



PEQUENOS REATORES COMO INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA ESTRATÉGICA PARA A TRANSIÇÃO DIGITAL E INDUSTRIAL BRASILEIRA

Arthur Reis Martins¹, Lubianka Ferrari Russo Rossi², Joelton Dias dos Santos Junior³

^{1,2,3}*Prometheus Nuclear Technologies, São Bernardo do Campo, Brasil*

^{1,3}*Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil (arthur.reis@ufabc.edu.br)*

Resumo: Este trabalho analisa a viabilidade técnica e econômica da integração de pequenos reatores como infraestrutura de energia firme para data centers no contexto da transição digital brasileira. Através de modelagem de sensibilidade do LCOE e balanço energético, demonstrou-se que um pequeno reator de 10 MWe supre integralmente uma carga de TI de 5 MW com uma margem operacional de 35%. Mostrando a viabilidade dos pequenos reatores na integração onde há a necessidade de densidade energética firme e distribuída.

Palavras-chave: Energia Nuclear; Energias Renováveis; Geração Distribuída; Demanda Elétrica; Planejamento Energético.

INTRODUÇÃO

A crescente digitalização da economia global e a expansão de tecnologias de alta densidade de processamento, como a Inteligência Artificial, impõem desafios sem precedentes à infraestrutura energética. No Brasil, embora a matriz seja predominantemente renovável, a intermitência das fontes eólica e solar (NREL, 2021) exige soluções de ancoragem de potência firme para garantir a operação contínua de cargas críticas, como os data centers.

Nesse cenário, os pequenos reatores modulares emergem como uma solução disruptiva, permitindo a geração descentralizada com elevada disponibilidade e baixa pegada de carbono. Diferente das grandes centrais nucleares, os pequenos reatores oferecem adequação dimensional à escala industrial e digital, podendo atuar



de forma isolada ou em microrredes.

Além da adequação escalar, a viabilidade de integração física desses pequenos reatores a centros de processamento de dados fundamenta-se nos recentes avanços em segurança intrínseca e passiva. O design termodinâmico e neutrônico destas unidades assegura coeficientes de reatividade fortemente negativos, garantindo um controle estrito e natural da criticalidade do núcleo, mesmo em cenários de transientes severos. Sob condições de perda de escoamento ou falha de potência elétrica externa, o calor de decaimento é removido por mecanismos passivos de convecção, eliminando a necessidade de intervenção ativa de operadores. Essa característica mitiga de forma substancial o risco de dispersão radiológica, fundamentando tecnicamente a redução das zonas de planejamento de emergência e viabilizando o licenciamento de microrredes nucleares adjacentes a polos industriais.

O objetivo deste trabalho é avaliar a coerência dimensional e a sensibilidade econômica desta tecnologia, demonstrando como a integração com sistemas de armazenamento térmico pode otimizar a resiliência do Sistema Interligado Nacional (SIN) (ANA, 2026; PELISSARI, 2014; MARTINS, 2025).

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo adota uma modelagem tecno-econômica determinística para avaliar a viabilidade de pequenos reatores modulares como infraestrutura de potência firme para redes digitais críticas. A metodologia foi estruturada em duas frentes analíticas principais: adequação dimensional e sensibilidade econômico-financeira.

Para a adequação dimensional termodinâmica, estabeleceu-se o balanço energético anual considerando um pequeno reator de referência operando em carga base. Os parâmetros operacionais da central nuclear, como potência elétrica, fator de capacidade e eficiência, foram baseados nas métricas de desempenho para reatores modulares avançados. O perfil de consumo da carga crítica foi modelado utilizando o indicador de eficiência energética *Power Usage Effectiveness* (PUE), calibrado para data centers de operação contínua e alta densidade.

A análise de viabilidade financeira foi alicerçada no modelo de Custo Nivelado de Energia (LCOE), calculando o ponto de equilíbrio econômico ao longo do ciclo de vida da instalação. As premissas contábeis incorporaram CAPEX, OPEX e o Fator de

Recuperação de Capital, adotando faixas de incerteza típicas para tecnologias de geração padronizada em fábricas. O impacto das variáveis no LCOE foi posteriormente avaliado por meio de análise de sensibilidade paramétrica unidimensional, permitindo identificar os vetores de custo mais determinantes para o projeto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem desenvolvida neste trabalho não se limita à estimativa isolada de produção energética ou custo nivelado. Ela foi estruturada como uma análise integrada de coerência dimensional, econômica e sistêmica, avaliando a inserção de pequenos reatores frente à expansão projetada da demanda brasileira, estimada em aproximadamente $967 \frac{TWh}{ano}$ até 2035 (EPE, 2024), e à crescente complexidade

operacional do Sistema Interligado Nacional (SIN), particularmente pressionado pelo crescimento de cargas digitais de alta densidade e operação contínua.

A produtividade anual de um pequeno reator foi estimada a partir da definição física fundamental de energia como potência integrada no tempo. Considerando operação média ponderada por disponibilidade, obtém-se:

$$E = P \cdot CF \cdot 8760 \quad (1)$$

onde P é a potência elétrica nominal (MW), CF é o fator de capacidade e 8760 representa o número de horas anuais. Adotou-se como caso base um pequeno reator de 10 MWe com $CF=0,90$, valor consistente com a elevada disponibilidade esperada para reatores modulares avançados (IAEA, 2022). O resultado é uma produção anual de 78,84 GWh .

Embora esse volume represente uma fração reduzida da carga nacional agregada, sua relevância estratégica não está na escala percentual do consumo brasileiro, mas na adequação dimensional à nova tipologia de carga. O sistema elétrico brasileiro não enfrenta, em termos estruturais, escassez anual de energia, mas sim desafios associados à gargalos regionais, reforço de transmissão, despacho térmico

emergencial e volatilidade hidrológica. Nesse contexto, a capacidade de prover aproximadamente 9 *MW* médios contínuos ao longo do ano — que é o equivalente operacional de um pequeno reator de 10 *MWe* com 90 % de disponibilidade — torna-se particularmente relevante para atendimento localizado de cargas firmes.

Essa adequação foi testada por meio da modelagem de um data center de 5 *MW* de carga de *TI*, utilizando o indicador de eficiência energética PUE (Power Usage Effectiveness). O consumo anual foi estimado por (MORDOR INTELLIGENCE,2024):

$$E_{DC} = (P_{TI} \cdot PUE) \cdot FC \cdot 8760 \quad (2)$$

onde P_{TI} representa a carga de *TI*, PUE a eficiência global da instalação e FC o fator de carga operacional. Considerando valores típicos $PUE=1,4$ e $FC=0,95$, obtém-se consumo da ordem de $58,25 \frac{GWh}{ano}$. A comparação direta com a produção do pequeno

reator $\left(78,84 \frac{GWh}{ano}\right)$ evidencia uma margem operacional aproximada de 26 %, demonstrando compatibilidade dimensional entre oferta e demanda.

Esse resultado é particularmente significativo quando analisado no contexto da matriz energética brasileira, cuja expansão renovável — especialmente solar e eólica — apresenta fatores de capacidade médios significativamente inferiores (20 – 25 % para solar e 40 – 50 % para eólica). Para garantir potência média contínua equivalente a 9 *MW*, seria necessária uma capacidade solar instalada superior a 35 *MWe*, além de sistemas de armazenamento de longa duração. O pequeno reator, por operar com elevado fator de capacidade, entrega potência firme diretamente, reduzindo a necessidade de sobredimensionamento e mitigando custos sistêmicos associados à intermitência.

A viabilidade econômica foi avaliada por meio do custo nivelado de energia (LCOE), incorporando investimento inicial, custo de capital e despesas operacionais ao longo do ciclo de vida:

$$LCOE = \frac{CAPEX \cdot CRF(r, n) + OPEX_{ann}}{P \cdot CF \cdot 8760} \quad (3)$$

onde o fator de recuperação de capital é dado por:

$$CRF(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4)$$

Utilizando CAPEX de $8.000 \frac{USD}{kW}$ (Lazard, 2023), OPEX anual de 3 % e vida útil 40 de

anos, observou-se que o LCOE é altamente sensível ao custo de capital e à padronização industrial. Isso indica que a competitividade dos pequenos reatores depende menos da física do reator — cuja eficiência operacional é elevada — e mais da estrutura financeira e da escala de fabricação (factory fabrication). Diferentemente de fontes intermitentes, cujo custo sistêmico inclui reforço de transmissão, armazenamento eletroquímico e reserva girante, o pequeno reator internaliza estabilidade e firmeza na própria geração.

Para quantificar o peso relativo de cada variável econômica no LCOE, conduziu-se uma análise de sensibilidade paramétrica unidimensional (Figura 1), avaliando as faixas de incerteza definidas na Tabela 1. A análise evidencia que a viabilidade financeira do projeto é governada prioritariamente pelo CAPEX e pela Taxa de Desconto (r).

O CAPEX apresenta a maior amplitude de variação nos custos de geração, reflexo do grau de maturidade da cadeia de suprimentos e da padronização industrial em múltiplas camadas tecnológicas das diferentes fabricantes. A taxa de desconto, por sua vez, demonstra que o acesso a mecanismos de financiamento de longo prazo com juros alinhados (próximos a 5 %) é crítico. A mitigação do custo de capital pode ser viabilizada por meio de políticas públicas de transição energética e classificação do investimento como infraestrutura verde.

Em contraste, o OPEX e o Fator de Capacidade apresentam sensibilidade moderada. A longa vida útil de operação projetada para estes pequenos reatores atua como um mecanismo de diluição temporal do alto custo inicial de capital, oferecendo um perfil de amortização altamente competitivo frente a alternativas fósseis de despacho contínuo.

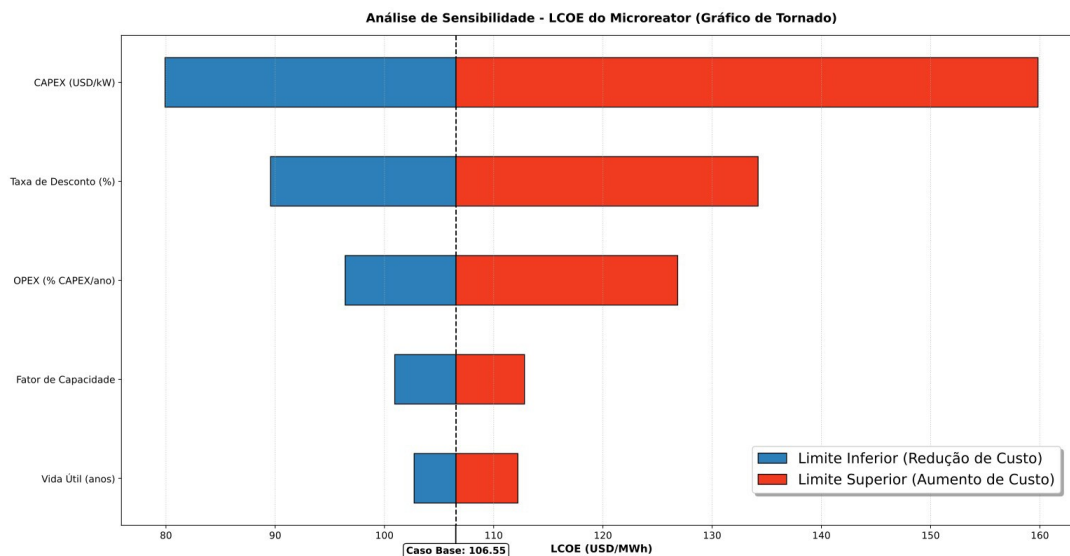


Figura 1. Análise de sensibilidade paramétrica (Gráfico de Tornado) do Custo Nivelado de Energia (LCOE) para o caso base do pequeno reator.

A Tabela 1 estabelece a base quantitativa para a modelagem técnica e econômica, segmentando as variáveis em três blocos fundamentais: Pequeno Reator, Econômico e Data Center. No primeiro bloco, a adoção de um Fator de Capacidade de 90% reflete a expectativa de operação contínua e estável inerente aos pequenos reatores modernos, conforme as diretrizes da IAEA (2022), garantindo a segurança de suprimento para cargas críticas.

A Tabela 2 demonstra uma compatibilidade técnica rigorosa entre a oferta energética do pequeno reator e a demanda crítica do Data Center. Com uma produção anual de 78.840 *MWh*, o sistema garante o suprimento integral do consumo do Data Center, estimado em 58,25 *GWh*, operando com uma Margem Operacional de 20.623 *MWh*. Essa configuração resulta em uma "folga" de aproximadamente 35 % sobre a carga nominal do Data Center (equivalente a 26 % da produção total do reator). Do ponto de vista da engenharia nuclear e de sistemas híbridos, essa excedência não é um desperdício, mas sim um requisito de projeto essencial para garantir a resiliência da infraestrutura e atua estrategicamente na;

- **Segurança e Manutenção:** Permite flutuações sazonais e paradas técnicas programadas sem comprometer a disponibilidade do Data Center.

- **Flexibilidade Térmica:** O excedente de geração pode ser direcionado para o sistema de armazenamento térmico (TES), permitindo que o reator opere em regime estacionário constante, o que otimiza a vida útil dos componentes nucleares.
- **Expansão e Escalabilidade:** Provê capacidade reserva para futuros incrementos na densidade de processamento (IA/HPC) sem a necessidade imediata de novos módulos de geração.

Tabela 1. Parâmetros do caso base e faixas de sensibilidade

Bloco	Parâmetro	Caso base	Faixa (sensibilidade)	Fonte/justificativa
Pequeno Reator	Potência $\left(\frac{P}{MW_e}\right)$ Fator de	10	—	Caso de referência do estudo Operação contínua
Pequeno Reator	capacidade (CF) CAPEX	0,90	0,85 – 0,95	esperada para pequenos reatores (IAEA, 2022) Faixa paramétrica
Econômico	$\left(\frac{USD}{kW}\right)$ OPEX	8000	6000 – 12000	para tecnologia emergente
Econômico	(%CAPEX/ano) Taxa	3 %	2 – 5 %	Faixa paramétrica conservadora
Econômico	$\left(\frac{\%}{\text{ano}}\right)$ Vida útil	7 %	5 – 10 %	Cenários de financiamento
Econômico	$\left(\frac{n}{\text{anos}}\right)$	40	30 – 60	Cenários usuais de ativos de geração
Data center	Carga $\left(\frac{P_{IT}}{MW}\right)$	5	—	Caso de referência
Data center	PUE	1,4	1,2 – 1,6	Faixa típica setorial (Uptime Institute, 2023)
Data center	Fator de carga (FC)	0,95	0,85 – 0,98	Cargas digitais contínuas

Tabela 2. Adequação dimensional pequeno reator × data center (caso base)

Item	Expressão	Resultado
Energia anual pequeno reator	$E = P \cdot CF \cdot 8760$	78,84 $\frac{GWh}{ano}$
Consumo anual data center	$EDC = (P_{TI} \cdot PUE) \cdot FC \cdot 8760$	58,25 $\frac{GWh}{ano}$
Margem operacional	$\frac{(E - EDC)}{EDC}$	$\approx 35 \%$
“Folga” sobre a carga	$E - E_{DC}$	$\approx 20,6 \frac{GWh}{ano}$

E para demonstrar o desempenho dos pequenos reatores e sistemas de armazenamento TES frente às alternativas convencionais, os autores elaboraram uma figura (Figura 2), com base em (IAEA, 2023; UPTIME INSTITUTE, 2023). Onde os números estão escalonados de 1 a 5 onde 5 é excelente, mostrando o desempenho dos pequenos reatores e sistemas de armazenamento térmico (TES) frente às alternativas convencionais de suprimento para cargas críticas. A integração de pequenos reatores+TES recebeu um conceito 4 nos custos operacionais, mas como demonstrado neste trabalho, este conceito pode ser mitigado com o tempo de vida útil.

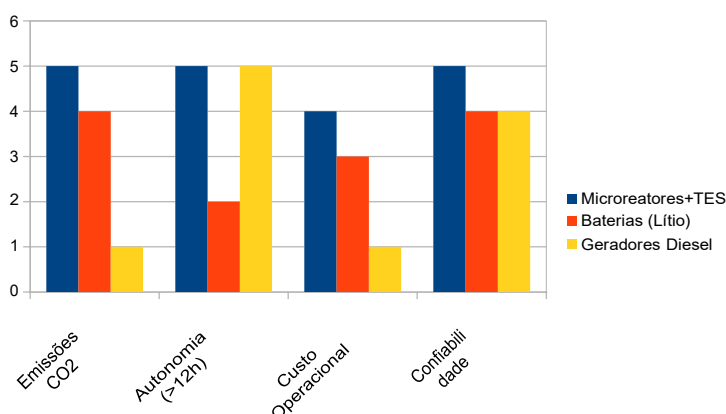


Figura 2. Análise de pequenos reatores acoplados a um sistema de armazenamento TES, baterias de lítio e geradores à diesel.



A síntese estratégica da modelagem demonstra que os pequenos reatores não devem ser avaliados como substitutos de grandes blocos de geração centralizada, mas como infraestrutura modular firme, adequada à escala da nova economia digital e capaz de reduzir pressão sobre transmissão, minimizar perdas estruturais e aumentar a resiliência regional. Em uma matriz predominantemente renovável e hidrotérmica, sujeita à variabilidade climática e à expansão localizada de carga, a eficiência dos pequenos reatores manifesta-se não apenas em termos termodinâmicos, mas sobretudo em sua capacidade de fornecer potência garantida contínua na escala exata da demanda emergente.

CONCLUSÃO

A modelagem energética, econômica e sistêmica apresentada demonstra que pequenos reatores modulares não devem ser avaliados sob a ótica isolada de participação percentual na matriz nacional, mas sim pela sua coerência dimensional com a nova estrutura de demanda elétrica brasileira. Embora a produção anual de um pequeno reator de 10 MWe (78,84 GWh/ ano) represente fração reduzida frente ao consumo projetado de aproximadamente 870 – 967 TWh /ano até 2034–2035 (EPE, 2024), sua relevância estratégica emerge da capacidade de fornecer potência firme contínua, compatível com cargas digitais críticas de alta disponibilidade. A análise de adequação demonstrou que um único módulo de 10 MWe é capaz de sustentar um data center de médio porte com uma folga operacional de 35%, garantindo a segurança de suprimento sem sobrecarregar o sistema de transmissão.

A análise dos parâmetros financeiros apresentados neste trabalho evidencia que a dominância econômica do modelo está associada principalmente ao CAPEX e à taxa de desconto, e não a limitações físicas do reator. A combinação entre uma extensa vida útil e um elevado fator de capacidade (0,85–0,95) não apenas garante geração firme próxima à potência nominal, mas também comprova que a resiliência financeira do projeto é perfeitamente compatível com os desafios de uma matriz crescentemente renovável e intermitente.

Este trabalho apresentou como os pequenos reatores configuram-se na matriz energética atual assegurando geração distribuída e locais que necessitam de grande densidade de energia e cargas críticas.



No contexto do planejamento energético brasileiro, marcado pela expansão de renováveis, eletrificação setorial e digitalização da economia, a inserção de pequenos reatores configura-se como estratégia de estabilização estrutural da matriz. Eles não substituem solar ou eólica; atuam como tecnologias de ancoragem de potência firme que viabilizam maior penetração renovável sem crescimento proporcional de custos de integração. Sua contribuição reside na redução da necessidade de backup fóssil, na estabilização de cargas críticas e na mitigação de riscos associados à variabilidade climática e à concentração regional de demanda.

Portanto, sob a perspectiva do planejamento de médio e longo prazo, pequenos reatores representam uma alternativa tecnicamente consistente e estrategicamente alinhada à transição energética brasileira, especialmente em cenários de expansão de cargas intensivas em confiabilidade e de crescente complexidade operacional do sistema elétrico nacional.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos a Prometheus Nuclear Technologies e a iniciativa do SEBRAE Nacional, Ciclo 02 do Catalisa ICT.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <http://www.site.com.br>. Acesso em: 01/03/2026.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034)*. EPE, Rio de Janeiro, 2024.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. *Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems*. IAEA-TECDOC-1881, Vienna, 2020.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. IAEA, Vienna, 2022.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. *Technical Readiness and Integrated Assessment of Small Modular Reactors*. Vienna: IAEA Nuclear Energy Series, 2023.



IEA. International Energy Agency. *Projected Costs of Generating Electricity*.

IEA/NEA, Paris, 2020.

LAZARD. *Levelized Cost of Energy Analysis (LCOE) – Version 16.0*. Lazard, New York, 2023.

MARTINS, A. R.; RODRIGUES, P. H. S.; ROSSI, P. C. R. O papel dos micro reatores nucleares (MMRs) na transição energética brasileira: uma solução estratégica para resiliência, geração distribuída e novas demandas de alta densidade. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY, 2025, Fortaleza. Fortaleza: Centro de Eventos do Ceará, 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. *Brazil Data Center Market – Growth, Trends and Forecasts*. Hyderabad: Mordor Intelligence, 2024.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Concentrating Solar Power Best Practices Study*. Golden: NREL, 2021.

PELISSARI, A. S. et al. *Análise de Sistemas Híbridos de Energia*. Itajubá: SBPE, 2014.

UPTIME INSTITUTE. *Global Data Center Survey*. Uptime Institute, Seattle, 2023.