 “Do ponto de vista dos fornecedores de SMRs, quais seriam os mercados mais promissores para microrreatores?”

Q1.1 “Os microrreatores estão sendo projetados para aplicações além da geração de energia? Eles são adequados para fornecimento de calor, produção de hidrogênio, substituição de geradores a diesel, aplicações fora da rede ou até mesmo para uso em mineração? Em que condições eles ofereceriam mais vantagens em comparação com outras tecnologias de baixo carbono?”

Q1.2 “Quando se trata de microrreatores, o que os fornecedores consideram o melhor modelo de negócios? A venda de equipamentos ou o serviço de fornecimento de energia?”

Q1.3 “Há algum esforço do setor para adotar padrões para combustíveis ou equipamentos a serem usados em microrreatores?”

Q1.4 “Como o setor vê os valores de CAPEX (US\$/MW) de microrreatores vs. SMRs vs. NPPs?”

A flexibilidade dos microrreatores nucleares abre um leque de aplicações potenciais, desde a pesquisa acadêmica em universidades, usos industriais e emergenciais, graças à sua portabilidade e facilidade de transporte demonstrando seu potencial inovador.

Os projetistas destacam que os mercados mais promissores para essa tecnologia são os sistemas isolados e o setor industrial, com ênfase especial na mineração. Isso porque o ciclo de vida médio de uma mina, em torno de 20 anos, se alinha perfeitamente com a duração operacional prevista para os microrreatores em desenvolvimento. Além disso, a substituição de geradores a diesel por microrreatores surge como uma opção atraente, não apenas pela redução de emissões, mas também pela maior confiabilidade energética em locais de difícil

acesso. Para a indústria de petróleo e gás, reatores maiores, na faixa de 100MW a 300MW, são considerados mais adequados.

A demanda por soluções energéticas em comunidades isoladas não se limita ao Brasil. Países como Canadá e EUA também enfrentam desafios semelhantes e têm oferecido incentivos econômicos para o desenvolvimento de alternativas ao diesel. Esses incentivos são justificados pelo impacto positivo que o acesso à energia traz para a qualidade de vida, saúde, segurança e desenvolvimento econômico dessas regiões. No entanto, apesar do otimismo em relação ao potencial de mercado, o sucesso comercial dos microrreatores dependerá dos primeiros casos de implementação bem-sucedida, que precisarão comprovar a confiabilidade e segurança da tecnologia.

A Westinghouse informou que vem trabalhando em um modelo de microrreator, o eVinci, que possui 5MW de potência, tem um ciclo programado de reabastecimento de oito anos e estaria sendo desenvolvido para se adequar a logísticas mais restritivas. A empresa projetou o eVinci especificamente para atender a demandas em locais remotos. Embora o design ainda esteja na fase de desenvolvimento, a Westinghouse já considera opções inovadoras, como a instalação do reator em plataformas flutuantes, similar aos projetos de usinas nucleares marinhas em estudo. Essa abordagem permitiria maior mobilidade, atendendo a diferentes regiões conforme a necessidade. Outra possibilidade em discussão, embora mais distante devido a desafios regulatórios, é o uso em aplicações offshore e em explorações de águas profundas.

No debate a respeito de modelo de negócios, a Westinghouse informou que planeja inicialmente atuar como fornecedora da tecnologia, deixando a operação para um parceiro especializado. Essa estratégia visa compartilhar os riscos inerentes aos projetos pioneiros. No futuro, porém, a empresa não descarta a possibilidade de assumir também a operação dos reatores, oferecendo energia diretamente como serviço.

Quanto ao custo nivelado de energia (LCOE), a Westinghouse tem a expectativa de atingir US\$ 0,20/kWh no eVinci, sem considerar a bateria. Em termos comparativos, o custo da energia da rede no Canadá está em torno de US\$ 0,08 - 0,15 /kWh, já as comunidades remotas estão pagando um valor de US\$ 1/kWh. Dessa forma, o eVinci pode não ser economicamente competitivo com a energia disponibilizada pela rede, mas se mostra uma alternativa economicamente viável considerando alguns sistemas isolados.

Já na experiência chinesa, os representantes da China National Nuclear Corporation - CNNC -informaram que atualmente, os SMRs são unicamente para propósitos de pesquisa. Mas já vislumbram os mercados de aquecimento, produção de hidrogênio e sistemas isolados no futuro. Os projetistas afirmaram que há um esforço para a padronização desses reatores, no entanto, esclareceram que ainda há desafios logísticos e regulatórios a serem solucionados. Segundo eles, o regulador pode desempenhar o papel de impulsionar o crescimento do setor ou de dificultá-lo, o que insere incertezas nos projetos e expectativas dos desenvolvedores da tecnologia.

7.2.2 Painel 2 – Perspectiva Operacional

Q2 “Como essas usinas operariam durante todo o seu ciclo de vida? Os microrreatores seriam capazes de modular a geração para atender à carga em sistemas isolados ou pequenos? Quais seriam as possíveis restrições em termos operacionais para garantir a continuidade do fornecimento?”

Q2.1 “Quais são os principais atributos dos microrreatores em termos de flexibilidade operacional? Capacidade de monitoramento de carga, capacidade operacional mínima, ramp up e ramp down, restrições de partida e parada, tempo mínimo de permanência ligado (Ton) e desligado (Toff), fornecimento de serviços auxiliares.”

Q2.2 “Qual seria o tamanho mínimo da rede, o nível de tensão? Quais seriam os possíveis sistemas auxiliares para esses microrreatores? (Baterias, armazenamento térmico, geradores de motores auxiliares)”

Q2.3 “Qual é a frequência de paradas para manutenção e substituição de combustível? Qual é a duração necessária para essas paradas?”

Q2.4 “Qual é a equipe mínima necessária para operar um microrreator em uma área isolada ou remota? É possível uma operação totalmente remota? Qual é a infraestrutura mínima necessária?”

Segundo a Westinghouse o eVinci está sendo desenvolvido especificamente para operação em sistemas isolados, o microrreator foi concebido com foco em autonomia operacional e simplicidade de implantação. Sua fabricação ocorre integralmente em ambiente industrial, sendo transportado ao local definitivo preferencialmente de trem, mas também sendo possível por navio ou outros veículos terrestres. A empresa destaca que em determinadas

localidades remotas o transporte multimodal será necessário, especialmente no trecho final. O principal desafio logístico está relacionado ao peso, e não às dimensões dos equipamentos em si.

Segundo a representante, o sistema foi projetado para instalação simplificada sobre uma plataforma de concreto, exigindo apenas a criação de uma zona de contingência. O período entre a chegada do equipamento e o início da operação deverá ser de aproximadamente 30 dias. Uma vez em funcionamento, o eVinci deverá operar continuamente por oito anos sem necessidade de reabastecimento. Após esse período, um novo reator deverá ser levado até o local para uma substituição completa. Portanto, não existirá recarga *in loco*, esgotado o combustível, os reatores serão resfriados e transportados novamente para as instalações da Westinghouse.

A empresa ainda destacou que o núcleo do reator não requer manutenção durante seu ciclo operacional, embora componentes periféricos possam eventualmente necessitar de intervenção, o que deve ser realizado sem interrupção da geração elétrica.

Um diferencial tecnológico significativo é o sistema de resfriamento por transferência de calor, que dispensa completamente o uso de água e será realizado através de diversas tubulações e bombas que viabilizam a troca de calor.

Quanto à flexibilidade na operação, o eVinci contará com um sistema de baterias que permitirá ajustes de carga na ordem de milissegundos e pelo tempo necessário para que o reator possa variar sua potência. A empresa reforça, no entanto, que o modo mais eficiente de operar o reator é na potência máxima, mas, caso opere abaixo desse valor, o ciclo de reabastecimento poderá ser prolongado.

Quanto à operação, a Westinghouse projeta um cenário futuro de monitoramento remoto, com pessoal local necessário apenas para ativação, desligamento e monitoramento da operação. No entanto, até que a tecnologia esteja aprovada e tenha sua segurança reconhecida, a empresa compreende que serão necessários 2 operadores e 2 seguranças nas instalações. Estes requisitos, entretanto, podem variar pois são aspectos que dependem das restrições e considerações do órgão regulador de cada país.

7.2.3 Painel 3 – Segurança e proteção

Q3 “Esses microrreatores podem ser operados de forma remota ou semi-remota? Considerando a possibilidade de ocorrência de eventos críticos, internos ou externos, como garantir a segurança nuclear das instalações (sem proliferação)?”

Q3.1 “Quais são os pontos críticos, inovações ou recursos tecnológicos necessários para garantir a segurança operacional dessas instalações (sistemas de comunicação, monitoramento, segurança no local)? Quais são os pontos críticos a serem considerados para garantir a segurança e a proteção dos microrreatores localizados em áreas remotas?”

Q3.2 “Do ponto de vista da segurança, é possível apontar uma rota tecnológica melhor para permitir a operação de microrreatores em áreas remotas (tecnologia do reator, sistemas de segurança passiva e ativa)? Qual seria e por quê?”

Q3.3 “Os sistemas de resfriamento são os principais pontos de preocupação nas paradas de usinas nucleares. Quais são os mecanismos de resfriamento a serem adotados nos microrreatores?”

Segundo a Westinghouse o eVinci utiliza combustível TRISO com 19,75% de enriquecimento. Este combustível é considerado o mais seguro pelas autoridades norte-americanas pois é fabricado com camadas cerâmicas que visam impedir o vazamento de materiais radioativos mesmo em cenários extremos. Além do combustível mais seguro o sistema é resfriado a ar (a ausência de água no sistema de resfriamento minimiza riscos associados a vazamentos ou explosões por pressão). O reator também possui barreiras físicas de proteção para aumentar a segurança da operação e do local.

A questão do combustível irradiado é um ponto de segurança importante. A Westinghouse ainda não dispõe de um repositório definitivo para o combustível nuclear usado, mas planeja estabelecer parcerias com instituições especializadas para armazenamento temporário. Enquanto isso, os próprios microrreatores desativados podem servir como unidades de armazenamento provisório, mantendo o combustível em seu interior de forma segura.

Quanto ao armazenamento definitivo a empresa argumenta que governos de vários países já reconheceram a necessidade de desenvolver repositórios permanentes e estão investindo nessa infraestrutura. No entanto, a empresa destaca a importância de comunicar com

transparência à sociedade os protocolos de segurança envolvidos nesse processo, garantindo a confiança pública na tecnologia.

Quanto a infraestrutura mínima para operação dos microrreatores em regiões remotas, considera-se o reator, um conversor de energia, a bateria para acompanhamento de carga e os sistemas de controle, todos envolvidos em um edifício de concreto. Os projetistas consideram também a possibilidade de comunicação via satélite para monitoramento.

7.2.4 Painel 4 – Logística e infraestrutura

Q4 Quão compactos seriam os microrreatores e que infraestrutura logística seria necessária para o seu transporte e para o transporte de combustível?

Q4.1 Eles serão totalmente fabricados na fábrica e transportados para o local final? Os modelos serão compactos o suficiente para poderem ser operados a partir de plataformas móveis, como navios ou mesmo caminhões?

Q4.2 Quais são os principais desafios regulatórios para esse tipo de operação? Quais são os principais desafios regulatórios para esse tipo de operação?

Q4.3 No caso de microrreatores a bordo, quais seriam os mecanismos de segurança em caso de naufrágio da embarcação? Como seriam realizados os procedimentos de resgate do equipamento?

A Westinghouse esclareceu que o projeto do eVinci teve início com foco em aplicações militares, utilizando um reator compacto de 1MW que poderia ser operado a partir de uma plataforma móvel. A empresa, entretanto, identificou que uma versão civil de 5MW apresentaria maior viabilidade econômica. Embora ele possa ser transportado por veículo, sua operação requer que ele seja posicionado numa plataforma de concreto.

Quanto aos próximos passos, a empresa informou que existe a expectativa de desenvolver uma unidade de demonstração até 2026 com intuito de reunir dados e informações para finalizar o processo de licenciamento. Se tudo correr como planejado, a submissão dos últimos documentos regulatórios deve ocorrer em 2027 com expectativa de comercialização dos primeiros microrreatores entre 2028 e 2029.

A expectativa dos projetistas é que todo o processo seja marcado por aprendizado. A partir do lançamento do primeiro reator, o setor tenderá a aprender e a compreender melhor os

aspectos práticos da operação, resultando em melhorias e desenvolvimento significativos para toda a indústria nuclear.

Por fim, esclareceu-se que ainda há desafios regulatórios a respeito de transporte internacional de combustível. Tais questões precisam ainda ser analisadas e definidas pelas instituições responsáveis, a fim de reduzir as incertezas do setor, auxiliando assim a definição e planejamento da logística de entrega e manutenção dos microrreatores.

7.3 Comentários e conclusões

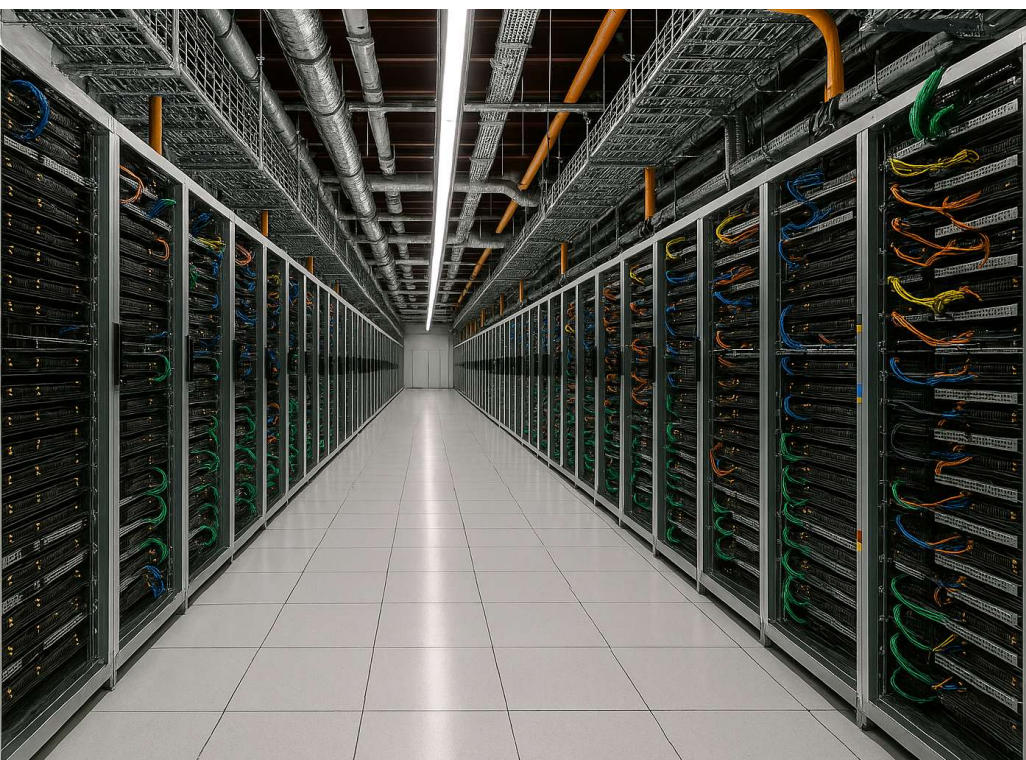
- Devido à sua flexibilidade, os SMRs são adequados para fins de pesquisa, atendimentos de emergência entre outros usos civis e militares. A longo prazo, também são esperadas aplicações espaciais.
- Os principais mercados são sistemas isolados, substituição de sistemas a diesel, indústrias *off-grid* e mineração, mas opções a bordo e offshore são mercados potenciais.
- Em princípio, a Westinghouse pretende ser apenas a vendedora do reator, com um segundo agente como operador. No entanto, a empresa não descarta a possibilidade de ser uma operadora.
- O microrreator será montado inteiramente na fábrica.
- O transporte ferroviário é considerado a melhor forma de transporte, e o principal desafio está relacionado ao peso dos equipamentos.
- As recargas de combustível deverão ser feitas na própria fábrica.
- Existem desafios regulatórios relacionados ao transporte internacional de combustível novo e irradiado.
- O objetivo é poder operá-lo remotamente, mas esta opção depende de outras tecnologias disponíveis e de regulamentação específica.
- O eVinci deverá contar com sistemas de resfriamento a ar e será abastecido com TRISO - 19,75% de enriquecimento.
- Atualmente, a experiência da CNNC com microrreatores é apenas para fins de pesquisa, mas eles têm o potencial de ser usados para outros fins e em sistemas isolados.

Afuá - PA

Localizada na Ilha de Marajó e com população municipal de 37.765 habitantes, é uma das mais de 200 localidades que ainda compõe os sistemas isolados (2024).

Pico de demanda elétrica em 2024, 2.3 MW





Além dos setores de difícil abatimento, outras atividades como a indústria da informação, que têm apresentado significativo aumento da demanda por energia elétrica, podem se beneficiar das características dos SMRs

A digitalização de vários setores da economia,

combinada com a expansão da computação em nuvem e o crescimento das aplicações de Inteligência Artificial, tem provocado um aumento do processamento e do tráfego de dados em todo o mundo.

Em 2022, os Datacenters consumiram cerca de 460 TWh de eletricidade de acordo com a IEA, espera-se que se chegue a mais de 1000 TWh em 2026.

Este crescimento vem pressionando o aumento da demanda por energia firme para o processamento de dados e resfriamento de Datacenters cada vez maiores. Devido à sua capacidade de geração contínua, estabilidade e confiabilidade no fornecimento de energia, os SMRs têm sido considerados, cada vez mais, como opções adequadas para fornecimento elétrico a estes equipamentos. Dentre as vantagens dos SMRs estão: a modularidade que permite o escalonamento progressivo da capacidade instalada acompanhando o crescimento da demanda computacional; a maior flexibilidade locacional que, a depender da regulação, pode permitir sua instalação próxima dos Datacenters; e ainda a operação semiautônoma de alguns SMRs o que pode conferir maior resiliência e segurança energética ao Datacenter, permitindo seu funcionamento com baixa dependência da rede elétrica principal.

Segundo a IAEA (2024), a busca das empresas de tecnologia pela descarbonização de suas operações, seja para cumprir metas de sustentabilidade ou por exigências legais, pode criar oportunidades para a utilização de SMRs em mercados em que essa tecnologia ainda não se estabeleceu. Microsoft e Amazon são exemplos de empresas de tecnologia que já têm investido em fontes nucleares tradicionais e em pesquisa e desenvolvimento de SMRS para atender seus Datacenters.

8 Tópico VI: Oportunidades e desafios para o ciclo de combustível dos SMRs

Potential implications for the nuclear fuel cycle

Algumas tecnologias SMR usam novos combustíveis nucleares que são significativamente diferentes do combustível usado atualmente nas usinas nucleares brasileiras (ou seja, combustível baseado em uma pastilha convencional de dióxido de urânio de baixo enriquecimento). Embora esses novos combustíveis possam ter características operacionais e de segurança muito favoráveis, pode ser necessárias infraestruturas adicionais tanto no início quanto no final do ciclo do combustível nuclear. No entanto, o grau de impacto na infraestrutura de cada tecnologia SMR ainda não é totalmente compreendido. Os tópicos de interesse relacionados a este tema incluem, entre outros: investimentos adicionais no processo de fabricação de novos combustível em comparação com combustíveis baseados em pastilhas convencionais de dióxido de urânio, alterações regulatórias e técnicas relacionadas à produção de combustível com diferentes níveis de enriquecimento; investimentos adicionais necessários para o gerenciamento de combustível usado em comparação com a tecnologia convencional de reator de água pressurizada; estimativas sobre o custo específico do novo combustível nuclear; preocupações sobre a capacidade de garantir o fornecimento de combustível nuclear.

Diante destes questionamentos o principal objetivo deste tópico foi obter mais informações sobre o ciclo de combustível dos novos reatores, suas implicações tecnológicas, cenários e oportunidades no mercado mundial. Entender as perspectivas globais de crescimento da demanda em um cenário de redução de emissões e como o Brasil pode se posicionar nesse mercado. Explorar também as preocupações relacionadas à produção e à garantia de suprimento de novos combustíveis, como HALEU, Triso e MOX, e possíveis alterações nos estágios finais do ciclo de vida, como transporte, armazenamento temporário e final de novos combustíveis.

As principais referências utilizadas neste tópico são:

1. AEA; **NEA Uranium 2022: Resources, Production and Demand 2022.**

2. *Good Energy Collective 2022: **Sustainable and Ethical Uranium Mining: Opportunities and Challenges.***
3. *Carlson et al. 2022: **Implications of HALEU on the design of SMRs and micro-reactors.** Nuclear Engineering and Design.*
4. *IAEA 2023: **Considerations for the Back End of the Fuel Cycle of Small Modular Reactors.***
5. *National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. **Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors.** 2023.*

8.1 Reunião Plenária

A reunião plenária ocorreu em 02 de fevereiro de 2024 e além dos tradicionais participantes do fórum teve a participação de um representante da *Nuclear Innovation Alliance* (NIA) e das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB) que fizeram apresentações relacionadas ao tema do tópico.

Apresentação da *Nuclear Innovation Alliance* (NIA)

Em sua apresentação Dr. Patrick White representando a NIA explicou que a instituição tem como objetivo identificar barreiras, realizar análises e se articular com *stakeholders* e tomadores de decisão a fim de reduzir a assimetria de informações e promover a participação da energia nuclear no enfrentamento da emergência climática.

Ao abordar o tema do encontro, destacou que o ciclo de combustível nuclear envolve múltiplas empresas e países, cada um com interesses específicos. Para o pesquisador a garantia da autonomia da produção requer que todas as etapas deste ciclo estejam disponíveis na configuração e no momento necessários. Não basta ter uma parte da cadeia bem estabelecida se outra enfrenta algum tipo de restrição.

O pesquisador acrescentou que o combustível nuclear pode ser caracterizado por três aspectos: o nível de enriquecimento, que corresponde à concentração de U235 ;o material que, juntamente com o urânio, constitui o elemento combustível e que pode ser constituído por diferentes materiais como óxidos, elementos metálicos, cerâmico ou sais fundidos e a terceira característica que é o revestimento ou formato do combustível, o que inclui opções como zircônio, materiais metálicos, compósitos ou TRISO.

Enquanto os reatores convencionais (LWRs) usam combustível com 4% de U-235, óxido e revestimento de zircônio, para explorar melhor as vantagens do combustível alguns SMRs podem requerer combustíveis avançados, com enriquecimento de até 19% (HALEU), material cerâmico e revestimento TRISO, o que permitiria novos designs, ganhos econômicos e melhor desempenho.

No entanto, a fabricação desses novos combustíveis exige adaptações no ciclo e significativos investimentos.

O atual ciclo do combustível é composto por 8 etapas: mineração; conversão; enriquecimento; transporte; reconversão; fabricação do combustível; transporte do combustível; entrega do combustível.

Quando se trata de combustíveis avançados, as etapas de mineração e conversão não necessitariam de mudanças tecnológicas, mas apenas um aumento da escala de mineração para suprir a demanda crescente.

Já nas etapas de enriquecimento e transporte, provavelmente demandarão modificações nos processos e novas infraestruturas com o comissionamento de instalações que possibilitem níveis de enriquecimento acima dos 5% além do aperfeiçoamento de sistemas de licenciamento.

As etapas de reconversão e fabricação do combustível também necessitarão de adaptações ou, até mesmo, novos processos a depender do tipo de combustível avançado que será produzido. Implicando, assim, na necessidade de nova infraestrutura e altos investimentos.

Por fim, as etapas de transporte e entrega também precisarão passar por modificações, principalmente, quanto ao transporte de pacotes de combustíveis. Tais aspectos serão específicos a depender de qual combustível será produzido.

O pesquisador acredita que a maior mudança para os próximos anos será o nível de enriquecimento de urânio. Assim, pontuou os diferentes níveis de enriquecimento: o urânio natural (0,3% de U^{235}); o LEU (até 5% de U^{235}), amplamente usados; o LEU+ (5% - 10% de U^{235}), utilizado em LWRs avançados; e o HALEU (5%-20% de U^{235}), considerado combustível avançado.

Dada esta perspectiva, o principal questionamento é de que forma a infraestrutura instalada, construída para enriquecimento de até 5%, pode ser adaptada para viabilizar um processo que alcance níveis de enriquecimento de até 20%.

O representante da NIA esclareceu que será necessária uma integração entre as instalações existentes e a nova infraestrutura. Acredita-se que para alcançar um enriquecimento LEU+, bastaria aumentar a escala de produção. Já para alcançar níveis de HALEU, novas instalações seriam necessárias, trazendo desafios ao setor, visto que ainda não há tecnologia disponível em escala comercial.

Estas instalações podem estar juntas ou separadas. Isto é, pode-se dispor de instalações que enriqueçam até nível LEU e LEU+, e outras instalações dedicadas ao HALEU. Uma segunda configuração seria manter as instalações de LEU, e investir em novas instalações para enriquecimento de LEU+ e HALEU. Por fim, ainda seria possível uma única instalação com capacidade de enriquecimento dos três níveis, LEU, LEU+ e HALEU. A decisão pela melhor configuração dependerá de cada cliente, seus objetivos e necessidades.

Sobre armazenamento e transporte, pontuou que há diferenças dependendo do nível de enriquecimento. Se for urânio natural (UF_6), utiliza-se o cilindro do tipo 48, número que indica seu diâmetro em polegadas. Se for LEU, utiliza-se cilindro do tipo 30. Já se for HALEU, utiliza-se cilindro do tipo 5.

No processo normalmente adotado, o urânio enriquecido é transportado das instalações responsáveis pelo enriquecimento para as instalações que fabricarão o combustível. Num cenário de utilização em grandes quantidades de HALEU, toda uma infraestrutura precisará ser implementada para o transporte de cilindros do tipo 5, com UF_6 altamente enriquecido.

Quanto a reconversão, o processo físico e químico de transformação para um formato sólido que viabiliza a fabricação do combustível nuclear, também dependerá da integração da infraestrutura existente e de novas instalações.

As modificações nessa etapa devem variar de acordo com o tipo de combustível escolhido. Isto é, se LEU for escolhido, o aumento da escala já seria suficiente. Se for LEU+ ou HALEU, o especialista compreende que, ao menos, uma análise de segurança será necessária.

Caso se opte por combustíveis metálicos, seja uma configuração cujo UO_2 seja um estágio intermediário ($UF_6 \rightarrow UO_2 \rightarrow$ metal), ou uma configuração direta ($UF_6 \rightarrow$ metal), novas

tecnologias e infraestrutura serão necessárias. O investimento intrínseco a essa opção poderá ser mínimo ou alto, a depender da tecnologia e processos específicos.

A etapa de fabricação do combustível será impactada de diferentes maneiras a depender dos tipos de reatores que entrarão em operação. Assim, o representante da NIA comentou sobre combustíveis específicos que atenderiam a cinco grupos de reatores diferentes. Esses combustíveis e os reatores típicos estão listados na [Tabela 1](#) ~~Tabela 1~~:

Tabela 1 - Características do combustível

	LWR	LWR Avançados	HTGR	SFR	MSR
Nível de enriquecimento	LEU	LEU+	HALEU	HALEU	LEU/ HALEU
Material	Óxido	Óxido	Cerâmico	Metálico	Sal fundido
Revestimento / forma	Zircônio	Composto	Triso	Metálico	

Portanto, para SMRs do tipo LWR, tem-se um combustível bem caracterizado, numa forma estável e de fácil fabricação. Este combustível, no entanto, é caracterizado por ter uma baixa transferência de calor e um desempenho ruim em casos de acidentes.

Para os casos de reatores LWR avançados, tem-se um combustível similar aos existentes, mas que traria melhorias na performance, promovendo maior segurança e trazendo benefícios econômicos. Porém, uma qualificação adicional é necessária para comprovar tais benefícios, além das limitações de uma nova infraestrutura de fabricação do combustível.

No caso de reatores *High-Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR), tem-se um combustível altamente estável, com retenção de radiação nuclear extremamente alta e resistência a proliferação, visto as camadas de carbono que formam uma barreira física e dificultam a reutilização do material radioativo. Contudo, há maiores desafios econômicos e técnicos na produção, além da necessidade de uma nova infraestrutura.

Já a experiência na operação e com engenharia são vantagens dos combustíveis metálicos. Esses apresentam um ciclo de combustível mais eficiente, visto a redução das diferenças de temperatura resultante do aumento da condutividade térmica. Todavia, além da necessidade de uma nova infraestrutura, a queima prolongada do combustível ainda carece de maior caracterização.

Por fim, os *Molten Salt Reactor* (MSR) são reatores de operação contínua que otimizam o uso do combustível, obtendo resíduos com níveis de radiação reduzidos. No entanto, além da necessidade uma nova infraestrutura, o comportamento e a queima do combustível ainda não estão totalmente caracterizados, as salvaguardas e os processos de segurança ainda não foram totalmente demonstrados.

Em relação à gestão dos resíduos e reprocessamento, foi apresentada a possibilidade de reciclagem e reutilização de combustível nuclear irradiado, detalhando o processo envolvido.

Através de separação física e mecânica, o combustível irradiado é dividido em material fissionável não utilizado e produtos de fissão (rejeitos). Estes últimos devem ser direcionados para depósitos de resíduos de longa duração.

O material fissionável extraído deve ser submetido a um processo de purificação química. Após a purificação, o material pode ser misturado ou não com combustível nuclear novo. A etapa final envolve processos químicos e de fabricação que resultam em novo elemento combustível, pronto para ser reutilizado.

Quanto à gestão do combustível irradiado, a depender do tipo de combustível, novos sistemas de armazenamento podem ser necessários. No entanto, independentemente do combustível, será essencial a disponibilidade de depósitos para todas as etapas do gerenciamento de rejeitos: curto, médio e longo prazo. Como alternativa para armazenamento de curto e médio prazo, foram sugeridos repositórios a seco. Já os repositórios de longa duração, embora apresente significativos avanços nos últimos anos ainda estão pouco caracterizados e exigirão uma abordagem mais detalhada.

Para concluir, o especialista apresentou um programa do DOE voltado para o desenvolvimento da cadeia de produção de HALEU. A ideia é promover uma demanda mínima para o mercado, firmando contratos com o governo. Tal iniciativa traria certa segurança às empresas privadas para realizarem investimentos na ampliação e adaptação de seus processos produtivos.

Para finalizar, frisou que os próprios investimentos no desenvolvimento dos SMRs estão sendo influenciados pela incerteza de possuir ou não combustível específico e suficiente para os novos reatores.

Apresentação das Indústrias Nucleares do Brasil - INB

O representante da INB apresentou cenários futuros para o setor, baseado em projeções de geração nuclear da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE/ e Agência de Internacional de Energia - IEA para os próximos anos. Todos os dados e expectativas apontam para um aumento recorde na geração nuclear global, com uma média de crescimento de 3% por ano até 2026, e mais de 20 países anunciando, na COP 28, seu compromisso para triplicar a capacidade nuclear até 2050.

O representante da INB correlacionou o aumento da geração nuclear com o aumento da necessidade de combustível nuclear global. Citou dados da União Europeia que estima a demanda de 700Kg – 1 tonelada de HALEU, por ano, para manter os reatores de pesquisa em operação. Comentou ainda que é esperado que 9 entre 10 reatores avançados, financiados pelo governo americano, necessitarão de HALEU na próxima década.

Para se adequar a essa novar realidade a INB constituiu um grupo de trabalho dedicado para os estudos de SMR.

Atualmente, a empresa pretende consolidar a tecnologia, melhorar a eficiência e aumentar a produção nas etapas de mineração, processamento, conversão e enriquecimento. Para as etapas de reconversão, fabricação de pastilhas e fabricação do combustível, compreendem que serão necessárias novas tecnologias e novos processos que dependerão do tipo de reator escolhido pelo governo brasileiro.

A INB apresentou as perspectivas da empresa para os SMRs. Quanto a demanda interna, estão se preparando para suprir a demanda do Laboratório de Geração Nucleoelétrica (LABGENE), do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e de reatores de pesquisa.

Numa ótica comercial, a empresa tem a perspectiva de produzir para aproveitar as futuras oportunidades no mercado internacional, a exemplo de reatores PWR, BWR (LEU) e HALEU.

A INB está focada na construção de uma nova planta de conversão e tem buscado parcerias para viabilizá-la. Além disso, pretendem aumentar as etapas do ciclo de enriquecimento para alcançar níveis de enriquecimento mais elevados.

A empresa também reconhece que um aumento da escala de produção, resultado do aumento da mineração e da complementação do ciclo do combustível, atrairia mais

investimentos para o país devido ao aumento da demanda e os serviços associados. Estes investimentos poderiam ser revertidos para a cadeia produtiva do combustível, resultando em aprimoramentos da tecnologia e na redução de custos de fabricação.

Quanto à mineração, INB reconhece os desafios para obter o licenciamento e para dar andamento ao planejamento da empresa. Apesar de não ter alcançado a produção anual em 2023, ainda esperam que a mina em Caetité/BA volte ao nível projetado nos próximos anos. Quanto à mina de Santa Quitéria/CE, a expectativa é que se obtenha o licenciamento e entre em operação nos próximos anos.

Os representantes ainda argumentaram sobre a necessidade de discutir custos, modelos de negócios e como seria importante definir uma meta a se alcançar, isto é, que fossem selecionados o design de SMR e seu respectivo tipo de combustível para direcionar os esforços da empresa.

8.2 Reunião técnica

A reunião técnica do tópico VI foi realizada no dia 01 de março de 2024.

8.2.1 Painel 1 – Perspectivas e oportunidades globais relacionadas ao ciclo de combustível

Q1 “Considerando o potencial de expansão do setor nuclear até 2050, quais são as perspectivas e as oportunidades de negócios globais relacionadas ao ciclo do combustível?”

Q1.1 “Quais são as oportunidades de fornecimento de combustível nuclear para SMRs no mercado internacional? As oportunidades estão concentradas no minério de urânio, na produção de pellets de combustível ou em outros combustíveis avançados?”

Q1.2 “Do ponto de vista industrial e econômico, como você vê a diversificação dos tipos de combustível (LEU, HALEU, TRISO, MOX etc.) para vários tipos diferentes de SMRs? Existe ou existirá algum tipo de padronização para esses diferentes tipos de combustível ou cada SMR terá seu próprio combustível desenvolvido para seu modelo específico?”

Q1.3 “Quais são as estruturas institucionais, legais e regulatórias existentes em todo o mundo associadas à exploração e exportação de urânio?”

Q1.4 “Qual é a experiência de modelos de negócios envolvendo o setor privado em países com monopólios estatais na indústria nuclear?”

Dr. Patrick White, da NIA, iniciou o debate destacando que as oportunidades para a expansão do setor nuclear estão diretamente relacionadas ao papel que a fonte irá desempenhar na transição energética como uma solução à emergência climática. Destaca que há grande expectativa quanto a expansão global do setor, ratificada por declarações na COP sobre triplicar a capacidade de geração nuclear de alguns países. Fato que necessariamente triplicaria a demanda por combustível nuclear, impactando toda a cadeia, desde a mineração até a gestão dos resíduos.

O especialista acrescenta que o alcance de tais metas dependerá de uma série de iniciativas internacionais para viabilizar a construção dos reatores e usinas. Necessitando solucionar desafios históricos do setor como atrasos na construção e escalonamento de custos. No entanto, ele acredita que com melhorias econômicas e aprimoramento de modelos de negócios, o setor nuclear poderá atingir ou até superar as projeções atuais. Compreendendo, então, que há uma certa incerteza da quantidade de energia que a fonte nuclear irá ofertar em 2050.

O papel desempenhado pela energia nuclear deve variar de país para país, visto que alguns tem uma visão mais estatista enquanto outros privilegiam uma atuação predominantemente privada. Diante disso, o desenvolvimento do setor pode ser direcionado pelo mercado ou por uma combinação de mercado e Estado.

Com o entendimento que o combustível nuclear é um mercado global, o especialista afirmou que há uma ampla variedade de oportunidades de negócios, onde cada empresa e país precisará se posicionar quanto ao seu papel: provedor de melhores serviços de enriquecimento, provedor de serviços de mineração e conversão, dentre outras. Há muitas possibilidades e locais para se encaixar, a depender do relacionamento entre os agentes do setor e suas habilidades de competição no mercado.

Durante o debate também se destacou que o crescimento do setor nuclear não se limita à construção de novas usinas, mas inclui também a extensão da vida útil das unidades existentes. Do ponto de vista dos negócios, um dos debatedores destacou cinco segmentos estratégicos na cadeia de valor:

- Mineração e produção de *yellowcake*

- Enriquecimento e conversão
- Fabricação de elementos combustíveis
- Transporte de urânio
- Armazenamento de combustível irradiado

Entre essas oportunidades, um executivo destacou o enriquecimento de urânio - particularmente de HALEU - como o segmento mais promissor. Atualmente, a Rússia detém o monopólio da produção comercial de HALEU, e ainda, numa escala limitada para suprir apenas a demanda de reatores de pesquisa.

Apesar do cenário favorável, foi ponderado que o mercado nuclear ainda enfrenta muitas incertezas decorrentes do histórico de desafios do setor. Essa volatilidade histórica demanda cautela na avaliação das perspectivas de crescimento, ainda que estejamos diante de evidentes oportunidades no horizonte energético global.

O representante da INB discutiu o potencial de inserção da empresa neste mercado global e destacou como prioridade estratégica a aceleração do licenciamento da mina de Santa Quitéria (CE), fundamental para garantir o suprimento de combustível nuclear no Brasil nos próximos anos. Além disso, apresentou os principais projetos em desenvolvimento pela empresa, entre elas a nova planta de conversão em Resende (RJ) que está em fase de concepção de projeto e o aumento da capacidade de enriquecimento de urânio, etapa importante no processo de aumento da produtividade. Outro ponto será completar o ciclo industrial de fabricação de combustível nuclear no país visando atingir a autossuficiência de combustível para atender à demanda doméstica e iniciar uma fase de exportação. Deste modo a empresa poderá se inserir no mercado internacional de combustível nuclear, fortalecendo sua posição na cadeia produtiva global.

A INB ainda reforçou a importância da decisão do design de SMR, assim como, definir a quantidade de combustível a se produzir no Brasil. Tais informações auxiliarão a empresa a compreender quais adaptações serão realmente necessárias em suas instalações, se apenas alguns ajustes, ou se há a necessidade de construção de uma planta totalmente nova.

Ainda foram discutidas as adaptações necessárias para a produção de HALEU, para o Dr. Patrick, não é necessário grandes mudanças tecnológicas, mas os reais desafios seriam adaptações das instalações e licenciamento, associadas a infraestrutura de transporte e armazenamento.

Os representantes da CNNC também acreditam no desenvolvimento do setor para os próximos anos, acompanhado do aumento da demanda por combustível na China e no mundo.

A CNNC tem concentrado esforços no desenvolvimento de SMRs que utilizem combustíveis convencionais, assim como, nível de enriquecimento tradicional. Com um ciclo completo e a capacidade de produzir o combustível no país, o representante afirmou a disposição do país em firmar parcerias e acordos comerciais com o Brasil no futuro.

8.2.2 Painel 2 – Parceiras e o mercado brasileiro no ciclo de combustível de SMRs

Q2 “Vários fabricantes de SMR não são fornecedores de combustível nuclear, o que pode gerar uma demanda por parcerias para fornecedores de combustível em escala global. Como os fabricantes de SMRs veem o Brasil nesse mercado?”

Q2.1 “O desenvolvimento nuclear do Brasil está fortemente relacionado a reatores nucleares de grande porte (Ex: Angra). Que inovações são necessárias na cadeia de valor nacional para que o Brasil possa se adaptar às novas tecnologias e, eventualmente, tornar-se um produtor global?”

Q2.2 “Em termos de cadeia de valor para usinas termonucleares e SMRs, quais segmentos da indústria brasileira poderiam competir em um mercado global?”

Q2.3 “Como podemos incentivar a capacitação e as habilidades para atrair profissionais para o setor nuclear? Como devem ser promovidos os programas de P&D relacionados a esse tema?”

De acordo com os consultores e representantes a maioria dos fabricantes de SMRs não produzem combustível nuclear, o que gera potencial demanda por parcerias com fornecedores de combustível em diferentes países. Alguns países têm como objetivo fortalecer uma cadeia de combustível verticalizada e concentrada no seu país enquanto outros estão abertos a formação de parcerias para expansão e desenvolvimento da cadeia global. Estas parcerias serão específicas, e devem se alinhar à dependência e à necessidade de cada empresa. Há aquelas que se beneficiariam de parcerias para fornecimento de elementos metálicos para seus combustíveis. Algumas empresas estão trabalhando com TRISO, e devido à inovação deste combustível, estão construindo e empenhando esforços em

projetos próprios. Outras estão firmando parcerias com laboratórios para auxiliar no desenvolvimento da tecnologia em si.

A INB é citada como possível parceira e algumas empresas já possuem memorandos de entendimento com a empresa para fornecimento de combustível visando não apenas o mercado brasileiro, mas também o abastecimento dos reatores fornecidos a outros países. A fabricante brasileira, no entanto, ainda enfrenta desafios para atender a esta demanda crescente, sendo necessária a expansão da mineração de urânio, expansão da etapa de enriquecimento e fechamento do ciclo. Quanto à produção de combustíveis avançados é necessária a adaptação ou construção da infraestrutura de produção, transporte e armazenamento de HALEU. A Nuclep foi citada como uma importante parceira para enfrentar os desafios no desenvolvimento e expansão do setor nuclear, assim como, empresas similares à Nuclep localizadas na América Latina.

Quanto ao monopólio da União na mineração de urânio e operação de usinas nucleares, as empresas reconhecem como um importante desafio a ser superado, principalmente, pelo aumento da dificuldade de se investir no setor, visto que há pouquíssimas oportunidades atualmente.

A INB também ratificou a importância de se firmar parcerias público privadas em todas as fases da cadeia de produção, como uma forma de acelerar os investimentos. Ressaltou ainda que tais parcerias são viáveis. Como exemplo de uma forma de flexibilização do monopólio, citou a boa experiência da INB com uma parceria privada na exploração da mina de Santa Quitéria. O representante da empresa inclusive citou estudos de viabilidade econômica que estão sendo realizados cujo tema são parcerias público privadas para a construção de uma planta de conversão, completando assim, o ciclo do combustível realizado em território nacional.

8.2.3 Painel 3 – Desafios do desenvolvimento da cadeia de combustíveis no Brasil

Q3 “Considerando essas oportunidades e os desafios existentes, como você vê ou o que espera sobre o desenvolvimento da cadeia de combustíveis no Brasil?”

Q3.1 “Quais são os fatores mais importantes para qualificar as empresas que fazem ou podem fazer parte da cadeia de combustíveis?”

Q3.2 “A aplicação de uma estratégia de joint venture para toda ou parte da cadeia (da mina ao fio) seria atraente para o mercado? Quais seriam os modelos de negócios mais atraentes para o mercado?”

Q3.3 “Quais são as condições que devem ser estabelecidas para que os fornecedores nacionais possam ser incluídos na cadeia produtiva?”

Q3.4 “Quais são os prazos previstos para a estruturação da cadeia de combustíveis no Brasil, tendo em vista o desenvolvimento dos SMRs?”

A cadeia de suprimentos nuclear brasileira enfrenta desafios significativos, mesmo em projetos consolidados como Angra 1 e Angra 2. Embora existam fornecedores potenciais no mercado nacional, muitos encontram dificuldades para atender aos critérios de qualidade exigidos pelo setor nuclear. De acordo com a INB, as principais dificuldades incluem regulamentações complexas, falta de capacitação técnica em setores especializados e ausência de padronização em componentes nucleares.

Quanto ao estabelecimento de parcerias a INB está adotando duas iniciativas estratégicas. A primeira é a implementação da Lei nº 14.514/2022, que permite que títulos minerários sejam oferecidos como garantia e autoriza a exploração de minerais nucleares por particulares em associação com a INB. A segunda iniciativa envolve a criação de um grupo de trabalho dedicado a estudar modelos de negócios específicos para diferentes realidades do setor, visando aumentar a eficiência e atratividade para investidores.

A INB afirmou que estão em contato com outras empresas internacionais e estão atentos para compreender como podem aprender e melhorar as operações de mineração no Brasil. Porém, reconheceu que é um assunto sensível e complexo, sendo necessárias maiores conversas internas sobre o assunto.

Neste contexto de parcerias internacionais, a CNNC informou que tem feito parcerias em diversas áreas, sempre buscando auxiliar o parceiro no desenvolvimento de sua própria tecnologia, numa abordagem colaborativa e de desenvolvimento mútuo.

Ao explorar o assunto numa perspectiva internacional, o representante da NIA abordou os desafios regulatórios relacionados à cadeia de combustível. Esses podem ser resumidos na análise de segurança e na análise de tecnologia. Comentou que não há muitos dados e informações qualificados quanto ao uso de combustível com níveis de enriquecimento

superiores a 5%, o que dificulta a análise tecnológica e a compreensão dos efeitos na segurança dos projetos.

Outro desafio é a questão do transporte de HALEU. Apesar de novos cilindros já terem sido desenvolvidos, a regulamentação dos critérios de qualidade e o estabelecimento de um padrão internacional ainda precisam ser definidos, ao ponto de se tornar um processo maduro, antes que seja possível afirmar que há uma indústria estabelecida.

O terceiro desafio está relacionado com segurança, salvaguardas e prestação de contas, em um contexto de ciclo de combustível que alcance níveis de enriquecimento superiores ao convencional.

O representante da Amazul aproveitou a oportunidade para informar que tem expertise no ciclo de combustível. Inclusive que tem acordos firmados com a marinha brasileira para finalizar a planta de conversão em Aramar, assim como, para operá-la no futuro. Além disso, esclareceu que podem e estão interessados em firmar parcerias com outras empresas envolvendo esse tema.



Mina de urânio de Caetité - BA

Com início de produção em 1999 a mina de urânio de Caetité tem capacidade de produção de até 400 toneladas de concentrado de urânio por ano.

Imagem: INB

8.2.4 Painel 4 – Desafios Socioambientais relacionados ao ciclo de combustível

Q4 “Como o setor nuclear tem lidado com os desafios socioambientais relacionados à mineração de urânio e ao armazenamento final do combustível usado dos SMRs?”

Q4.1 “Quais são os principais desafios internacionais relacionados às minas de urânio atuais e potenciais?”

Q4.2 “Considerando as diferentes rotas tecnológicas, os SMRs têm o potencial de reduzir o volume de combustível usado?”

Q4.3 “Existe algum tipo de combustível alternativo para os SMRs? Ex: Tório ou reutilização de combustível de reatores convencionais?”

Q4.4 “Como o gerenciamento do combustível irradiado dos SMRs difere daquele dos grandes reatores? Será necessário algum tipo de adaptação ou gerenciamento de novas tecnologias?”

A mineração de urânio é um ponto crítico no ciclo de combustível nuclear, gerando desafios entre os benefícios econômicos e os impactos socioambientais. Nos Estados Unidos existe uma tensão histórica entre os processos de mineração de urânio e as comunidades locais de modo que a expansão da mineração não é considerada foco de desenvolvimento do setor nuclear naquele país. A ênfase é dada no equilíbrio dos benefícios econômicos decorrentes do aumento da eficiência da cadeia de suprimentos nuclear, evitando que a mineração se torne um fim em si mesma.

No Canadá observa-se que o diálogo com as comunidades locais afetadas pela mineração de urânio tem contribuído para aumentar a aceitação social. O envolvimento das comunidades locais no processo de decisão e o aumento da transparência nas operações têm contribuído para mitigar os impactos negativos da mineração.

Já a INB afirmou que estão em contato com outras empresas internacionais e estão atentos para compreender como podem aprender e melhorar as operações de mineração no Brasil. Porém, reconheceu que é um assunto sensível e complexo, sendo necessárias maiores conversas internas sobre o assunto.

O representante da CNNC informou que, embora não diretamente relacionada à questão da mineração, os casos de operações de usinas nucleares desenvolvidas há décadas

apresentam menor resistência das comunidades locais. Entretanto nos últimos 10 anos, ainda que com acesso à informação e experiência das usinas em operação, observou-se o aumento da resistência à instalação de novas usinas nucleares por parte das comunidades locais. Isso tem resultado inclusive, em desistência da instalação de novos empreendimentos em certos locais em função da oposição social.

Quanto a gestão de resíduos e armazenamento nos EUA, o representante da NIA reconheceu os impasses políticos que o governo federal norte-americano vem enfrentando para tomada de decisões. Há diversos questionamentos quanto as tecnologias que serão realmente aceitas futuramente. Comentou sobre a importância do licenciamento social para instalação dos reservatórios em certas localidades. Concluiu ainda que há dúvidas se o processo político para viabilizar o armazenamento temporário poderá ser utilizado e adaptado para propiciar o desenvolvimento de soluções de armazenamento definitivo. Assim, estão atentos às lições aprendidas no processo que vem acontecendo na Finlândia.

O representante da Holtec comentou sobre sua tecnologia de armazenamento intermediário de combustível nuclear irradiado. Porém, apesar do licenciamento e da boa aceitação social, a tecnologia ainda apresenta barreiras e dificuldades legais relacionadas ao seu transporte, além de barreiras políticas em certas regiões. Tais dificuldades reforçam novamente a importância de resolver questões sociais e políticas ainda no início dos projetos.

Ao comentar sobre a questão do volume do combustível irradiado o especialista da NIA não acredita numa alteração significativa entre o volume do resíduo dos SMRs e dos reatores convencionais. O motivo é que apesar do menor volume de combustível usado, a maior temperatura de operação demanda maior espaçamento entre eles compensando o volume que seria economizado.

Ao se debater sobre o reprocessamento de combustível nuclear usado os presentes reconheceram a existência de empresas interessadas no desenvolvimento do processo, no entanto, acredita-se que não será aplicável para todos os tipos de reatores. A questão ainda está muito ligada à viabilidade econômica, uma vez que, atualmente, o processo requer muito mais investimento que a expansão da mineração e utilização de combustível nuclear novo.

8.3 Comentários e conclusões

- Apesar do menor volume total decorrente dos maiores níveis de enriquecimento, os combustíveis avançados deverão apresentar maior temperatura e, portanto, terão necessidade de mais espaço entre os elementos possivelmente anulando o ganho de espaço no teórico nos processos de armazenamento temporário e definitivo. O aumento projetado de usinas nucleares tradicionais e SMRs até 2050 deve ampliar a demanda por combustível, pressionando os processos de mineração e produção de combustíveis avançados em todo o mundo;
- O Canadá apresenta boas experiências do processo de aceitação social nos processos de mineração de urânio graças ao diálogo com as populações locais afetadas;
- As principais mudanças no ciclo de combustível causados pela produção de combustível avançado se darão a partir dos processos de enriquecimento, transporte e fabricação dos novos combustíveis a depender do tipo de combustível selecionado. As etapas de mineração e conversão devem ser impactadas apenas no aumento de volume decorrente da maior demanda;
- A depender do tipo de reator e combustível selecionado nos SMRs, poderão ser necessárias profundas adaptações nas linhas de produção ou até mesmo novas plantas para a adequação dos processos de fabricação dos novos combustíveis nucleares;
- Embora tecnicamente viável, ainda pairam dúvidas sobre a viabilidade econômica do reprocessamento dos combustíveis nucleares irradiados gerados nos SMRs, uma vez que a produção de combustível novo apresenta menores custos de fabricação;
- A utilização de combustíveis avançados, com maiores níveis de enriquecimento, novos materiais e técnicas avançadas de fabricação devem aumentar a eficiência, segurança e confiabilidade dos SMRs.

9 Considerações finais e próximos passos

A indústria nuclear tem identificado nos Small Modular Reactors (SMRs) uma solução para os desafios associados aos altos custos e longos prazos de construção dos reatores nucleares convencionais, abrindo enormes possibilidades de negócios.

No Brasil, o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 indica que novas usinas nucleares poderão ser implementadas a partir de 2030 com base em tecnologias de SMRs, desde que sejam alcançadas a maturidade tecnológica, operacional e a competitividade necessárias.

Neste contexto, a EPE buscou aprofundar o conhecimento sobre essa nova tecnologia e estabeleceu uma parceria com a ABDAN para a promoção de um ambiente no qual fosse possível debater, com diferentes empresas e agentes, os principais desafios e oportunidades para o desenvolvimento e implementação de SMRs no Brasil e no mundo.

O Fórum da ABDAN e EPE sobre SMR (F-SMR) reuniu diversos agentes do setor, institutos de pesquisa, órgãos reguladores nacionais e internacionais, consultores e representantes de empresas da área nuclear das Américas, Europa e Ásia. Entre abril de 2022 e março de 2024, foram realizadas 13 reuniões online, nas quais foram debatidos seis grandes temas relacionados a técnicas construtivas, desenvolvimento tecnológico, regulação, modelos de negócios e aplicações dos SMRs, incluindo geração de energia, produção de hidrogênio, dessalinização e fornecimento de calor para processos industriais. Esta abordagem permitiu uma análise da complexidade tecnológica e suas implicações práticas na realidade brasileira.

A conclusão do primeiro tema é a compreensão de que a modularidade não é um fim, mas sim um meio para alcançar a redução de prazos, custos e riscos de construção. E que o sucesso desta abordagem depende de fatores logísticos, de cadeias de suprimentos desenvolvidas e da adaptação às capacidades industriais locais, evitando visões simplistas que a associam automaticamente à economicidade.

No âmbito operacional, ficou claro que os SMRs são concebidos com alguma flexibilidade para acompanhamento de carga, característica importante em sistemas elétricos com crescente participação de fontes renováveis intermitentes. No entanto, fica claro a preferência dos desenvolvedores pela operação em carga máxima, que permanece a mais econômica. Isto sugere que modelos de negócios que integrem outras aplicações como a produção de hidrogênio ou uso da capacidade térmica para outros fins podem ser

determinantes para a otimização da rentabilidade. De modo semelhante, ao avaliar o potencial dos mini e micro-reatores observaram-se suas capacidades e limitações para a substituição da geração a diesel em áreas isoladas. Sua capacidade de operação semiautônoma, resiliência operacional e baixa exigência de reabastecimento os tornam particularmente adequados para ambientes restritivos e com complexa logística de combustíveis. Estas características também potencializam sua utilização em sistemas desconectados como minas, indústrias *off-grid* e *offshore*.

Quanto as discussões sobre localização, observou-se o potencial dos SMRs em reduzir as distancias entre usinas nucleares e os centros de consumo. Possibilidade que, no entanto, é condicionada à adoção de sistemas avançados de segurança e a uma evolução do enquadramento regulamentar, bem como no aprofundamento do trabalho de aceitação social que permita à população confiar na segurança destas novas instalações.

Ao explorar as aplicações não elétricas os SMRs demonstram potencial uso na produção de hidrogênio e de fornecimento de calor para processos industriais oportunizando a tecnologia como um possível vetor para descarbonização de setores de difícil abatimento como a indústria siderúrgica, cimento e química. Além destes setores, novas cargas especiais como por exemplo Datacenters podem se beneficiar da geração elétrica dos SMRs.

Finalmente o debate sobre o ciclo de combustível elucidou importantes pontos de aprimoramento para as políticas e planejamento de longo prazo. A eventual adoção de reatores que utilizem combustíveis avançados, como HALEU ou TRISO, demandarão consideráveis adaptações na infraestrutura nacional, desde o enriquecimento até a fabricação do combustível. Desta forma a escolha tecnológica deve ser tomada a partir de uma visão integrada da cadeia de fornecimento de combustível, sinalizando a necessidade de investimentos nessa cadeia.

Os resultados do F-SMR confirmam o potencial dos SMRs como uma alternativa promissora para diversificar as fontes de energia firme e de baixo carbono no Brasil, alinhando-se às diretrizes do PNE 2050. No entanto, também evidenciaram a existência de obstáculos significativos a serem superados, particularmente no que tange à maturidade tecnológica, competitividade econômica, adaptação do arcabouço regulatório, desenvolvimento da cadeia de suprimentos em território nacional e aceitação social.

O conhecimento gerado neste fórum constitui um passo importante e um ativo valioso para o aprimoramento contínuo dos estudos de planejamento energético. As informações coletadas

permitiram visualizar os próximos passos e oportunidades a serem explorados em novos estudos com análises mais robustas e precisas a fim de embasar o planejamento energético nacional. Entre os temas que merecem ser aprimorados:

- Aperfeiçoamento do arcabouço institucional, legal e regulatório da indústria nuclear;
- Regulamentação ou emenda do parágrafo 6º, Art 225 CF 1988 - em andamento no Congresso Nacional a partir do Projeto de Lei 4836/2024 (Portal da Câmara dos Deputados) - dispondo sobre critérios e requisitos para a seleção de sítios nucleares para a produção comercial de eletricidade;
- Flexibilização do exercício do monopólio da União para permitir atuação privada à luz do que já foi feito na indústria de mineração de urânio e outros elementos nucleares, bem como em radioisótopos;
- Mapeamento do potencial e detalhamento de estudos de viabilidade do uso de SMRs em setores de difícil descarbonização, incluindo siderurgia, cimento, química, bem como outras indústrias que demandem calor de alta temperatura em seus processos produtivos;
- Estudos de mapeamento de potencial e viabilidade de uso de SMRs para fornecimento energético a Datacenters;
- Estruturação de processos para o licenciamento tecnológico de reatores SMR no Brasil, observando as melhores práticas internacionais, a fim de remover barreiras à entrada dessa tecnologia quando estiver comercial;
- Estudos sobre os potenciais de uso de SMRs para prover flexibilidade e confiabilidade ao sistema elétrico em contexto de elevada participação de fontes renováveis variáveis;
- Estudos sobre cadeia de fornecedores de bens e serviços de SMRs buscando competitividade estrutural.

Diante do exposto e considerando perspectivas futuras cabe ao setor aproveitar este impulso para transformar essas discussões como base para a identificação de opções reais, competitivas e seguras a fim de que os SMRs estejam presentes na expansão de uma matriz energética nacional diversificada, resiliente e de baixo carbono.

10 Referências

BLACK, J. et al. *Prospects for Nuclear Microreactors: A Review of the Technology, Economics, and Regulatory Considerations*. 2022.

BOTELHO, Vinicius; BEZERRA, Luiz Roberto; CUNHA, Celso; GUIMARÃES, Leonam dos Santos. *SMR e a descarbonização da indústria siderúrgica*. Rio de Janeiro: FGV Energia, out. 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/dfa34d6d-b3e8-4d6c-b247-42b520a41b61/content>. Acesso em: 10 out. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. *Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021*. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 10 fev. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-propoe-resolucao-que-estabelece-orientacoes-sobre-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-no-setor-de-energia>. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRUYNOOGHE, C.; ERIKSSON, A.; FULLI, G. *Load-following operating mode at Nuclear Power Plants (NPPs) and incidence on Operation and Maintenance (O&M) costs*. Luxembourg: Joint Research Centre, European Commission, 2010.

CARLSON, L.; MILLER, J.; WU, Z. Implications of HALEU fuel on the design of SMRs and micro-reactors. *Nuclear Engineering and Design*, v. 389, 2022.

CHINA DAILY (GOVERNMENT). Montagem do módulo de núcleo do reator modular pequeno Linglong One, concluída em Hainan, China. *China Daily*, 15 ago. 2023. Disponível em: <https://govt.chinadaily.com.cn/s/202308/15/WS64dc8a2e498ea274927c8d1f/chinas-small-nuclear-reactor-completes-core-module-assembly.html>. Acesso em: 30 jul. 2025.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Normas para Escolha de Locais para Instalação de Reatores de Potência*. Resolução CNEN 09/69, 1969.

DATACENTERDYNAMICS. *Amazon investe em empresa nuclear SMR e assina vários acordos SMR para alimentar data centers*. 2024. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/br/not%C3%ADcias/amazon-investe-em-empresa-nuclear-smr-e-assina-varios-acordos-smr-para-alimentar-data-centers/>. Acesso em: 10 set. 2024.

DEPARTMENT OF ENERGY (EUA). Imagem de partículas de combustível nuclear TRISO particles. *TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth*. Office of Nuclear Energy—DOE, 9 jul. 2019. Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth>. Acesso em: 21 ago. 2025.

_____. Renderização do módulo de potência da NuScale Power. *Office of Nuclear Energy—DOE*, 30 maio 2025. Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/articles/nrc-approves-nuscale-powers-uprated-small-modular-reactor-design>. Acesso em: 30 jul. 2025.

DW – DEUTSCHE WELLE. Macron anuncia "renascimento da energia nuclear" na França. *DW Brasil*, 10 fev. 2022. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/macron-anuncia->

renascimento-da-energia-nuclear-na-fran%C3%A7a/a-60737729. Acesso em: 11 ago. 2025.

GILBERT, A. Q.; BAZILIAN, M. D. Can distributed nuclear power address energy resilience and energy poverty? *Joule*, v. 4, n. 9, p. 1839–1843, 2020.

GOOD ENERGY COLLECTIVE. *Sustainable and Ethical Uranium Mining: Opportunities and Challenges*. 2022.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments – A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) – 2020 Edition*. 2020.

_____. *Considerations for the Back End of the Fuel Cycle of Small Modular Reactors*. 2023.

_____. *Hydrogen Production with Operating Nuclear Power Plants – Business Case*. 2023.

_____. *Site Evaluation for Nuclear Installations*. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.

JIANU, O. A.; NATERER, G. F.; ROSEN, M. A. Hydrogen cogeneration with Generation IV nuclear power plants. In: *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. p. 637–659.

LLOYD, C. A. *Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems*. University of Cambridge, 2019.

METRÓPOLES. Pedras amarelas de urânio – foto utilizada em matéria sobre o processamento de urânio para reatores e armas. *Metrópoles*, 27 jun. 2025. Disponível em: <https://www.metropoles.com/ciencia/como-uranio-usado-reatores-bombas>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MIT ENERGY INITIATIVE. *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*. 2018.

MIT TECHNOLOGY REVIEW. Three Mile Island, of all places, might be the future of AI. 2024. Disponível em: <https://www.technologyreview.com/2024/09/26/1104516/three-mile-island-microsoft/>. Acesso em: 06 out. 2025.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE. *Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors*. 2023.

NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants*. 2011.

_____. *Uranium 2022: Resources, Production and Demand*. 2022.

NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. Report. *Cost Competitiveness of Micro-Reactors for Remote Markets*. 2019.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. *Advanced Reactor Siting Policy Considerations*. 2019.

ROSATOM. Imagem do reator modular compacto SMR Akademik Lomonosov. 2025. Disponível em: <https://rosatom.ru/en/rosatom-group/smr-akademik-lomonosov/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

WRIGLEY, P. A.; WOOD, P.; O'NEILL, S.; HALL, R.; ROBERTSON, D. Off-site modular construction and design in nuclear power: A systematic literature review. *Progress in Nuclear Energy*, v. 134, 2021.
