



O PAPEL DOS REATORES MODULARES DE PEQUENO PORTE E DOS MICRORREATORES NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Clarysson A. M. da Silva^{1,2}, Antonella L. Costa^{1,2}, Maria A. F. Veloso^{1,2}, Claúbia Pereira^{1,2}, Patrícia A. L. Reis^{1,2}

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia - Brasil

²Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do CNPq – Reatores Nucleares Modulares e Inovadores, Brasil

clarysson@nuclear.ufmg.br; antonella@nuclear.ufmg.br; mdora@nuclear.ufmg.br; claubia@nuclear.ufmg.br; patricialire@yahoo.com.br

RESUMO

A transição energética global exige a redução das emissões de gases de efeito estufa, mantendo segurança de suprimento, acessibilidade e sustentabilidade. Assim, cresce o interesse por soluções confiáveis e de baixo carbono que complementem fontes renováveis variáveis, como solar e eólica. Entre elas, destacam-se os Reatores Modulares de Pequeno Porte (*Small Modular Reactors* – SMRs) e Microrreatores (MRs), projetados para operar com flexibilidade, escalabilidade e eficiência, além de oferecerem custos iniciais menores, maior segurança intrínseca, produção em série e redução de resíduos nucleares. Este artigo aborda suas características técnicas, vantagens sobre usinas nucleares convencionais e desafios regulatórios, financeiros e sociais, ressaltando seu papel estratégico na diversificação da matriz elétrica e na construção de um sistema energético mais seguro do ponto de vista energético e descarbonizado.

Palavras-chave: SMRs, energia nuclear, transição energética, descarbonização, inovação tecnológica.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética é um dos principais desafios do presente século. Dentre as fontes livres de emissão de gases de efeito estufa, a energia nuclear pode ter um papel importante nas próximas décadas, não só na geração de eletricidade, mas também em processos como a dessalinização de água e a produção de hidrogênio para substituição do petróleo no setor de transporte (RAMANA, 2021; CACIUFFO et al., 2020; AL-OTHMAN et al., 2019; NEA, 2014). Entretanto, os reatores nucleares convencionais apresentam questões como custos econômicos excessivos, atrasos em cronogramas e dificuldades de aceitação pública. Nesse contexto, os Reatores Modulares de Pequeno Porte (*Small Modular Reactors* – SMRs) e os Microrreatores (MRs) apresentam-se como inovação tecnológica que busca superar essas limitações. Nos últimos anos, os SMRs têm despertado grande interesse da comunidade científica e da indústria nuclear, devido principalmente à sua característica modular. Projetados para potências inferiores a 300 MWe por unidade, podem ser fabricados em módulos padronizados, transportados e instalados de forma escalável, reduzindo riscos de construção e custos iniciais. Além disso, incorporam sistemas de segurança avançados, muitos deles passivos, que aumentam a resiliência operacional. Os MRs, ainda menores que os SMRs, compartilham princípios similares de modularidade e segurança, sendo ideais para aplicações descentralizadas, como regiões remotas, plataformas industriais e geração em locais isolados. Ambos representam uma abordagem flexível e segura para apoiar a descarbonização da matriz energética, especialmente quando integrados a fontes renováveis intermitentes. O presente estudo tem como objetivo analisar o papel dos SMRs e MRs na transição energética global, discutindo aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e políticos, bem como os principais desafios à sua implementação em larga escala.



2 METODOLOGIA

O presente trabalho é fundamentado em uma revisão bibliográfica e documental tomando como referência publicações científicas indexadas em bases como *Scopus* e *ScienceDirect*, bem como relatórios técnicos e documentos oficiais de organizações internacionais relevantes, incluindo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a Agência de Energia Nuclear da OCDE (OECD-NEA) e a *World Nuclear Association* (WNA). O processo de análise foi organizado em quatro etapas principais compreendendo: (1) classificação e levantamento técnico dos SMRs e MRs; (2) análise econômica e operacional; (3) avaliação ambiental e social; e (4) estudo comparativo internacional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os reatores nucleares podem ser classificados segundo a sua potência onde MRs possuem potência elétrica menor que 10 MWe; SMRs valores compreendidos entre 50 e 300 MWe; e reatores de grande porte potências superiores a 300 MWe, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação e aplicação dos reatores nucleares segundo a sua potência.

Tipo de Reator	Potência Elétrica	Aplicação
Microrreatores	≤ 10 MWe	Comunidades remotas, pequenos centros urbanos, postos militares, pequenas indústrias, mineração
SMRs	50 – 300 MWe	Geração modular em cidades médias, expansão modular em regiões maiores, pequenas indústrias.
Reatores de grande porte	300 – 1600+ MWe	Geração de eletricidade em larga escala

Atualmente, existem mais de 70 projetos de SMRs e MRs, com diferentes concepções quanto ao tipo de refrigerante, combustível e espectro de energia dos nêutrons, características que possuem objetivo de atender diferentes expectativas (IAEA, 2021; RAMANA, 2021; EL-EMAM et al, 2021). A Tabela 2 apresenta um sumário dos principais conceitos de SMRs e MRs com base no tipo de refrigerante utilizado.

Tabela 2 – Tipo de refrigerantes comumente avaliados para SMRs e MRs

Tipo de Refrigerante	Exemplos	Vantagens	Desvantagens
Água leve	SMR de água pressurizada (PWR)	Tecnologia madura, alta disponibilidade de combustível, operação estável	Limitação de temperatura e eficiência térmica moderada
Sódio líquido	Reatores rápidos refrigerados a sódio (SFR)	Alta eficiência térmica, permite reciclagem de combustível, operação em alta temperatura	Reatividade química com água e ar, manejo complexo
Hélio	Reatores refrigerados a gás (HTGR)	Alta temperatura de operação, baixo risco de corrosão, não reativo quimicamente	Tecnologia menos difundida, custos iniciais mais altos
Chumbo ou chumbo-bismuto	Reatores rápidos refrigerados a chumbo (LFR)	Alta densidade energética, nêutrons rápidos, seguro em acidentes de perda de refrigeração	Alta corrosão, tecnologia em desenvolvimento
Flúor ou sais fundidos	Reatores de sais fundidos (MSR)	Alta eficiência térmica, operação contínua, baixa pressão de operação	Tecnologia complexa, desenvolvimento ainda experimental



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

O tipo de refrigerante utilizado impacta na operação desses reatores e nas possibilidades de sua implantação, e nesse sentido, vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliar tais características, buscando identificar vantagens, limitações e potenciais aplicações de cada tecnologia. Independentemente dos diferentes projetos, os SMRs e MRs seriam construídos para otimizar segurança operacional, eficiência energética e flexibilidade na geração de energia, permitindo sua implantação em diferentes cenários, desde pequenas redes elétricas até especializadas aplicações industriais. Esses reatores apresentam características técnicas que os diferenciam daqueles tradicionais como: (a) a modularidade, que permite a completa fabricação em instalações industriais e transporte para instalação no local de operação, reduzindo atrasos e riscos associados à construção; (b) menor potência por módulo, mas com possibilidade de expansão gradual; e (c) a flexibilidade operacional, permitindo não apenas a geração de energia elétrica, mas também o fornecimento de calor industrial, a produção de hidrogênio de baixo carbono e a dessalinização. Essas características tornam os SMRs e MRs atrativos para aplicações em sistemas isolados, integração com renováveis intermitentes e descarbonização de setores industriais.

A análise econômica dos SMRs e MRs ainda é uma questão contraditória. Apesar de exigir menor investimento para serem implantados comparados as usinas de grande porte, o custo da energia produzida (LCOE) pode acabar sendo mais alto que o das fontes renováveis. Assim, a competitividade dessa tecnologia depende fortemente da produção em larga escala o qual poderia reduzir os custos em até 30%, graças às economias de escala e ao avanço tecnológico (LOCATELLI et al., 2020). Ainda assim, os altos investimentos iniciais geralmente precisam do apoio do governo, já que o setor privado tende a evitar os riscos associados a novas tecnologias nucleares.

Em relação as questões ambientais, os SMRs e MRs oferecem importantes vantagens, dentre as quais destacam-se:

- 1) Baixa emissão de carbono: durante todo seu ciclo de vida, esses reatores apresentam baixa emissão de carbono quando comparadas a usinas termelétricas (IAEA, 2022). Essa característica é um aspecto fundamental para o combate às mudanças climáticas e para o alcance das metas de descarbonização.
- 2) Redução do espaço físico: em virtude da menor potência por módulo, tais sistemas necessitam menor área para instalação em relação as usinas nucleares convencionais, e plantas de energias renováveis, como solar ou eólica (LOCATELLI et al., 2020).
- 3) Redução de impactos climáticos: possibilidade de substituir termelétricas a carvão ou gás em áreas urbanas e industriais, reduzindo poluição local e garantindo uma fonte estável de energia que complementa as renováveis (WNA, 2023).

Contudo há desafios relacionados ao gerenciamento do combustível irradiado. Embora sua massa e volume sejam menores comparado aos reatores convencionais, o planejamento para sua gestão seguirá sendo necessário (IAEA, 2022). Além disso, impactos ambientais indiretos podem ocorrer durante a extração e enriquecimento de urânio, transporte de combustível e descomissionamento, sendo fundamental considerar toda a cadeia do ciclo nuclear para avaliação ambiental completa (OECD-NEA, 2021).

A aceitação social continua sendo um dos maiores obstáculos para a expansão da energia nuclear. O receio de acidentes e a preocupação com os rejeitos nucleares ainda pesam na opinião pública. Os SMRs e MRs visam mudar essa percepção ao trazer



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

a promessa de maior segurança e menor impacto ambiental. Contudo é necessário que haja diálogo transparente, participação da sociedade nas decisões e confiança em reguladores independentes.

A ausência de marcos regulatórios específicos para SMRs também é um desafio. O licenciamento nuclear tradicional é projetado para grandes usinas, não contemplando as particularidades modulares (OECD-NEA, 2021; IAEA, 2022). Países como Canadá e EUA já avançam em adaptações regulatórias, enquanto outros ainda estão em estágios iniciais. A cooperação internacional é apontada como estratégia essencial para harmonizar normas, reduzir custos e acelerar a difusão da tecnologia.

O desenvolvimento global de SMRs não reflete apenas avanços tecnológicos, mas também estratégias geopolíticas e econômicas. Nos Estados Unidos, o *NuScale Power Module* representa não só uma inovação em energia nuclear, mas também um esforço para manter a liderança tecnológica e energética do país até 2030 (WNA, 2023). O Canadá, ao investir em SMRs para regiões remotas e operações no Ártico, alia inovação à segurança energética em áreas de difícil acesso, garantindo fornecimento confiável para mineração e comunidades isoladas (NRC, 2022). A Rússia já opera a usina flutuante *Akademik Lomonosov*, mostrando que a tecnologia pode funcionar em ambientes extremos e até apoiar presença estratégica no Ártico. A China, por sua vez, lançou o *Linglong One* (ACP100), o primeiro SMR aprovado para construção comercial em larga escala, consolidando seu papel como líder global nesse setor.

Considerando dados disponibilizados pela *General Electric Hitachi Nuclear Energy* (2025), *Rosatom* (2025), *USDE* (2025), *USNRC* (2025), *WEC* (2025), *WNA* (2025), *World Nuclear News* (2025) e por *Poston* (2020), a Tabela 3 apresenta os principais projetos de SMRs e MRs em desenvolvimento. Verifica-se a diversidade tecnológica desses reatores e diferentes valores de potência, variando de 1 kWe a 300 MWe. Também são notáveis as distintas aplicações, desde fornecimento de energia para cidades e indústrias remotas até operações estratégicas em ambientes extremos, como o Ártico. Esses exemplos ilustram a versatilidade e o potencial do SMRs e MRs como soluções versáteis e adaptáveis às demandas energéticas globais. Eles podem abastecer cidades, indústrias isoladas ou até regiões marítimas, oferecendo energia segura e constante.

Tabela 3 – Principais projetos de SMRs e MRs em desenvolvimento

Nome	Tecnologia	Potência	Localização	Status	Aplicação Principal
<i>NuScale Power Module</i>	Água leve pressurizada (PWR)	50 MWe	EUA (Idaho)	Licenciamento em andamento	Geração elétrica escalável
BWRX-300	Água leve fervente (BWR)	300 MWe	Canadá (Ontario)	Construção prevista para 2030	Geração elétrica para rede
HTR-PM	Gás de alta temperatura (HTGR)	210 MWe	China (Shandong)	Operação comercial desde 2023	Substituição de termelétricas a carvão
<i>eVinci Micro Reactor</i>	Reator térmico compacto	< 10 MWe	EUA (Pennsylvania)	Em desenvolvimento	Fornecimento de energia para locais isolados
PWR-20 (Last Energy)	Água pressurizada (PWR)	20 MWe	EUA (Tennessee)	Em desenvolvimento	Alimentação de data centers
<i>Akademik Lomonosov</i>	Reator flutuante modular	35 MWe	Rússia (Ártico)	Operação desde 2020	Fornecimento de energia para regiões remotas
KRUSTY (Kilopower)	Reator com tecnologia <i>Stirling</i>	1 kWe	EUA (Nevada)	Testes concluídos com sucesso	Missões espaciais e exploração planetária
Microrreator brasileiro	Tecnologia nacional	100 W	Brasil (SP)	Em desenvolvimento	Pesquisa e desenvolvimento local



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

O Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais (DEN-UFMG) tem intensificado suas atividades de pesquisa, com o propósito de contribuir para as avaliações de segurança e eficiência de SMRs e MRs. Atualmente, o DEN-UFMG integra o Instituto Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (INCT) para Reatores Nucleares Modulares e Inovadores, contribuindo de maneira substancial para o desenvolvimento de estudos nesta área. Além disso, o DEN-UFMG constitui uma das instituições envolvidas no projeto de desenvolvimento do microrreator brasileiro (INCT, 2025; DEN-UFMG, 2025)

4 CONCLUSÕES

Os SMRs e MRs podem ter um papel estratégico na transição energética mundial. Eles se destacam pela flexibilidade de aplicação, oferecendo soluções tanto para centros urbanos quanto para áreas remotas ou indústrias isoladas. Além disso, trazem maior segurança operacional, podem complementar fontes renováveis intermitentes e ajudam o processo de descarbonização, contribuindo de forma significativa para um futuro energético mais sustentável. Entretanto, desafios significativos ainda precisam ser superados:

- 1) Econômicos – necessidade de reduzir custos por meio da produção em série.
- 2) Regulatórios – adaptação dos marcos legais e simplificação dos processos de licenciamento.
- 3) Sociais – fortalecimento da aceitação pública por meio de transparência e engajamento comunitário.
- 4) Políticos – cooperação internacional e políticas públicas de incentivo.

Portanto, os SMRs não devem ser considerados como concorrentes das energias renováveis, mas sim como parceiros estratégicos para uma matriz elétrica diversificada, robusta e de baixo carbono. O sucesso dessa tecnologia depende de políticas públicas claras, de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, e de uma comunicação transparente e eficaz com a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento à pesquisa do Brasil, CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- AL-OTHMAN, A. et al. Nuclear Desalination: A State-of-the-art Review. *Desalination*, v. 457, p. 39–61, 2019.
- CACIUFFO, R. et al. Generation-IV Nuclear Reactor Systems. In: *EPJ Web of Conferences*, v. 246, 2020.
- DEN-UFMG, <https://www.eng.ufmg.br/portal/denu/>. Acesso em: 01 out. 2025.
- EL-EMAM, R. S.; SUBKI, M. H. Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: Prospects and impediments. *International Journal of Energy Research*, v. 45, p. 16995–17004, 2021.
- GENERAL ELECTRIC HITACHI NUCLEAR ENERGY. *BWRX-300 Small Modular Reactor*. Disponível em: <https://www.governova.com/nuclear/carbon-free-power/bwr-x-300-small-modular-reactor>. Acesso em: 07 out. 2025.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

- INCT, Reatores Nucleares Modulares e Inovadores, <https://inctrmi.org/index.php/quem-somos/sobre-o-instituto/>. Acesso em: 01 out. 2025.
- INGERSOLL, D. Deliberately Small Reactors and the Second Nuclear Era. *Progress in Nuclear Energy*, v. 51, p. 589–603, 2016.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna: IAEA, 2022.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors. Proceedings of a Technical Meeting, IAEA-TECDOC-1972*. Vienna: IAEA, 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023.
- LOCATELLI, G.; BOUVIER, J.; WRIGHT, J. Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of Their Economics and Strategic Value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 118, 2020.
- NUCLEAR ENERGY AGENCY. A Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. *Organization for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency (OECD-NEA)*, v. 01, p. 1–66, 2014.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. NuScale Power Design Certification Project Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/nuscale-power-design-certification-project>. Acesso em: 10 out. 2025.
- OECD – NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. Paris: OECD-NEA, 2021.
- POSTON, David I. Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) Reactor Design. *Nuclear Technology*, v. 206, suplemento 1, p. S13–S30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1725382>.
- RAMANA, M. V. Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check. *IEEE Access*, v. 9, p. 42090–42099, 2021.
- ROSATOM. Akademik Lomonosov – Floating Nuclear Power Plant. Disponível em: <https://rosatom.ru/en/rosatom-group/smr-akademik-lomonosov/>. Acesso em: 29 set. 2025.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). *Last Energy PWR-20 Microreactor Pre-Application Activities*. Disponível em: <https://www.lastenergy.com>. Acesso em: 29 set. 2025.
- WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY (WEC). eVinci Microreactor. Disponível em: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor/>. Acesso em: 29 set. 2025.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). *HTR-PM (High Temperature Reactor Pebble-bed Module)*. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/high-temperature-reactors/htr-pm.aspx>. Acesso em: 29 set. 2025.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). *Small Nuclear Power Reactors*. London: WNA, 2023.
- WORLD NUCLEAR NEWS. *Brazil aiming to develop national microreactor*. Disponível em: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/brazil-to-begin-development-of-microreactor>. Acesso em: 29 set. 2025.