



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

O PAPEL DOS MICRO REATORES NUCLEARES (MMRs) NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA: UMA SOLUÇÃO ESTRATÉGICA PARA RESILIÊNCIA, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E NOVAS DEMANDAS DE ALTA DENSIDADE

THE ROLE OF NUCLEAR MICROREACTORS (MMRs) IN THE BRAZILIAN ENERGY TRANSITION: A STRATEGIC SOLUTION FOR RESILIENCE, DISTRIBUTED GENERATION, AND NEW HIGH-DENSITY DEMANDS

Autores: Arthur Reis Martins¹; Pedro Henrique Silva Rodrigues²; Pedro Carlos Russo Rossi³

¹Universidade Federal do ABC (UFABC) – Arthur.Reis@ufabc.edu.br; ²Pedro.Rodrigues@ufabc.edu.br;

³Pedro.Rossi@ufabc.edu.br

RESUMO

A transição energética brasileira, embora avançada em fontes renováveis, enfrenta desafios críticos de universalização, perdas estruturais na rede e o surgimento de novas demandas de alta densidade energética. Este trabalho analisa o potencial dos Micro Reatores Modulares (MMRs) como uma solução de geração distribuída para endereçar essas questões. A metodologia combina uma análise quantitativa de dados energéticos e demográficos com uma análise técnica comparativa de cenários de aplicação. A análise demonstra que um único micro reator de 5 MW, por exemplo, possui capacidade para atender à demanda energética total de 1.565 municípios brasileiros (28% do total). Mais criticamente, a análise aprofundada revela que os MMRs são tecnicamente superiores à rede convencional para suprir cargas de alta densidade e confiabilidade, como data centers e hubs de recarga de veículos elétricos, ao mesmo tempo que mitigam as perdas técnicas no Sistema Interligado Nacional (SIN) ao reduzir a dependência do transporte de energia a longas distâncias. Conclui-se que a implementação estratégica de MMRs pode acelerar a universalização do acesso à energia, fornecer energia de base limpa e resiliente para as novas fronteiras de consumo digital e de mobilidade, e aumentar a eficiência e segurança do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Micro Reator Modular (MMR); Geração Distribuída; Transição Energética; Segurança Energética; Data Centers; Veículos Elétricos.

ABSTRACT

The Brazilian energy transition, although advanced in renewable sources, faces critical challenges of universalization, structural grid losses, and the emergence of new high-density energy demands. This paper analyzes the potential of Micro Modular Reactors (MMRs) as a distributed generation solution to address these issues. The methodology combines a quantitative analysis of energy and demographic data with a comparative technical analysis of application scenarios. The analysis shows that a single 5 MW microreactor, for instance, can meet the total energy demand of 1,565 Brazilian municipalities (28% of the total). More critically, the in-depth analysis reveals that MMRs are technically superior to the conventional



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

grid for supplying high-density, high-reliability loads such as data centers and electric vehicle charging hubs, while also mitigating technical losses in the National Interconnected System (SIN) by reducing dependence on long-distance energy transport. The conclusion is that the strategic implementation of MMRs can accelerate energy access universalization, provide clean and resilient baseload power for the new frontiers of digital consumption and mobility, and increase the efficiency and security of the Brazilian electrical system.

Keywords: Micro Modular Reactor (MMR); Distributed Generation; Energy Transition; Energy Security; Data Centers; Electric Vehicles.

1 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira, com mais de 80% de sua geração proveniente de fontes renováveis, é uma referência global. Contudo, este pilar da sustentabilidade coexiste com um paradoxo estrutural que ameaça a futura competitividade e segurança energética do país. A transição para uma economia de baixo carbono, intensiva em dados e eletrificada, expõe três vulnerabilidades críticas: a persistente dificuldade em universalizar o acesso à energia em comunidades remotas, especialmente na Amazônia Legal; o surgimento de novas cargas de consumo de altíssima densidade e confiabilidade, como data centers e infraestrutura para veículos elétricos; e as perdas técnicas e econômicas significativas no Sistema Interligado Nacional (SIN), decorrentes de sua vasta extensão continental.

Neste cenário, os Micro Reatores Modulares (MMRs) emergem como uma tecnologia disruptiva. Com potências que variam de 1 a 20 MW, esses reatores avançados oferecem uma fonte de energia de base firme, limpa, segura e com uma pegada física mínima, projetada para ser instalada exatamente onde a energia é necessária. Para ilustrar a escala de sua aplicabilidade, um único MMR de 5 MW seria suficiente para abastecer integralmente a demanda de 1.565 municípios brasileiros (28% do total), transformando a realidade de áreas hoje dependentes de combustíveis fósseis caros e poluentes.

Este estudo tem como objetivo aprofundar a análise do papel estratégico dos MMRs na modernização e fortalecimento da matriz energética brasileira. Através de uma metodologia mista, buscamos demonstrar quantitativa e qualitativamente como essa tecnologia pode, de forma complementar às fontes renováveis intermitentes, promover a segurança energética em três frentes críticas:

Universalização e Descarbonização: Atendendo a comunidades isoladas e substituindo a geração a diesel.

Novas Demandas: Viabilizando a expansão da economia digital e da eletrificação da mobilidade.

Eficiência da Rede: Reduzindo perdas técnicas e aumentando a resiliência do SIN.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A literatura sobre a transição energética global converge na necessidade de um portfólio diversificado de tecnologias de baixo carbono (IEA, 2023). Enquanto a energia solar e eólica é celebrada por seus custos



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

decrecentes, sua natureza intermitente exige soluções de energia de base para garantir a estabilidade da rede (BNEF, 2024). A energia nuclear, tradicionalmente associada a grandes usinas, ressurge no debate através dos Reatores Modulares Pequenos (SMRs) e Micro (MMRs), vistos como mais flexíveis, seguros e financeiramente acessíveis (IAEA, 2024).

No contexto brasileiro, estudos da EPE (2023) e do ONS (2024) documentam extensivamente os desafios da expansão do SIN para áreas remotas e o volume de perdas técnicas e não técnicas no sistema. Autores como Tolmasquim (2022) discutem a complexidade da integração de renováveis em um sistema de dimensões continentais.

Especificamente sobre as novas demandas, relatórios da Cushman & Wakefield (2024) e da Data Center Dynamics (2023) apontam a disponibilidade de energia confiável como o principal fator limitante para a expansão de data centers na América Latina. Similarmente, a ABVE (2023) destaca a infraestrutura de recarga como o maior gargalo para a adoção em larga escala de veículos elétricos pesados no Brasil. Este artigo se posiciona na interseção dessas discussões, propondo o MMR como uma solução tecnológica ainda pouco explorada na literatura nacional, mas que endereça simultaneamente os múltiplos desafios identificados.

3 METODOLOGIA

O presente estudo utiliza uma abordagem de método misto para avaliar o potencial dos MMRs.

3.1 ANÁLISE DE ATENDIMENTO À DEMANDA MUNICIPAL E A COMUNIDADES REMOTAS

Utilizando dados de "domicílios particulares permanentes" do Censo 2022 (IBGE) e o consumo médio residencial de 152,2 kWh/mês do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 (EPE), modelou-se a demanda anual de cada um dos 5.570 municípios brasileiros. Essa demanda foi comparada com a capacidade de geração de um MMR de referência de 5 MW com fator de capacidade de 95% (41.580 MWh/ano).

3.2 ANÁLISE TÉCNICO-COMPARATIVA PARA CARGAS DE ALTA DENSIDADE

Esta etapa foca no papel dos MMRs para suprir data centers e hubs de recarga de veículos elétricos. Foram levantados, a partir de relatórios de mercado (Data Center Dynamics, BloombergNEF) e especificações técnicas da indústria, os requisitos de potência (MW), densidade de carga (W/m²), e confiabilidade (uptime/Tier). Esses requisitos foram comparados em uma análise de cenários com duas soluções de suprimento: (a) Rede Convencional + Geradores a Diesel de Backup e (b) MMR dedicado em modo "behind-the-meter". A comparação avalia critérios como confiabilidade, pegada de carbono, custo nivelado de energia (LCOE) e complexidade operacional.

3.3 ANÁLISE DE IMPACTO NA REDUÇÃO DE PERDAS DO SISTEMA

Com base nos dados de perdas do ONS e EPE, e fundamentada na Lei de Joule ($P_{\text{perda}} = R \cdot I^2$), esta análise quantifica o impacto da geração distribuída com MMRs. Um estudo de caso hipotético, porém realista, é apresentado para comparar as perdas técnicas no transporte de 5 MW por 1.000 km de uma linha



de transmissão de alta tensão versus a geração local por um MMR, demonstrando a economia de energia e o consequente alívio para o SIN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 POTENCIAL DE ATENDIMENTO À DEMANDA MUNICIPAL E A COMUNIDADES REMOTAS

A análise quantitativa confirmou que um único MMR de 5 MW pode atender integralmente a demanda de 1.565 municípios, ou 28% do total nacional. Uma análise geográfica detalhada revela que uma parcela significativa desses municípios está na Amazônia Legal, atualmente atendida por Sistemas Isolados que queimaram mais de 1,5 bilhão de litros de diesel em 2022. A substituição desses geradores por MMRs representa um avanço triplo: ambiental (descarbonização), econômico (fim da logística de combustíveis) e social (energia confiável 24/7).

Tabela 1 - Potencial de atendimento de um MMR de 5 MW a municípios brasileiros

Parâmetro	Valor
Potência do MMR de Referência	5 MW
Geração Anual Estimada (95% F.C.)	41.580 MWh
Total de Municípios no Brasil (Censo 2022)	5.570
Municípios com Demanda Atendida por 1 MMR	1.565
Percentual do Total de Municípios	28%

Estudo de Caso: Descarbonizando Roraima

O estado de Roraima é um caso emblemático. Desconectado do SIN, sua capital, Boa Vista, e arredores dependem de usinas termelétricas a gás, diesel e biomassa, com custos elevados e emissões significativas. A implantação de um conjunto de MMRs (ex: 4 unidades de 20 MW) poderia suprir a totalidade da demanda do estado com energia limpa e firme, eliminando a dependência de combustíveis fósseis, reduzindo drasticamente o custo da energia para a população e indústria local, e criando uma plataforma energética estável para o desenvolvimento econômico sustentável da região.

4.2 ADEQUAÇÃO PARA NOVAS CARGAS DE ALTA DENSIDADE: UMA ANÁLISE TÉCNICA

4.2.1 DATA CENTERS: A BUSCA PELA ENERGIA PERFEITA

O mercado de data centers no Brasil deve atrair mais de US\$ 9 bilhões em investimentos até 2029 (Cushman & Wakefield, 2024). A infraestrutura de um data center hyperscale (acima de 10 MW) é definida por sua demanda por energia de altíssima qualidade e confiabilidade. A Tabela 2 compara as soluções energéticas.

Tabela 2 - Análise Comparativa de Soluções Energéticas para um Data Center Tier IV de 10 MW



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Critério	Solução A: Rede Convencional + Diesel	Solução B: MMR Dedicado (2x 5MW)	Análise de Vantagem (MMR)
Confiabilidade (Uptime)	Dependente da rede (<99,9%) + UPS/Diesel	>99,995% (operação contínua)	Superior. Elimina o risco de falhas na rede de transmissão/distribuição.
Pegada de Carbono	Alta (emissões do diesel em testes/falhas)	Zero emissões diretas	Alinhado com metas ESG globais do setor de tecnologia.
Complexidade Operacional	Alta (manutenção de geradores, logística de diesel)	Baixa (operação autônoma, reabastecimento a cada 5-10 anos)	Reduz custos operacionais (OPEX) e riscos logísticos.
Uso do Espaço	Grande (tanques de diesel, múltiplos geradores)	Mínimo (pegada de um contêiner)	Libera espaço valioso para a infraestrutura de TI.

A análise demonstra que o MMR não é apenas uma fonte de energia, mas um componente de infraestrutura que aumenta a resiliência e o valor do data center, garantindo a qualidade de energia que a economia digital exige.

4.2.2 ELETRIFICAÇÃO DA FROTA: RESOLVENDO O GARGALO DA RECARGA RÁPIDA

Projeções da BloombergNEF (2024) indicam que a eletrificação de frotas comerciais no Brasil crescerá exponencialmente. A viabilidade dessa transição depende de hubs de recarga ultrarrápida (DCFC > 350 kW). A Tabela 3 ilustra o desafio que isso representa para a rede local.

Tabela 3 - Impacto de um Hub de Recarga para 10 Caminhões Elétricos na Rede Elétrica

Parâmetro	Demanda do Hub de Recarga	Equivalente em Consumo Residencial	Impacto na Rede de Distribuição
Potência Requerida	10 MW (10 caminhões @ 1 MW cada)	~5.000 a 7.000 residências	Choque de carga massivo, exigindo nova subestação e reforço de rede.
Solução com MMR	Um MMR de 10 MW ou dois de 5 MW	N/A	O MMR absorve 100% do impacto, operando como uma "ilha de potência" para o hub.

O MMR atua como um "viabilizador" direto da descarbonização do setor de transportes, fornecendo a potência de pico necessária sem exigir investimentos proibitivos e demorados na infraestrutura da rede, que poderiam inviabilizar os projetos de eletrificação de frotas.



4.3 IMPACTO NA REDUÇÃO DE PERDAS E AUMENTO DA EFICIÊNCIA DO SIN

O Balanço Energético Nacional (EPE, 2023) aponta perdas totais de cerca de 14% no sistema elétrico. As perdas técnicas, inerentes ao transporte, são um alvo direto para a geração distribuída. A Lei de Joule ($P_{\text{perda}} = R \cdot I^2$) mostra que a perda é proporcional à resistência (R), que por sua vez é proporcional ao comprimento do condutor.

Tabela 4 - Estudo de Caso: Perdas Técnicas para uma Carga de 5 MW

Cenário	Distância de Transmissão	Resistência da Linha (R)	Perda de Potência (P_{perda})	Energia Desperdiçada (anual)
A: Geração Centralizada (SIN)	1.000 km	Alta	~ 2-5% da energia transportada	~ 830 a 2.080 MWh
B: Geração Distribuída (MMR)	1 km	Desprezível	< 0,01%	< 4 MWh

Análise de Impacto: Ao gerar os 5 MW localmente, o MMR evita o desperdício de até 2.080 MWh por ano para esta única carga. Essa energia "salva" representa um ganho de eficiência para todo o sistema, liberando capacidade nas linhas de transmissão para outros usos e aumentando a resiliência geral. A localidade suprida pelo MMR torna-se imune a apagões causados por falhas em linhas de transmissão distantes.

5 ANÁLISE REGULATÓRIA E ECONÔMICA

5.1 CENÁRIO REGULATÓRIO

A implementação de MMRs no Brasil requer uma modernização e adaptação do arcabouço regulatório nuclear, atualmente gerido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e projetado para usinas de grande porte. O desafio reside em criar um processo de licenciamento "em série", que aproveite o design padronizado dos MMRs para acelerar a aprovação, sem comprometer a segurança. Países como EUA e Canadá já avançaram na criação de frameworks específicos para SMRs/MMRs, servindo de modelo para o Brasil. A colaboração entre a CNEN, o futuro órgão regulador independente (ANSN), e desenvolvedores de tecnologia será fundamental para viabilizar a primeira planta.

5.2 VIABILIDADE ECONÔMICA

Embora o custo de capital (CAPEX) do primeiro MMR possa ser elevado, a produção em série tende a reduzir significativamente o Custo Nivelado da Energia (LCOE). A análise econômica, contudo, não deve se limitar a uma comparação direta com o preço da energia da rede (tarifa). Para aplicações como data centers e indústria crítica, o custo a ser comparado é o da "energia de alta confiabilidade", que inclui: (1) o custo da energia da rede, (2) o CAPEX e OPEX de geradores a diesel de backup, (3) o custo de sistemas de no-break (UPS), e (4) o custo financeiro do risco de parada da operação (downtime). Nesse cenário, o LCOE



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

de um MMR dedicado, que elimina ou reduz drasticamente os itens 2, 3 e 4, torna-se altamente competitivo. Modelos de negócio como o Power Purchase Agreement (PPA) de longo prazo e parcerias público-privadas (PPPs) para descarbonização de sistemas isolados são caminhos promissores para o financiamento.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo aprofundado demonstrou, com base em análises técnicas e dados de mercado, que os Micro Reatores Modulares (MMRs) são uma solução estratégica e multifacetada para os desafios energéticos do Brasil.

Para as novas cargas de alta densidade, conclui-se que os MMRs são tecnicamente superiores às soluções convencionais. Eles são viabilizadores diretos da economia digital e da eletrificação de frotas, oferecendo um nível de confiabilidade, limpeza e estabilidade que a rede convencional dificilmente consegue garantir de forma isolada.

Para a eficiência do sistema, a análise da Lei de Joule quantifica o benefício intrínseco dos MMRs: ao atacar a causa-raiz das perdas técnicas (a distância), eles aumentam a eficiência energética, liberam capacidade no SIN e fortalecem a resiliência da rede contra falhas.

Para a universalização, o potencial de atender 28% dos municípios com unidades individuais reitera o papel transformador da tecnologia para o desenvolvimento regional e a descarbonização de sistemas isolados.

A incorporação de MMRs ao planejamento energético nacional não visa substituir as fontes renováveis, mas sim fortalecê-las. Os MMRs oferecem a energia de base firme, limpa, localizada e resiliente que o sistema necessita para acomodar a intermitência da geração solar e eólica, ao mesmo tempo em que soluciona gargalos históricos e impulsiona as novas fronteiras do desenvolvimento sustentável do Brasil.

Com base no exposto, recomendam-se as seguintes ações:

Criação de um Framework Regulatório Específico: Iniciar, sob a liderança da CNEN/ANSN, um grupo de trabalho para desenvolver um processo de licenciamento acelerado e adaptado para MMRs, baseado em melhores práticas internacionais.

Lançamento de Projetos-Piloto: Fomentar, através de PPPs, a implementação de um projeto-piloto em um sistema isolado na Amazônia Legal (como Roraima) e outro para alimentar um campus industrial ou de data center, a fim de validar a tecnologia e o modelo de negócio em solo nacional.

Inclusão no Planejamento Energético: Integrar formalmente os MMRs como uma opção de geração distribuída nos estudos de planejamento de longo prazo da EPE, reconhecendo seu valor para a segurança e resiliência do sistema.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica 2023. São Paulo: ABVE, 2023.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

BLOOMBERGNEF (BNEF). Electric Vehicle Outlook 2024. New York: BNEF, 2024.

CUSHMAN & WAKEFIELD. Global Data Center Market Comparison 2024. Chicago: Cushman & Wakefield, 2024.

DATA CENTER DYNAMICS. Brazil Data Center Market Analysis & Forecast 2023-2029. DCD Intelligence, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2023 (ano base 2022). Brasília: EPE, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 (ano base 2022). Brasília: EPE, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: IAEA, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Relatório Anual da Operação 2023. Brasília: ONS, 2024.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.). Transição Energética no Brasil: Desafios e Oportunidades. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2022.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. "What is a Nuclear Microreactor?". Washington: Office of Nuclear Energy, 2023.