ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

ALÉM DO QUILOWATT-HORA: INFRAESTRUTURA NUCLEAR DE DUPLO VALOR PARA ENERGIA DE BAIXO CARBONO E SOBERANIA RADIOISOTÓPICA NO BRASIL

BEYOND THE KILOWATT-HOUR: DUAL-VALUE NUCLEAR INFRASTRUCTURE FOR LOW-CARBON ENERGY AND RADIOISOTOPE SOVEREIGNTY IN BRAZIL

MÁS ALLÁ DEL KILOVATIO-HORA: INFRAESTRUCTURA NUCLEAR DE DOBLE VALOR PARA ENERGÍA BAJA EN CARBONO Y SOBERANÍA RADIOISOTÓPICA EN BRASIL

doi.org/10.53426/con.v5i0.009

Carlos Henrique Fonseca e Silva Tavares Reto[1]
[1] Centro Universitário Única, Ipatinga-MG, Brasil, carlosreto0458@gmail.com.
Grupo de Trabalho: GT 9 – Engenharias, Arquitetura, Urbanismo e Infraestrutura

RESUMO

A avaliação da infraestrutura nuclear apenas pelo quilowatt-hora omite serviços tecnológicos decisivos para a saúde, a indústria e a autonomia científica. Este estudo examinou como reatores de potência e reatores multipropósito podem compor, sem equivalência tecnológica indevida, uma arquitetura brasileira de duplo valor: eletricidade de baixo carbono e segurança do fornecimento de radioisótopos. Realizou-se estudo documental comparativo, concluído em agosto de 2026, com fontes institucionais e artigo original publicados entre 2018 e 2026. Foram contrastados o sistema de produção de lutécio-177 nos reatores CANDU da Bruce Power, no Canadá; a produção de molibdênio-99 e o desenvolvimento de alvos porosos no reator OPAL, na Austrália; e o projeto do Reator Multipropósito Brasileiro. A análise abrangeu função energética, rota de irradiação, maturidade operacional, rendimento do alvo, rejeitos, proteção radiológica, resiliência logística, regulação, salvaguardas e benefício social. Os resultados distinguem duas configurações. Na primeira, o mesmo reator comercial fornece eletricidade e irradia itérbio-176 para produzir lutécio-177; a Unidade 7 demonstrou a rota, e o sistema da Unidade 6 foi destinado à expansão e à redundância durante paradas. Na segunda, um reator de pesquisa dedica fluxo neutrônico a radioisótopos, materiais e feixes. Simulações do OPAL indicaram que o alvo cilíndrico de UO2 a 1% obteve o maior rendimento de molibdênio-99, a segunda melhor sustentabilidade e a menor formação de plutônio-239 entre as geometrias comparadas; os alvos porosos permanecem em ensaios, não em produção comercial. Para o Brasil, a transposição direta do arranjo CANDU para Angra não é tecnicamente demonstrada. O resultado aplicável é uma carteira coordenada: Angra na geração; o RMB, projetado para até 30 MW térmicos, na produção e na pesquisa; capacidade de processamento; contratos externos diversificados; regulação independente; e gestão integral dos rejeitos. Da comparação derivou-se uma matriz com indicadores ambientais, sociais e de governança vinculados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 3, 7, 9, 12, 13, 16 e 17. Conclui-se que soberania

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

radioisotópica não significa isolamento, mas capacidade doméstica, cooperação internacional, rastreabilidade e redundância para assegurar energia, diagnóstico e terapia.

Palavras-chave: infraestrutura nuclear; radioisótopos; segurança do suprimento; ESG; Agenda 2030.

INTRODUÇÃO

A infraestrutura nuclear entrega mais do que eletricidade. Reatores, instalações de irradiação, células quentes, radiofarmácias, logística e repositórios formam sistemas técnicos cujos resultados alcançam energia, diagnóstico, terapia e pesquisa. A Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa, sediada em Genebra, situa a comparação energética no ciclo de vida (UNECE, 2021); a Agência Internacional de Energia Atômica relaciona tecnologias nucleares aos ODS 3, 7, 9, 12, 13, 16 e 17 (AIEA, 2024). Essa leitura permite aplicar critérios ambientais, sociais e de governança (ESG).

> [...] apoiar o desenvolvimento de aplicações nucleares nos Estados-Membros, com vistas ao fortalecimento de infraestruturas e ao estímulo à ciência, à tecnologia e à engenharia para atender, de modo seguro, às necessidades de crescimento e desenvolvimento sustentável [...]. (AIEA, 2025, Anexo 1, p. 1, tradução nossa).

O problema consiste em reconhecer valor conjunto sem supor que reatores distintos sejam intercambiáveis. Perguntou-se: quais funções técnicas e critérios ESG permitem avaliar reatores de potência e multipropósito como carteira nacional de energia de baixo carbono e segurança radioisotópica? Objetivou-se comparar três arquiteturas e extrair indicadores aplicáveis ao Brasil, preservadas as diferenças entre CANDU, OPAL e RMB.

METODOLOGIA

Executou-se estudo documental comparativo de casos múltiplos, encerrado em agosto de 2026. O corpus reuniu documentos da ONU/UNECE, AIEA, Brasil/CNEN, Bruce Power e ANSTO, além do artigo original de Raposio et al. (2023) e do estudo brasileiro de Heilbron Filho et al. (2018). Examinaram-se função, rota de produção, maturidade, eficiência do alvo, rejeitos, proteção radiológica, continuidade logística, regulação, salvaguardas e benefício social. Resultados simulados, ensaios, instalações operacionais e projetos foram classificados separadamente.

A matriz ESG foi construída por categorização temática dos elementos documentados nas três experiências. Adotaram-se quatro critérios de seleção dos indicadores: pertinência ao valor energético e radioisotópico, rastreabilidade à fonte citada, relevância socioambiental e possibilidade de verificação futura. Cada indicador foi associado à sua base de evidência e ao estágio do objeto analisado: produção operacional, simulação, ensaio, acordo de suprimento ou projeto. Não se calcularam índices compostos, séries comparáveis para os três países nem desempenho do RMB; indicadores sem mensuração permanecem parâmetros propostos, e não resultados observados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Canadá representa a dupla entrega na própria unidade. O sistema da Bruce Power irradia itérbio-176 em reator CANDU e gera lutécio-177 sem interromper a produção elétrica. A Unidade 7 realizou a primeira produção comercial dessa rota; o sistema anunciado para a Unidade 6 amplia capacidade e cria redundância para a parada programada da Unidade 7 em 2028 (Bruce Power, 2025). O vínculo social inclui participação financeira e capacitação da Saugeen Ojibway Nation, aspecto que aproxima engenharia e governança territorial.

O OPAL representa especialização multipropósito. Raposio et al. (2023) modelaram, no MCNP6.2, alvos retangulares, esféricos e cilíndricos de UO2 a 1%, irradiados por quatro a sete dias. O cilindro apresentou o maior rendimento de Mo-99, a segunda melhor sustentabilidade, a menor

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

formação de Pu-239 e aquecimento desprezível nas condições avaliadas. Em 2026, a ANSTO informou síntese e ensaio de alvos porosos reutilizáveis após modelagem e prova de conceito (ANSTO, 2026). Logo, trata-se de fronteira experimental, não de produção comercial. O enriquecimento de 1% pertence ao alvo simulado; não deve ser confundido com o combustível do RMB.

O RMB foi projetado como reator de piscina aberta de até 30 MW térmicos, baseado no OPAL de 20 MW, com combustível U3Si2-Al a 19,75% de U-235 e posições próprias para radioisótopos e ensaios (CNEN, 2025a). Em manifestação oficial à AIEA, o Brasil informou início da infraestrutura, expectativa de atividades em 2030 e operação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear desde agosto de 2025 (Brasil, 2025, p. 2-3). Enquanto o RMB não opera, o acordo entre a CNEN e a China Isotope & Radiation Corporation (CIRC) busca fornecimento estável de I-131, Lu-177 e Mo-99, entre outros (CNEN, 2025b). O dado redefine soberania: capacidade doméstica e cooperação diversificada são complementares.

A comparação produziu duas lógicas: valor simultâneo na unidade CANDU e valor coordenado na carteira brasileira Angra–RMB. Não há base para atribuir aos reatores de água pressurizada (PWR) de Angra a rota instalada no CANDU; qualquer adaptação exigiria estudo, licenciamento e demonstração próprios. O Quadro 1 explicita a matriz ESG derivada da comparação: os indicadores organizam critérios de acompanhamento, suas fontes e o alcance de cada evidência. Não constituem aferições de desempenho brasileiro. A advertência de Heilbron Filho et al. (2018, p. 199) permanece central: a segurança exige “sólida compreensão científica, boa engenharia” e avaliações robustas.

Quadro 1 – Matriz ESG de duplo valor: critérios, evidências e limites

Dimensão	Critério / indicador	Evidência documental e delimitação
Ambiental	Emissões no ciclo de vida; geração e uso de recursos.	UNECE (2021): avaliação comparativa do ciclo de vida. Não foram calculados valores específicos para Angra ou RMB.
Ambiental	Rendimento de Mo-99, resíduos e descomissionamento.	Raposio et al. (2023): simulação de alvos UO_2 a 1%, por 4–7 dias; ANSTO (2026): ensaios; Heilbron Filho et al. (2018): rejeitos. Sem medição no RMB.
Social	Oferta de Lu-177, Mo-99 e I-131; continuidade assistencial.	Bruce Power (2025): Lu-177 na Unidade 7; CNEN (2025b): acordo para I-131, Lu-177 e Mo-99; ANSTO (2026): Mo-99. Sem estimativa brasileira de pacientes.
Social	Proteção radiológica, qualificação e participação territorial.	Bruce Power (2025): Saugeen Ojibway Nation; AIEA (2024): ODS; Heilbron Filho et al. (2018): proteção. Sem série brasileira.
Governança	Licenciamento, salvaguardas, segurança e rejeitos.	Brasil (2025): estrutura regulatória; CNEN (2025a): RMB projetado para até 30 MW térmicos; AIEA (2025): orientações. Não

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

		constitui auditoria.
Governança	Rastreabilidade e redundância no suprimento.	Bruce Power (2025): sistema da Unidade 6 anunciado; CNEN (2025b): cooperação externa. Redundância brasileira não demonstrada.

Fonte: elaboração própria, com base nos documentos identificados no quadro. Indicadores propostos para verificação; evidências operacionais, simuladas, experimentais e projetadas não foram equiparadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contribuição do estudo é propor uma leitura de soberania radioisotópica verificável: geração firme de baixo carbono, produção nacional, processamento, contratos externos redundantes, proteção radiológica, salvaguardas e destino dos rejeitos. A matriz ESG articula os ODS 3 e 7 aos ODS 9, 12, 13, 16 e 17, mediante indicadores definidos, com fontes e estágios tecnológicos discriminados.

O limite é documental: não foram mensurados custos, emissões específicas, cobertura de pacientes, riscos ou rendimentos do RMB, nem comprovada a adaptação de Angra à irradiação. Tais avaliações dependem de dados de engenharia, licenciamento e séries verificadas. As evidências fundamentam a proposta de uma carteira coordenada Angra–RMB, mas não demonstram seus resultados futuros nem transformam ensaios e tecnologias estrangeiras em capacidade instalada no Brasil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. 17 goals to transform our world. *IAEA Bulletin*, v. 65, n. 4, nov. 2024. Disponível em: https://www.iaea.org/bulletin/17-goals-to-transform-our-world. Acesso em: 25 ago. 2026.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Strengthening the Agency's activities related to nuclear science, technology and applications: report by the Director General*. GOV/2025/30-GC(69)/2. Vienna: IAEA, 2025. Disponível em: https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc69-2.pdf. Acesso em: 25 ago. 2026.

AUSTRALIAN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION. *New target developed to improve production of important medical radioisotope*. Lucas Heights, 25 fev. 2026. Disponível em: https://www.ansto.gov.au/news/new-target-developed-to-improve-production-of-important-medical-radioisotope. Acesso em: 25 ago. 2026.

BRASIL. *Statement delivered by Ms. Luciana Santos at the 69th session of the General Conference of the IAEA*. Vienna, 15 set. 2025. Disponível em: https://www.iaea.org/sites/default/files/25/09/gc69-statement-brazil.pdf. Acesso em: 25 ago. 2026.

BRUCE POWER. *Minister Hodgson visit marks new isotope production system for Unit 6*. Tiverton, 19 ago. 2025. Disponível em: https://www.brucepower.com/2025/08/19/minister-hodgson-visit-marks-new-isotope-production-system-for-unit-6-as-bruce-power-son-and-isogen-expand-role-in-cancer-fighting-innovation/. Acesso em: 25 ago. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *O Reator Multipropósito Brasileiro - RMB*. Brasília, DF, 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/rmb/o-reator-multiproposito-brasileiro-rmb. Acesso em: 25 ago. 2026.

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Brasil e China firmam cooperação estratégica para assegurar fornecimento de radioisótopos essenciais*. Brasília, DF, 17 out. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/ultimas-noticias/brasil-e-china-firmam-cooperacao-estrategica-para-assegurar-fornecimento-de-radioisotopos-essenciais. Acesso em: 25 ago. 2026.

HEILBRON FILHO, P. F. L. et al. Disposição geológica de rejeitos radioativos no Brasil: diretrizes de proteção radiológica, requisitos e avaliação de segurança. *Terrae Didatica*, v. 14, n. 3, p. 196-206, 2018. DOI: https://doi.org/10.20396/td.v14i3.8651289.

RAPOSIO, R. et al. Investigating 99Mo output changes in high-sustainability uranium targets by modifying target volume and geometry. *Frontiers in Nuclear Engineering*, v. 2, 978990, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.978990.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Life cycle assessment of electricity generation options*. Geneva: United Nations, 2021. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2021-11/LCA_final.pdf. Acesso em: 25 ago. 2026.