



ANÁLISE DO USO DE SMRs NOS SISTEMAS ISOLADOS BRASILEIROS: UMA ANÁLISE ABRANGENTE

Valéria E. Alcântara e Alves¹, Daniel J. Leibing Sarney², Amir Z. Mesquita¹, Vitor F. de Almeida¹.

¹CDTN Cnen. Campus da UFMG - Pampulha, Belo Horizonte, MG.

²ENBPar. Edifício Parque Cidade Corporate, Setor Comercial SUL, Quadra 09, Asa Sul, Brasília, DF.
profveaa@gmail.com

Palavras-Chave: Pequenos Reatores Nucleares (SMRs); Sistemas Isolados (SI); Energia Sustentável; Segurança Energética; Transição Energética.

RESUMO

Este trabalho analisa o uso de Pequenos Reatores Nucleares (Small Modular Reactors - SMRs) nos Sistemas Isolados (SI) do Brasil, explorando como essa tecnologia pode contribuir para diversificar e estabilizar a matriz energética em locais remotos ou com dificuldades de acesso à rede elétrica convencional. O objetivo principal é discutir se os Sistemas Isolados do Brasil deveriam adotar os SMRs. Para isso, propomos os seguintes objetivos secundários: apresentar as vantagens e desvantagens dos SMRs, comparar com as fontes atualmente utilizadas nos SI e contextualizar a segurança energética nesses sistemas. A metodologia inclui uma revisão detalhada da literatura sobre os desenvolvimentos atuais de SMRs, estudos de caso de implementações em sistemas isolados e análises comparativas com outras fontes de energia renováveis e não renováveis. Realizamos também uma comparação quantitativa e qualitativa entre os SMRs e outras tecnologias de geração de energia, focando em parâmetros como eficiência energética, custos de instalação e operação, impacto ambiental e segurança operacional. Os resultados indicam que os SMRs possuem características vantajosas para sistemas isolados. Destacam-se a capacidade de produzir energia de forma constante, independentemente das condições climáticas; a flexibilidade de instalação devido ao seu tamanho reduzido e modularidade; e o baixo impacto ambiental, especialmente em relação à emissão de gases de efeito estufa (GEE). Além disso, os SMRs apresentam um perfil de segurança superior, graças a inovações no design e sistemas de segurança passivos que reduzem o risco de acidentes. Conclui-se que os SMRs representam uma tecnologia promissora para inclusão em planos de desenvolvimento energético de regiões isoladas. Eles têm o potencial de fornecer energia de maneira mais estável e confiável, alinhando-se a objetivos de sustentabilidade e minimização de impactos ambientais. A implementação bem-sucedida de SMRs nos Sistemas Isolados do Brasil poderia servir como modelo para outras regiões com desafios energéticos semelhantes, promovendo uma transição energética global mais inclusiva, sustentável e resiliente.

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções energéticas sustentáveis tornou-se uma prioridade global, impulsionada pela crescente conscientização sobre os impactos ambientais das fontes de energia tradicionais e pela necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Essa demanda é particularmente evidente em regiões remotas com dificuldades de acesso à rede elétrica convencional, como a vasta e biodiversa região amazônica. Nesse contexto, os Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) emergem como uma alternativa promissora para diversificar e estabilizar a matriz energética, oferecendo uma fonte de energia confiável e sustentável.

A região amazônica, famosa por sua biodiversidade e por seu papel crucial na regulação do clima global, enfrenta desafios únicos em relação ao acesso à energia. Muitas comunidades remotas ainda dependem de soluções limitadas e frequentemente insustentáveis, como geradores



a diesel. Além disso, a expansão da infraestrutura energética na Amazônia muitas vezes entra em conflito com a conservação ambiental e os direitos das populações locais, criando um dilema entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

Os SMRs surgem como uma alternativa transformadora. Esses reatores, com seu tamanho reduzido e modularidade, apresentam vantagens significativas em relação às tecnologias de geração de energia convencionais. Sua capacidade de produzir energia de forma constante e independente das condições climáticas, aliada à flexibilidade de instalação, torna-os especialmente adequados para atender às necessidades energéticas de comunidades remotas.

Ao final deste estudo, esperamos fornecer insights valiosos para formuladores de políticas, pesquisadores e interessados no desenvolvimento sustentável e na segurança energética das regiões isoladas do Brasil. Acreditamos que os SMRs podem desempenhar um papel fundamental na promoção de uma transição energética mais inclusiva, sustentável e resiliente, beneficiando não apenas as comunidades locais, mas também o meio ambiente e a sociedade como um todo.

1.1. Objetivo

Este artigo explora o potencial dos Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) para transformar os Sistemas Isolados (SI) do Brasil em termos de sustentabilidade e segurança energética. Diante da crescente demanda global por soluções energéticas sustentáveis, especialmente em regiões remotas como a Amazônia, onde o acesso à rede elétrica convencional é limitado, os SMRs surgem como uma alternativa promissora.

A região amazônica, conhecida por sua biodiversidade única e seu papel na regulação do clima global, enfrenta desafios significativos relacionados à infraestrutura energética. Muitas comunidades ainda dependem de soluções não sustentáveis, como geradores a diesel, o que contrasta com a necessidade de conservar o meio ambiente e promover um desenvolvimento econômico equilibrado.

O objetivo deste estudo é analisar como os SMRs podem diversificar e estabilizar a matriz energética dos SI, oferecendo uma fonte de energia limpa, confiável e independente das condições climáticas. Serão discutidas as vantagens dessas tecnologias em comparação com fontes convencionais, como termelétricas a combustíveis fósseis, além das implicações regulatórias, desafios técnicos e oportunidades associadas à sua implementação.

Ao final do estudo, espera-se contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes e sustentáveis, além de fornecer insights relevantes para formuladores de políticas, pesquisadores e interessados no avanço da segurança energética e na promoção de uma transição energética mais inclusiva e resiliente nas regiões isoladas do Brasil.

2. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem exploratória e utiliza principalmente métodos bibliográficos e documentais para investigar o potencial dos Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) na transformação dos Sistemas Isolados (SI) do Brasil em termos de sustentabilidade e segurança energética.



Para a pesquisa bibliográfica e documental, foi desenvolvida uma estratégia de busca em bases de referência nacionais e internacionais. As fontes consultadas incluem organizações renomadas no campo da energia, como:

- IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica): referência global em energia nuclear, oferecendo diretrizes e normas para a segurança e operação de reatores nucleares.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética): responsável pela coordenação dos estudos e planejamento energético no Brasil, incluindo análises sobre a integração de novas tecnologias na matriz energética nacional.
- Google Scholar: plataforma que oferece acesso a uma vasta gama de artigos acadêmicos e científicos sobre energia nuclear, energias renováveis e políticas energéticas.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica): reguladora do setor elétrico no Brasil, fornecendo informações sobre a regulação e os desafios operacionais de sistemas isolados.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico): responsável pela coordenação e operação do sistema elétrico interligado nacionalmente, oferecendo insights sobre a integração de fontes de geração descentralizadas.

A pesquisa prioriza a seleção de artigos de periódicos revisados por pares, livros, relatórios técnicos, documentos normativos e teses acadêmicas. Os critérios de seleção para os estudos revisados incluem:

1. Relevância: os estudos devem abordar diretamente o tema dos SMRs e sua aplicabilidade em Sistemas Isolados ou em contextos semelhantes.
2. Qualidade Científica: somente foram considerados artigos publicados em periódicos com revisão por pares, garantindo a robustez metodológica e a credibilidade das informações.
3. Atualidade: preferencialmente, os estudos deveriam ser recentes (publicados nos últimos dez anos) para refletir as inovações e tendências atuais na tecnologia de SMRs e em políticas energéticas.
4. Diversidade Metodológica: a inclusão de estudos que utilizam diferentes abordagens metodológicas (quantitativas, qualitativas e mistas) para proporcionar uma visão abrangente do tema.

A análise comparativa foi realizada com base em uma série de parâmetros, que incluem:

- Eficiência Energética: avaliação da produção de energia dos SMRs em comparação com termelétricas a combustíveis fósseis, considerando a relação custo-benefício.
- Impacto Ambiental: comparação das emissões de gases de efeito estufa, conforme ilustrado na Fig. 1 [1], e outros impactos ambientais associados a cada tecnologia.
- Segurança Operacional: exame das inovações em segurança que os SMRs oferecem em relação aos reatores tradicionais e a tecnologias fósseis.
- Custos de Implantação e Operação: análise dos custos iniciais e de operação ao longo do tempo, considerando também possíveis subsídios e incentivos.



Greenhouse gas emissions, 2022



Greenhouse gas emissions¹ include carbon dioxide, methane and nitrous oxide from all sources, including land-use change. They are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.

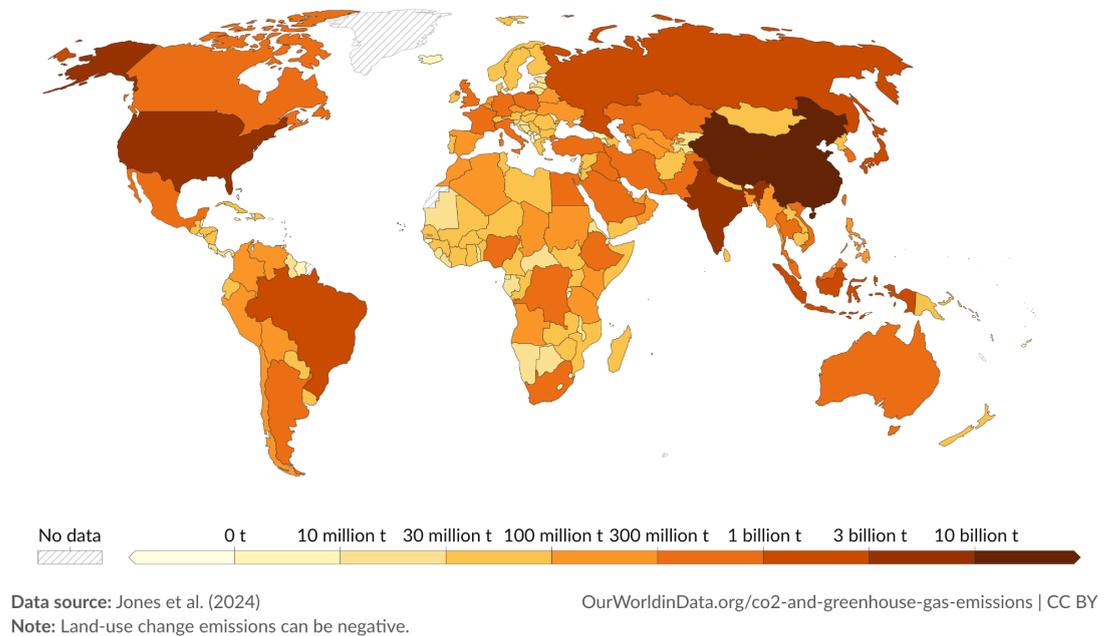


Fig. 1. Emissão de gases de efeito estufa, 2022

Os dados obtidos foram analisados criticamente para identificar tendências, desafios técnicos e regulatórios associados à implementação de SMRs em sistemas isolados. A análise também incluiu a avaliação das implicações econômicas e ambientais das tecnologias estudadas, visando fornecer uma visão abrangente sobre seu potencial de integração na matriz energética brasileira.

É importante reconhecer as limitações inerentes à pesquisa documental, como a dependência de fontes secundárias e a possibilidade de viés na seleção de dados. Contudo, as informações obtidas são fundamentais para fundamentar discussões sobre políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável nos sistemas isolados do Brasil.

A metodologia adotada neste estudo visa oferecer uma base sólida para explorar o papel dos SMRs na promoção de uma transição energética mais inclusiva, sustentável e resiliente nos sistemas isolados do Brasil. Ao integrar conhecimentos de diversas fontes e aplicar uma análise crítica dos dados disponíveis, esperamos contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e a formulação de políticas energéticas eficazes no país.

3. RESULTADOS

3.1. Transição Energética nos Sistemas Isolados: Diversificação e Desafios

Os Sistemas Isolados (SI) representam uma parte significativa da infraestrutura elétrica brasileira, abrangendo 212 localidades [2], principalmente na região Norte. Esses sistemas contribuem com 0,6% da carga nacional de energia elétrica e atendem, como exemplo, uma população equivalente à do estado de Alagoas [3].



Atualmente, a principal fonte de geração nos SI são termelétricas que utilizam combustíveis fósseis. Essas usinas enfrentam desafios ambientais significativos e exigem substanciais subsídios, conhecidos como Conta de Consumo de Combustível (CCC), cuja projeção orçamentária para 2023 alcançou R\$12 bilhões [4], um encargo repassado aos consumidores.

A avaliação e o planejamento do atendimento aos SI são de responsabilidade da EPE, que analisa tecnicamente as propostas das distribuidoras. No entanto, a transição energética nesses sistemas vai além da simples interligação ao Sistema Interligado Nacional (SIN). É imperativo diversificar as fontes de geração de energia, buscando alternativas mais sustentáveis e resilientes.

Este estudo propõe que a transição energética nos SI inclua não apenas a interligação ao SIN, mas também a implementação de soluções diversificadas de geração, como energias renováveis e microrreatores nucleares. Essas alternativas podem oferecer uma matriz energética mais limpa e estável para essas regiões remotas. Além de reduzir os impactos ambientais das termelétricas, essas soluções podem diminuir a dependência dos subsídios da CCC, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental dos SI a longo prazo.

Em suma, a estratégia de transição energética nos Sistemas Isolados do Brasil requer não apenas a interconexão com o SIN, mas também a diversificação das fontes de geração. Isso promoverá um sistema elétrico mais resiliente, sustentável e alinhado com os desafios globais de mitigação das mudanças climáticas.

3.1. Integração de Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) em Sistemas Remotos e Isolados: Um paradigma Emergente

Os Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) representam uma inovação significativa na geração de energia nuclear, com capacidade de até 300 MW(e), o que equivale a um terço da potência dos reatores tradicionais [5]. Sua característica modular e compacta permite que sejam fabricados em módulos e transportados para o local de instalação, proporcionando economia em custos e tempo de construção em comparação com reatores convencionais [5].

A implantação de SMRs apresenta uma solução promissora para aumentar o acesso à energia em regiões remotas, onde a infraestrutura de rede elétrica é limitada e os custos de conexão são elevados. Esses sistemas podem ser integrados a redes existentes ou operar de forma autônoma, fornecendo uma fonte confiável de energia de baixo carbono para indústrias e comunidades locais.

Particularmente, os microrreatores, uma categoria de SMRs projetados para gerar até 10 MW(e), são especialmente adequados para áreas que enfrentam desafios de acesso à energia limpa e econômica [5]. Eles ocupam menos espaço físico e podem servir como fonte de energia de reserva em situações de emergência, substituindo geradores a diesel frequentemente utilizados em comunidades rurais e instalações remotas, como observado nos sistemas isolados do Brasil.

A combinação de SMRs com fontes renováveis intermitentes, como energia eólica e solar, é explorada como uma estratégia para aumentar a confiabilidade e a segurança energética. Estudos recentes, como os realizados por Wang et al. [5], destacam a importância dos SMRs como uma fonte de energia de base não poluente, complementando a variabilidade das fontes renováveis.



As energias renováveis e a energia nuclear desempenham papéis essenciais na transição para uma matriz energética mais sustentável, com a previsão de que a participação dos combustíveis fósseis no Net Zero Emissões (NZE) diminua de 80% em 2020 para pouco mais de 20% em 2050, conforme Fig. 2 [6]. Nesse contexto, os SMRs emergem como uma solução promissora, contribuindo significativamente para a descarbonização e a diversificação da matriz energética, ao mesmo tempo em que oferecem uma fonte confiável de energia para complementar as energias renováveis intermitentes.

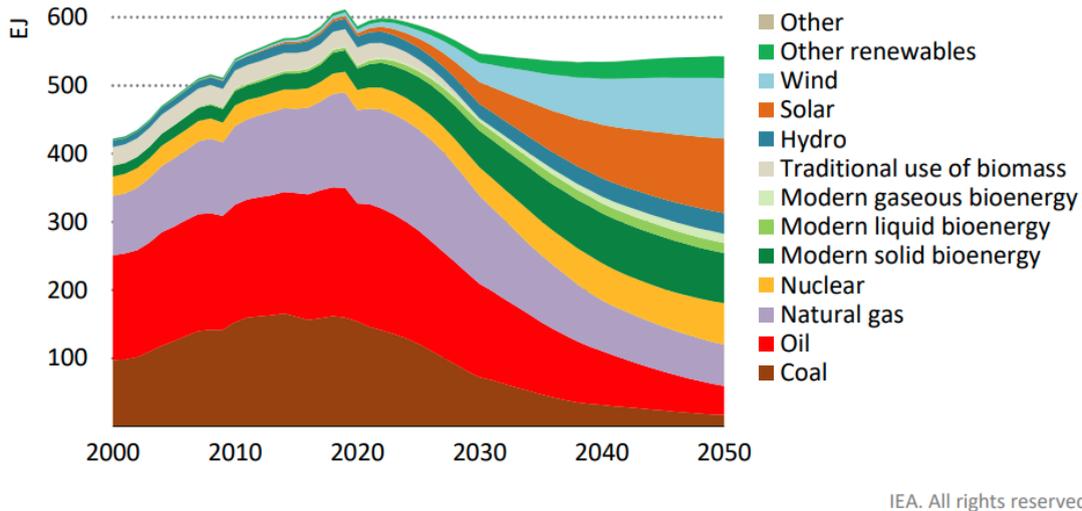


Fig. 2. Fornecimento total de energia no NZE.

Do ponto de vista regulatório, a adoção de SMRs implica desafios específicos, como a adaptação dos requisitos de segurança, planejamento de emergência e operação, conforme exigido por agências reguladoras como a IAEA, a NRC dos Estados Unidos e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Esses desafios requerem uma abordagem cuidadosa para garantir a segurança, a confiabilidade e a aceitação pública dessas novas tecnologias.

Em resumo, os SMRs oferecem uma perspectiva inovadora para a geração de energia nuclear em regiões geograficamente desafiadoras, contribuindo para a segurança energética e a redução das emissões de carbono. No entanto, é necessário enfrentar desafios regulatórios e operacionais específicos que devem ser cuidadosamente abordados.

4. CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada neste estudo explorou o potencial dos Pequenos Reatores Nucleares (SMRs) como uma solução inovadora para os desafios energéticos enfrentados pelos Sistemas Isolados (SI) do Brasil, especialmente em regiões remotas como a Amazônia. Diante da urgente necessidade global por soluções energéticas sustentáveis e da crescente conscientização sobre os impactos ambientais das fontes de energia convencionais, os SMRs emergem como uma alternativa promissora.

A região amazônica, com sua vasta biodiversidade e importância fundamental na regulação do clima global, enfrenta dificuldades significativas no acesso à eletricidade, dependendo muitas vezes de soluções não sustentáveis, como geradores a diesel. Essa realidade destaca a importância de buscar fontes de energia limpa e confiável que não comprometam a conservação ambiental nem os direitos das populações locais.



Os SMRs se destacam por oferecer uma fonte de energia constante e independente das condições climáticas, tornando-os adequados para suprir as necessidades energéticas de comunidades remotas. Sua modularidade e capacidade de serem instalados em locais de difícil acesso proporcionam uma solução viável para melhorar a segurança energética nessas regiões.

A análise dos resultados indica que a diversificação da matriz energética dos SI, com a introdução de SMRs, pode reduzir a dependência de termelétricas a combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados a essas fontes. A combinação dos SMRs com energias renováveis, como solar e eólica, oferece uma estratégia integrada para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico e reduzir as emissões de carbono, alinhando-se aos objetivos de mitigação das mudanças climáticas.

Entretanto, a adoção de SMRs não está isenta de desafios. Questões regulatórias, segurança operacional, custos de implantação e aceitação pública são aspectos críticos que precisam ser gerenciados para garantir o sucesso e a sustentabilidade dessas tecnologias. É essencial desenvolver políticas públicas eficazes que apoiem a implementação segura e eficiente dos SMRs, levando em consideração as especificidades locais e regionais.

À medida que avançamos em direção a uma transição energética mais inclusiva, sustentável e resiliente nos sistemas isolados do Brasil, os SMRs representam não apenas uma fonte promissora de energia limpa, mas também um catalisador para o desenvolvimento econômico local e a melhoria da qualidade de vida das comunidades. A colaboração entre governos, instituições de pesquisa e o setor privado será fundamental para explorar plenamente o potencial dos SMRs e enfrentar os desafios globais de energia do século XXI.

Portanto, este estudo contribui com novos insights para o campo da energia nuclear aplicada a sistemas isolados e destaca a importância de abordagens integradas e sustentáveis para alcançar um futuro energético mais seguro e responsável para todos.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> acessado em 09/10/2024.

[1] <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados> acessado em 19/07/2024.

[2] <https://epbr.com.br/sistemas-isolados-no-brasil-como-06-e-igual-a-r-12-bilhoes/> acessado em 19/07/2024.

[3] Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022. Nota Técnica nº 215/2022-SGT-SRG-SFF-SRD/ANEEL. Consulta Pública nº 063/2022. Disponível em

https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacao_publicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=48030&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFase



Semana Nacional de Engenharia Nuclear e da Energia e Ciências das Radiações – VII SENCIR
Belo Horizonte, 12 a 14 de novembro de 2024

[Reuniao=fase&_participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fviualizar.jsp](#) acessado em 19/07/2024.

[4] <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> acessado em 15/07/2024.

[5] J. Wang et al., Dynamic simulation of SMR steam turbine speed response in an isolated network mode of distributed energy resources microgrids, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 195, USA (2024).

[6] IAE, Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector, 4th revision, p. 57, França (2021).