



Informativo da Associação Brasileira
de Energia Nuclear
Ano 32 • Número 59 • Agosto 2026

BRASIL NUCLEAR

MAIS QUALIDADE PARA A ÁGUA

Ao tratar efluentes, radiação reduz poluição e
contribui para proteger recursos hídricos

UMA OPORTUNIDADE HISTÓRICA
Brasil pode ser muito mais que um mero
exportador de minerais estratégicos

Editorial	
Tecnologia, recursos estratégicos e desenvolvimento: uma oportunidade para o Brasil	3
Entrevistas	
Deputados Arnaldo Jardim (Cidadania-SP) e Júlio Lopes (PP-RJ)	4
Capa	
Radiação, um meio rápido e seguro para o tratamento de efluentes	7
Política	
O setor nuclear brasileiro: o que falta para deslançar? Entre capacidades existentes e oportunidades perdidas	11
Tecnologia	
Desenvolvimento e Testes de Tecnologias Críticas Aplicáveis a Microrreatores Nucleares	14
Aplicação	
Microesferas de vidro: impactos e desafios para ampliar o acesso à radioembolização hepática no Brasil	18

Presidente da Aben
Carlos Henrique da Silva Seixas

Diretor de Comunicação
Jairo Bastos

Conselho Editorial
Carlos Freire Moreira
Carlos Henrique C. Mariz
Edson Kuramoto
Francisco Rondinelli
Márcia Flores
Olga Mafra
Olga Simbalista

Editora
Vera Dantas

Colaboradora
Pamela Alves

Edição de Arte
IG+ Comunicação Integrada

Brasil Nuclear é uma publicação da Associação Brasileira de Energia Nuclear - Aben
Rua Candelária, 65 • sala 303 • Centro Rio de Janeiro • RJ • CEP: 20091-906
Tel: (55 21) 2266 0480
aben@aben.org.br • www.aben.org.br

Tecnologia, recursos estratégicos e desenvolvimento: uma oportunidade para o Brasil

Vivemos um momento singular na história do desenvolvimento tecnológico mundial. A aceleração da transição energética, a expansão da inteligência artificial, a crescente demanda por minerais críticos, a busca por maior segurança energética e o fortalecimento das cadeias produtivas estratégicas estão redesenhando a economia global e redefinindo o papel das nações que dominam conhecimento, recursos naturais e capacidade de inovação.

O Brasil reúne atributos raros nesse novo cenário. Possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, importantes reservas de minerais estratégicos, domínio de tecnologias sensíveis do ciclo do combustível nuclear, instituições de pesquisa reconhecidas internacionalmente e um corpo técnico altamente qualificado. Mais do que vantagens isoladas, esses ativos representam uma oportunidade histórica para transformar conhecimento científico em desenvolvimento econômico, competitividade industrial e soberania tecnológica.

Aproveitar essa oportunidade, entretanto, exige visão de longo prazo. Os temas que compõem esta edição evidenciam que o futuro do setor nuclear e das atividades associadas depende da construção de políticas públicas estáveis, de um ambiente regulatório moderno, da coordenação entre instituições e da capacidade de integrar governo, academia e iniciativa privada em torno de objetivos comuns.

Nesse contexto, ganha relevância o debate sobre a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos, que busca criar condições para que o Brasil deixe de ser apenas fornecedor de matérias-primas e avance na agregação de valor, na industrialização e no desenvolvimento de tecnologias de alta complexidade. Da mesma forma, o fortalecimento da Frente Parlamentar Mista da Tecnologia e Atividades Nucleares demonstra que o tema passa a ocupar espaço cada vez mais relevante na agenda nacional.

Esta edição também apresenta reflexões importantes sobre os desafios do setor nuclear brasileiro. O país já construiu, ao longo de décadas, competências que poucos

possuem. O desafio agora é transformar esse patrimônio científico, tecnológico e industrial em uma estratégia integrada capaz de ampliar sua contribuição para a segurança energética, a inovação e o desenvolvimento sustentável.

Ao mesmo tempo, as reportagens mostram que as aplicações da tecnologia nuclear vão muito além da geração de eletricidade. Na medicina nuclear, pesquisas nacionais buscam ampliar o acesso a terapias inovadoras para o tratamento do câncer. Na área ambiental, soluções desenvolvidas no Brasil demonstram o potencial da radiação ionizante para o tratamento de efluentes industriais e a preservação dos recursos hídricos. No agronegócio, a irradiação de alimentos desponta como ferramenta para aumentar a competitividade das exportações brasileiras e reduzir perdas ao longo da cadeia logística.

O olhar para o futuro também está presente no desenvolvimento de microrreatores nucleares e de tecnologias críticas associadas, iniciativa que reúne empresas, universidades e instituições de pesquisa em um esforço nacional voltado à próxima geração de sistemas nucleares. Projetos dessa natureza reforçam a capacidade brasileira de participar de um mercado global em rápida transformação, baseado em inovação, segurança e baixo carbono.

Em comum, todos esses temas demonstram que a tecnologia nuclear é uma plataforma de desenvolvimento. Seus benefícios alcançam a indústria, a saúde, a agricultura, o meio ambiente, a pesquisa científica e a formação de recursos humanos altamente especializados. Investir nesse ecossistema significa investir na capacidade do país de produzir conhecimento, gerar riqueza e responder aos desafios das próximas décadas.

Esperamos que esta edição da *Brasil Nuclear* contribua para ampliar esse debate e fortalecer a compreensão de que ciência, tecnologia e inovação são elementos indispensáveis para a construção de um Brasil mais competitivo, sustentável e preparado para as oportunidades do século XXI.

Boa leitura.

Carlos Seixas
Presidente da Aben

Não queremos ser apenas provedores de matéria-prima

Deputado Arnaldo Jardim

A busca por minerais como lítio, níquel, nióbio e terras raras, entre outros, é uma prioridade mundial, por serem essenciais na fabricação de produtos de alta tecnologia, como bateria do celular, do carro elétrico, o chip do computador, sistemas militares e também dos painéis solares e turbinas eólicas. Em maio passado, a Câmara dos Deputados aprovou projeto de lei que institui a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE). De autoria do deputado Zé Silva (União-MG), o Projeto de Lei 2780/24 foi aprovado na forma do substitutivo do relator, deputado Arnaldo Jardim (Cidadania-SP), e será enviado ao Senado. Em entrevista a Vera Dantas, da **Brasil Nuclear**, o deputado Jardim aborda os pontos principais da proposta, que define como “o despertador para transformarmos esse potencial geológico em riqueza industrial, agregando valor e tecnologia aqui dentro”.

O senhor foi relator do Projeto de Lei 2780/24, que institui a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos, recentemente aprovado pela Câmara dos Deputados. Trata-se de uma política prioritária para a economia brasileira?

Sem dúvida. Estamos diante de uma janela de oportunidade histórica. O mundo caminha para uma economia de baixo carbono, e essa transição energética é intensiva em minerais. O Brasil possui as reservas, a matriz energética limpa e o conhecimento técnico. O PL 2780/24 não é apenas uma política mineral; é uma política de desenvolvimento nacional. É prioritário porque destrava investimentos, agrega valor à nossa produção, gera empregos de qualidade e nos posiciona como protagonistas da neointustrialização verde, deixando para trás o papel de meros exportadores de matéria-prima.

Quais são os pontos principais do PL 2780/24?

O projeto se estrutura em três pilares para destravar o potencial mineral do país. Primeiro, cria-se um ambiente de segurança jurídica e previsibilidade, com a definição clara do que são minerais críticos e estratégicos.

Segundo, estruturam-se instrumentos financeiros robustos, como o Fundo Garantidor da Atividade Mineral e um programa de incentivos de R\$ 5 bilhões para beneficiamento e transformação.

Terceiro, estabelece-se uma governança moderna, com o Conselho Nacional para a Industrialização, garantindo que a política seja uma política de Estado, dialogando com o setor privado e coordenando ações para romper a barreira da exportação de *commodities* e avançar na cadeia de valor.

Qual a diferença entre minerais críticos e estratégicos e quais se enquadram em cada categoria?

A diferença está no risco e na relevância. Minerais críticos são aqueles essenciais para setores econômicos vitais, mas que apresentam alto risco de desabastecimento, seja por dependência externa ou instabilidade geopolítica. É o caso do cobalto, da grafita, do lítio e das terras raras.

Já os minerais estratégicos são aqueles que, embora possam ter menor risco de fornecimento, são fundamentais para o desenvolvimento nacional e a transição energética, como o cobre e o urânio. O projeto cria o arcabouço para que o governo defina e atualize essa lista periodicamente, com critérios técnicos.

O Brasil possui reservas relevantes de quais desses minerais?

O Brasil é um gigante adormecido nesse setor. Temos uma das maiores reser-



O lucro fácil da exportação de minério bruto não será mais a única via. O Estado brasileiro vai apoiar e recompensar quem industrializar e gerar riqueza complexa no nosso território

Arnaldo Jardim

vas mundiais de grafita e terras raras. Somos o quinto maior detentor de reservas de lítio e possuímos grandes depósitos de cobalto e níquel. Além disso, temos cobre e urânio em abundância. O PL 2780/24 é justamente o despertador para transformarmos esse potencial geológico em riqueza industrial, agregando valor e tecnologia aqui dentro.

Relatório da Agência Internacional de Energia projeta um crescimento de cerca de 40 vezes na demanda por lítio e entre 20 a 25 vezes na demanda por grafite, cobalto e níquel, devido à aceleração no ritmo da transição para energias limpas. O Brasil tem potencial para ser um importante provedor desses materiais no mercado mundial?

O Brasil não tem apenas potencial, ele tem o dever de ser um provedor global e qualificado. Além das reservas, temos uma vantagem competitiva inigualável: nossa matriz energética é 85% renovável. Podemos produzir o lítio e a grafita mais verdes do mundo. A demanda explosiva citada pela Agência Internacional de Energia é uma oportunidade que não podemos perder. Mas não queremos ser apenas um provedor de matéria-prima; queremos exportar sustentabilidade, tecnologia e produtos de alto valor agregado.

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de terras raras, mas sua exploração ainda é pequena. Com o projeto de lei essa situação poderá mudar?

Essa é a essência do projeto. As terras raras são um exemplo perfeito da nossa inércia regulatória e financeira. Temos a reserva, mas nos faltava uma política de Estado. O PL 2780/24 muda esse cenário ao oferecer os instrumentos certos: o Fundo Garantidor vai destravar o financiamento, e os incentivos ao beneficiamento vão tornar economicamente viável a transformação desses minerais no Brasil. Vamos sair da fase da pesquisa para a produção e, mais importante, para a cadeia de ímãs, catalisadores e outros componentes de alta tecnologia.

O que é o Fundo Garantidor da Atividade Mineral, como será formado e qual o valor previsto?

É um instrumento financeiro inovador e fundamental. O setor mineral tem projetos de longa maturação e risco elevado, o que dificulta o crédito. O Fundo Garantidor vai dar aval e garantias para facilitar o acesso a financiamentos privados e públicos. Ele será formado com recursos do Tesouro, participações em empreendimentos, royalties e outros instrumentos. A grande vantagem é o efeito multiplicador: não se trata de um gasto, mas de um investimento que alavanca múltiplas vezes seu valor em projetos estruturantes.

Também está prevista a criação do Programa Federal de Beneficiamento e Transformação de Minerais Críticos e Estratégicos, com incentivos federais de R\$ 5 bilhões ao

longo de cinco anos. Como as empresas poderão se beneficiar desse programa?

Esse é o coração da política de agregação de valor. As empresas poderão acessar esses incentivos para projetos que verticalizem a produção: sair da brita e do concentrado para produzir carbonato de lítio, grafita esferonizada e óxidos de terras raras. Os recursos serão direcionados para inovação, desenvolvimento tecnológico e implantação de plantas industriais. É o Estado fazendo a sua parte para reduzir o "Custo Brasil" e estimular a indústria nacional a competir globalmente com produtos de alto valor.

O PL 2780/24 também prevê a criação do Conselho Nacional para Industrialização de Minerais Críticos e Estratégicos. Qual o papel desse conselho e como será formado?

O Conselho é a instância de governança que faltava. Seu papel é coordenar, planejar e integrar as ações do governo e do setor produtivo. Não se trata de controle, mas de coordenação estratégica. Ele terá representação do governo, da indústria, da academia e de especialistas. Essa composição tripartite é a garantia de que as decisões serão técnicas, de longo prazo e blindadas contra oscilações políticas, criando um norte claro para o investidor.

O projeto de lei, se aprovado pelo Senado, terá o poder de garantir que o país não seja apenas exportador de matéria-prima?

Nenhuma lei, por si só, garante um resultado. Mas este projeto cria as condições objetivas e os mecanismos para quebrarmos essa maldição. Ao atrelar incentivos e garantias explicitamente à etapa de beneficiamento e transformação e, ao criar um conselho focado na industrialização, nós estamos virando a chave. Estamos dizendo ao mercado: o lucro fácil da exportação de minério bruto não será mais a única via. O Estado brasileiro vai apoiar e recompensar quem industrializar e gerar riqueza complexa no nosso território.

Analistas avaliam que o PL 2780/24 consegue equilibrar a atuação do governo, através de instrumentos de política industrial e da coordenação do conselho, e a pressão do setor privado contra o controle estatal. O senhor concorda?

Concordo plenamente. Foi exatamente o nosso objetivo. Buscamos um ponto de equilíbrio virtuoso. O Estado não será um minerador, não será um interventor. O Estado será um indutor e parceiro. Ele entra com instrumentos de política industrial, financiamento e coordenação estratégica. O setor privado entra com sua eficiência, inovação e capacidade de investimento. Não há controle estatal no projeto; o que há é uma sinalização clara do que o Brasil quer para o seu futuro, e um convite para que o setor privado lidere essa jornada conosco.

O interesse nacional prevalecerá e Angra 3 será concluída

Deputado Júlio Lopes



O Brasil já investiu bilhões de reais nesse empreendimento que representará um ativo estratégico para a segurança energética, a descarbonização da matriz elétrica e o fortalecimento da indústria nacional

Júlio Lopes

Em 2023, parlamentares comprometidos com o desenvolvimento científico, tecnológico e energético do país se uniram para criar a Frente Parlamentar Mista da Tecnologia e Atividades Nucleares. O objetivo de ampliar o debate sobre o papel estratégico da tecnologia nuclear para o desenvolvimento nacional avançou significativamente e a Frente tornou-se um importante foco de discussão no Congresso, aproximando o parlamento do setor produtivo, da comunidade científica e das instituições

públicas. À frente da iniciativa, o deputado Júlio Lopes defende a implantação no Rio de Janeiro da quarta usina nuclear brasileira, prevista no Plano Decenal de Energia 2031, e afirma ter absoluta certeza de que Angra 3 será concluída.

Como começou o seu envolvimento com a área nuclear?

Meu envolvimento com a energia nuclear surgiu da compreensão de que essa é uma área estratégica para a soberania nacional. Ao longo da minha atuação parlamentar percebi que o Brasil possui uma capacidade extraordinária em recursos minerais, pesquisa, medicina nuclear, geração de energia e desenvolvimento tecnológico, mas que esse potencial ainda é pouco conhecido pela sociedade e muitas vezes subaproveitado. Passei, então, a defender o fortalecimento do setor como uma política de Estado.

Como foi articulada a formação da Frente Parlamentar Mista da Tecnologia e Atividades Nucleares?

A Frente nasceu da união de parlamentares comprometidos com o desenvolvimento científico, tecnológico e energético do país; 190 deputados federais e 14 senadores se associaram. Contamos com o apoio de entidades do setor, cientistas, pesquisadores, universidades e representantes da indústria que entenderam a importância de criar um espaço de diálogo permanente no Congresso Nacional para discutir políticas públicas voltadas às atividades nucleares.

Quais eram os objetivos da Frente na época de sua criação, no início de 2023?

Nosso principal objetivo era ampliar o debate sobre o papel estratégico da tecnologia nuclear para o desenvolvimento nacional. Queríamos promover o conhecimento, combater preconceitos e a desinformação, o aperfeiçoamento do marco regulatório, incentivar incentivos e fortalecer áreas como geração de energia, medicina nuclear, agricultura, indústria, pesquisa e educação.

Esses objetivos foram alcançados?

Avançamos significativamente. A frente tornou-se, então, um importante foco de discussão no Congresso, aproximando o parlamento do setor produtivo, da comunidade científica e das instituições públicas. Contribuímos para colocar temas relevantes na agenda nacional fortalecendo o diálogo com poder executivo e ajudando a ampliar a percepção sobre a importância estratégica do setor nuclear. Ainda há muito trabalho pela frente, mas os resultados têm sido, até aqui, bastante positivos.

A trajetória percorrida nos quatro anos de existência da Frente manteve-se dentro das previsões iniciais ou houve alguma mudança de curso?

A missão permaneceu a mesma. Mas o cenário trouxe novos desafios e oportunidades. Questões como a segurança energética e a transição para uma economia de baixos carbonos, geopolítica de minerais energéticos e fortalecimento das cadeias produtivas tornaram o debate nuclear ainda mais relevante. A Fren-

te acompanhou essa evolução e ampliou o seu escopo de atuação, sem perder o seu propósito original.

Como o senhor avalia a situação atual da energia nuclear no Brasil?

O Brasil reúne todas as condições de expandir a sua participação no setor nuclear. Temos reservas expressivas de urânio, competência técnica reconhecida internacionalmente e uma matriz elétrica que pode se beneficiar ainda mais de uma fonte limpa, segura, de geração contínua. Entretanto, ainda enfrentamos desafios relacionados à previsibilidade regulatória, aos investimentos de longo prazo, à tomada de condições e decisões estruturantes para o futuro do setor.

Quais são os desafios do setor nuclear brasileiro?

Os principais desafios passam pela conclusão de projetos estratégicos, pelo fortalecimento institucional dos órgãos reguladores, pela modernização do ambiente legal e regulatório, pela formulação da mão de obra especializada e ampliação dos investimentos públicos e privados. Também é fundamental promover uma comunicação transparente com a sociedade, mostrando que a tecnologia nuclear vai muito além da geração de energia e está presente na indústria, na saúde, na agricultura e na pesquisa nacional.

O que o levou a requerer ao Executivo a transformação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) em Agência Reguladora Nuclear (ARN)?

Entendo que o Brasil precisa de uma estrutura regulatória cada vez mais sólida, independente e alinhada às melhores práticas internacionais. A transformação em agência reguladora fortalecerá a segurança jurídica, ampliará a autonomia institucional e contribuirá para criar um ambiente mais favorável ao desenvolvimento sustentável do setor tendo como absoluto compromisso a segurança nuclear e a proteção da população, que é o nosso grande objetivo.

Recentemente, o senhor declarou-se favorável a que a quarta usina nuclear brasileira, prevista no Plano Decenal de Energia 2031 seja implantada no Rio de Janeiro. Por que?

O Rio de Janeiro já concentra infraestrutura, conhecimento técnico, cadeia de fornecedores e profissionais altamente qualificados em torno do complexo nuclear brasileiro. Aproveitar essa base instalada pode reduzir custos, aumentar a eficiência nacional e acelerar a implementação do empreendimento. Além disso, a expansão fortalece o desenvolvimento regional e consolida o estado como um polo estratégico para o setor nuclear nacional.

O senhor acredita que a usina Angra 3 será finalizada?

Tenho absoluta certeza de que Angra 3 será concluída. O Brasil já investiu bilhões de reais nesse empreendimento que representará um ativo estratégico para a segurança energética, a descarbonização da matriz elétrica e o fortalecimento da indústria nacional. Não faz sentido abandonar uma obra com tamanho potencial econômico e tecnológico. Estou convencido de que prevalecerá o interesse nacional e de que Angra 3 será consolidada como um marco para o futuro do setor elétrico brasileiro.

Em sua opinião, qual o motivo do sucessivo adiamento de uma decisão sobre a retomada das obras da usina?

Na minha avaliação, o principal problema é a falta de organização e a vontade política para transformar Angra 3 em uma prioridade do Estado e do governo. O projeto já demonstrou sua relevância estratégica e conta com fundamentos sólidos, mas decisões importantes acabam sendo adiadas. O país precisa de coordenação, liderança e planejamento para avançar. Quando houver uma definição clara de que concluir Angra 3 é uma prioridade nacional, tenho convicção de que os obstáculos serão superados e que a obra então seguirá adiante.



AMAZUL

Tecnologia Nacional em Benefício da Sociedade

Irradiação de Alimentos - Microrreatores - USEXA (Ciclo do combustível nuclear)
Geração de Energia - Propulsão Nuclear - SMRs (Small Modular Reactors)

Acesse
nosso site:

Radiação, um meio rápido e seguro para o tratamento de efluentes

Vera Dantas

A cada minuto, quase quatro piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento são despejadas diretamente na natureza brasileira, com grandes danos para o meio ambiente e para a saúde da população. Por dia, são 5.442 piscinas. Segundo dados do Instituto Trata Brasil, esse volume já ultrapassou a marca de 1 milhão de piscinas olímpicas despejadas sem tratamento em 2026.

Isso decorre do fato de apenas metade do esgoto gerado no país passar por tratamento; a outra metade é descartada *in natura*, causando problemas ambientais e sanitários. Segundo o Atlas Esgotos da Agência Nacional de Águas (ANA), mais de 110 mil km de trechos de rio estão com a qualidade comprometida devido ao excesso de carga orgânica, sendo que em 83.450 km não é mais permitida a captação para abastecimento público devido à poluição e em 27.040 km a captação pode ser feita, mas requer tratamento avançado. O país, que se comprometeu a universalizar o acesso à água potável e ao saneamento até 2030, tem

avancado em ritmo lento. Nesse cenário, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen/Cnen), que apresenta um longo histórico no desenvolvimento de tecnologias de combate à poluição e preservação ambiental, desenvolveu e já está operando um sistema inovador para tratar efluentes industriais no local onde são gerados: trata-se da Unidade Móvel com Acelerador de Elétrons para Tratamento de Efluentes Industriais e sua Reutilização. Instalado em um caminhão, o acelerador de feixe de elétrons pode tratar efluentes industriais de fábricas, plantas petroquímicas, empresas de saneamento, removendo substâncias químicas tóxicas e possibilitando a reutilização da água.

A iniciativa, que tem como objetivo demonstrar a eficácia da tecnologia de irradiação na preservação do meio ambiente, além de prestar pequenos serviços, é fruto de um programa de pesquisa de tratamento de efluentes industriais, desenvolvido pelo Centro de Tecnologia das Radiações do Ipen, com o apoio da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Também participaram as empresas Truckvan Indústria e Comércio Ltda., especializada na fabricação de unidades móveis para as áreas de saúde, capacitação e treinamento profissional, eventos, serviços, defesa e segurança, e Nuclebras Equipamentos Pesados S.A. (Nuclep), responsável pela caixa de blindagem radiológica do acelerador.

O projeto teve custo de R\$ 7 milhões. Desse total, R\$ 1,2 milhões foram investidos pelo Ipen, 250 mil euros pela AIEA, por meio do projeto "IAEA TC Project BRA1035 - Mobile electron beam accelerator to treat and recycle industrial effluents", destinado ao treinamento dos engenheiros e tecnólogos do Ipen na empresa coreana EB-Tech, fabricante do acelerador industrial de elétrons. A Finep aportou recursos de US\$ 622 mil, por meio do Projeto "Implantação de unidades móveis visando disponibilizar a tecnologia gerada no Ipen para o setor produtivo e a sociedade/troca de equipamentos obsoletos". Cerca de R\$ 374 mil foram aportados pela Truckvan, por meio do "Acordo de Parceria para Realização de Atividades Conjuntas de Desenvolvimento Tecnológico" (desenho e especificação do chassi da Unidade Móvel, adequação do projeto às normas e legislação brasileiras de transporte de cargas, dentre outras).

O projeto, a construção e a operação da Unidade Móvel envolveu profissionais com formações multidisciplinares como engenheiros elétricos, eletrônicos e mecânicos, farmacêuticos, químicos, biólogos, físicos e projetistas, dentre outros.

A Unidade Móvel permite levar a tecnologia de irradiação por feixe de elétrons para diversos locais no Brasil e até mesmo na América Latina. Com cerca de 38 toneladas, está dentro do limite de peso para tráfego permitido pela Agência Nacional de Estradas Terrestres. A parte frontal do veículo conta com uma sala com equipamentos multimídia, notebooks e instrumentos analíticos, que viabilizam avaliar *in situ* os efluentes industriais antes e após a irradiação. "É um espaço onde a parte teórica e a prática podem ser expostas e demonstradas", explica a arquiteta Fabiana de Faria Lainetti, em sua dissertação de mestrado "Desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma unidade móvel de irradiação do Ipen para o tratamento de efluentes industriais", defendida em 2019 no Ipen/USP.



Foto: Bianca Wendhausen (Cnen)

Segundo Samir Somessari, gerente de Produtos e Serviços do Centro de Tecnologia das Radiações e responsável pela construção, integração e teste da Unidade Móvel, o objetivo do Ipen com o sistema é demonstrar a viabilidade técnica e econômica da tecnologia de irradiação por feixe de elétrons. Ele explica que, sem ter clientes diretos, o instituto cede a Unidade Móvel para a prestação de pequenos serviços por parte de empresas parceiras. Dependendo do tipo de efluente, a unidade tem capacidade para irradiar diariamente de 10 a 20 mil litros ou 30 metros cúbicos de resíduos. “Quando o volume de resíduos é muito grande, compensa financeiramente para a empresa alugar nossa unidade e deixar instalado no cliente por um mês ou dois. Já quando o volume é pequeno, isso não acontece, devido aos custos envolvidos. Além do aluguel do equipamento para transportar a unidade, são deslocados três profissionais, dois para fazer a operação e um técnico de radioproteção para acompanhar o sistema”, explica.

Dentre os experimentos realizados pela Unidade Móvel, destacam-se o tratamento de efluentes da indústria têxtil, como tintas e corantes, e da indústria farmacêutica, como antibióticos, anti-inflamatórios e outros fármacos. “A técnica de radiação por feixe de elétrons possibilita a degradação total do material contaminante”, afirma Somessari. Na área têxtil, as experiências foram realizadas através de uma empresa parceira do Ipen, com amostras de efluentes cedidas pela Escola Senai de Indústria Têxtil (SP).

As demonstrações têm gerado impacto positivo junto ao público-alvo, formado por empresários e técnicos de diversas indústrias, além de estudantes. Ao ver a aplicação na prática da tecnologia, as pessoas não só conhecem essa nova alternativa para o tratamento de efluentes, como têm a oportunidade de compro-

A energia ionizante quebra moléculas complexas, facilitando a biodegradação ou permitindo o reuso da água, sem deixar resíduos radioativos

var a sua segurança, desmistificando a possibilidade de riscos de radiação. “A irradiação está isolada em uma câmara blindada, só atingindo o material a ser tratado, sem qualquer risco para os operadores”, garante Somessari.

Financiamento de projetos de inovação com prazos e taxas de juros atraentes para empresas brasileiras

Taxas e condições* a partir de:

Taxas a partir de TR + 2% a.a.

Participação da Finep Até 100%**

Até 192 meses para pagar

Até 48 meses de carência

Confira todas as nossas oportunidades de apoio:

finep.gov.br

* Variam de acordo com a linha de ação na qual o projeto for enquadrado

** Para projetos das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste





A afirmação de Samir Somessari é respaldada por 41 anos experiência com instalações radioativas. Formado em Engenharia Elétrica, com mestrado e doutorado em Ciências Nucleares, ele trabalha desde 1985 no Ipen, onde ingressou como técnico em eletrônica. Ele é responsável pela gestão do parque de irradiação do Centro de Tecnologia das Radiações (aceleradores, fontes de cobalto, fontes de pesquisa) e pelo suporte operacional da Unidade Móvel. Entre suas atividades está a elaboração de projetos e fornecimento de suporte técnico para empresas que possuem aceleradores de grande porte instalados no chão de fábrica e, ainda, o treinamento de técnicos da AIEA.

Aplicações

Os sistemas de feixe de elétrons são um tipo de acelerador de partículas. Eles produzem radiação ionizante para modificar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos materiais. Os feixes de elétrons são comumente usados na indústria, medicina e pesquisa científica. Juntamente com a irradiação gama e de raios X, os feixes de elétrons são amplamente utilizados para esterilizar produtos médicos, garantir a segurança de alimentos e preservar artefatos culturais. Como os feixes de elétrons podem tornar os materiais mais duráveis em temperaturas extremas ou resistentes a produtos químicos, eles também são usados nas indústrias automotiva e aeroespacial. Há um crescente interesse na aplicação de feixes de elétrons para o tratamento de águas residuais e lodo, gases e materiais sólidos. A estrutura também permite estudar o reaproveitamento de resíduos plásticos, controle de odores e tratamentos ligados a gases que afetam o clima. A energia ionizante quebra moléculas complexas, facilitando a biodegradação ou permitindo o reuso da água, sem deixar resíduos radioativos.

A Unidade Móvel facilita o acesso a uma tecnologia que antes dependia de estruturas permanentes. Ela funciona como um laboratório móvel, dotado de equipamentos analíticos, e também como um acelerador de elétrons. Essa unidade se desloca até empresa, que pode ser uma indústria química, petroquímica ou de saneamento, por exemplo, onde faz a coleta e análise de efluentes e, por fim, aplica elétrons que vão degradar as toxinas e compostos orgânicos. Trata-se de uma tecnologia alternativa aos processos convencionais.



Além do acelerador de elétrons, a unidade móvel conta com um laboratório que permite analisar os efluentes antes e depois da irradiação

Dentre os processos de tratamento de efluentes industriais contendo compostos orgânicos, destacam-se: Adsorção em carvão ativo e resinas, Biodegradação (aeróbia e anaeróbia), Incineração e Processo de oxidação avançada. A irradiação por feixe de elétrons utilizada na Unidade Móvel é classificada entre as tecnologias de oxidação avançada.

Segundo Wilson Calvo, diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) e que coordenou a realização do projeto da Unidade Móvel no Ipen, "a grande vantagem do tratamento por radiação ionizante (feixe de elétrons) é ser um processo homogêneo sem efeito de superfície ou concentração, aplicável tanto para substratos polares quanto não polares, cujos efeitos de degradação independem do pH do efluente industrial. Nesse sentido, a tecnologia propicia um amplo espectro de utilização no mercado, tais como, no tratamento de efluentes provenientes das indústrias têxteis, farmacêuticas, químicas, petroquímicas, de fábricas de papel e celulose, de aterros sanitários, de estações de tratamento de efluentes domésticos e industriais, dentre outros". Ele afirma que estudos realizados em diversos setores produtivos comprovam que o tratamento por radiação ionizante oferece benefícios tecnológicos e econômicos em relação às técnicas convencionais de tratamento de poluentes recalcitrantes.

O setor nuclear brasileiro: o que falta para deslanchar?

Entre capacidades existentes e oportunidades perdidas

Leonam dos Santos Guimarães*

Poucos temas despertam tanto consenso entre especialistas e tanta perplexidade entre observadores externos quanto o potencial não realizado do setor nuclear brasileiro. Ao longo das últimas décadas, o Brasil construiu competências que o colocam em uma posição singular entre os países em desenvolvimento. Domina tecnologias sensíveis do ciclo do combustível nuclear, opera usinas nucleares há mais de quarenta anos, desenvolve um submarino de propulsão nuclear, possui reservas significativas de urânio, mantém centros de pesquisa de excelência e conta com um corpo técnico altamente qualificado.

Apesar disso, a participação da energia nuclear na matriz elétrica brasileira permanece modesta, a expansão do parque nuclear avança lentamente, projetos estratégicos enfrentam atrasos recorrentes e muitas capacidades industriais operam abaixo de seu potencial.

A pergunta surge naturalmente: o que falta ao setor nuclear brasileiro para finalmente deslanchar?

A resposta não está na falta de recursos naturais, de conhecimento técnico ou de competências industriais. O principal desafio reside na capacidade de transformar ativos dispersos em uma estratégia nacional integrada e sustentada ao longo do tempo.

Em outras palavras, o problema do setor nuclear brasileiro é menos tecnológico e mais institucional.

O paradoxo nuclear brasileiro

O Brasil vive um paradoxo singular. De um lado, é um dos poucos países do mundo que reúne simultaneamente reservas de urânio, tecnologia de enriquecimento isotópico desenvolvida nacionalmente, capacidade de fabricação de combustível, operação de usinas nucleares, programas avançados de pesquisa e desenvolvimento, produção de radioisótopos e um programa de propulsão nuclear naval. De outro, essa impressionante acumulação de capacidades não se converteu em uma indústria nuclear plenamente integrada nem em um vetor central de desenvolvimento nacional.

A explicação está na ausência de uma visão estratégica unificada.

Historicamente, o setor nuclear brasileiro evoluiu por iniciativas setoriais relativamente independentes. A geração elétrica desenvolveu-se em torno das usinas de Angra. O ciclo do combustível consolidou-se em torno da Indústria Nucleares Brasileiras (INB) e do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). A pesquisa nuclear distribuiu-se entre Ipen, CDTN, IEN e outros institutos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen). A propulsão naval avançou sob liderança da Marinha. O Reator Multipropósito (RMB) tornou-se um projeto estruturante para radioisótopos e pesquisa.

Todos esses programas são relevantes. O problema é que, frequentemente, avançaram mais como projetos paralelos do que como componentes de uma estratégia nacional única.

O primeiro desafio: transformar energia nuclear em política de Estado

A principal lição oferecida pelos países que construíram programas nucleares bem-sucedidos é simples: energia nuclear não prospera quando tratada como política de governo. Ela exige visão de Estado.

Os ciclos de planejamento nuclear são medidos em décadas. Uma usina nuclear pode levar 15 anos entre concepção e operação. Uma instalação de enriquecimento demanda décadas para atingir maturidade tecnológica. A formação de especialistas pode consumir toda uma carreira profissional. Nenhum desses processos é compatível com ciclos políticos de quatro anos.

França, Estados Unidos, Rússia, China e Coreia do Sul alcançaram sucesso porque mantiveram objetivos estratégicos relativamente estáveis independentemente das alternâncias políticas. No Brasil, entretanto, cada mudança de governo frequentemente traz revisões de prioridades, redefinições de investimentos e alterações de governança. O resultado é previsibilidade reduzida, aumento dos riscos percebidos pelos investidores e dificuldade de retenção de talentos.

Portanto, o primeiro passo para o fortalecimento do setor nuclear é estabelecer um pacto nacional que reconheça a energia nuclear como componente permanente da estratégia brasileira de desenvolvimento, segurança energética, inovação tecnológica e soberania nacional.

O segundo desafio: superar a fragmentação institucional

Outro problema estrutural é a fragmentação institucional. A energia nuclear é simultaneamente uma questão energética, industrial, científica, tecnológica, ambiental, estratégica e de defesa. Poucos setores possuem interfaces tão amplas. Entretanto, no Brasil, a governança nuclear continua distribuída entre diversos ministérios, empresas estatais, órgãos reguladores, institutos de pesquisa e programas estratégicos.

Ministérios de Minas e Energia (MME), Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e da Fazenda, Casa Civil, Gabinete de Segurança Institucional (GSI), Cnen, Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), ENBPar, Eletronuclear, INB, Nuclep, Amazul, Marinha e BNDES possuem responsabilidades importantes, mas nem sempre operam dentro de uma arquitetura de coordenação suficientemente robusta. A consequência é a perda de sinergias e a dificuldade de execução.

Por essa razão, seria desejável fortalecer o papel do Conselho de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (CDPNB) ou criar uma estrutura equivalente capaz de coordenar, em nível estratégico, os diversos componentes do setor. O objetivo não seria criar mais burocracia, mas aumentar a coerência das decisões.

Angra 3: muito mais que uma usina

Poucos projetos simbolizam melhor os desafios do setor nuclear brasileiro do que Angra 3. O debate frequentemente se concentra em custos, cronogramas ou alternativas energéticas. Contudo, a relevância estratégica do empreendimento transcende a geração de eletricidade.

Angra 3 representa a preservação de competências nacionais em engenharia nuclear, gerenciamento de grandes projetos, fabricação de componentes pesados, qualificação de fornecedores e operação de instalações complexas. Sua conclusão sinalizaria que o Brasil é capaz de executar projetos de infraestrutura de longo ciclo e elevada intensidade tecnológica.

Seu abandono, por outro lado, produziria efeitos que ultrapassariam largamente o setor elétrico. Parte significativa da cadeia produtiva construída ao longo de décadas seria desmobilizada. Competências raras poderiam ser perdidas. A credibilidade institucional sofreria impacto relevante.

A decisão sobre Angra 3 é, portanto, uma decisão sobre o futuro do ecossistema nuclear brasileiro.

A necessidade de modernização regulatória

O marco legal nuclear brasileiro foi concebido em um contexto completamente diferente do atual. Quando muitas das normas vigentes foram elaboradas, não existiam SMRs, microrreatores, data centers de inteligência artificial, mercados de carbono ou projetos de produção de hidrogênio de baixa emissão em escala industrial. Hoje, a realidade é outra.

Novas tecnologias nucleares estão ampliando significativamente o leque de aplicações da energia nuclear. Pequenos reatores modulares podem atender regiões remotas, polos industriais, mineração, dessalinização, produção de hidrogênio e centros de processamento de dados. Essas transformações exigem estruturas regulatórias mais modernas, flexíveis e adaptáveis.

Da mesma forma, a regulamentação da Lei nº 14.514/2022 pode representar uma oportunidade histórica para dinamizar a mineração de urânio e atrair investimentos privados, preservando simultaneamente o controle estratégico nacional sobre recursos nucleares.

No Brasil,
cada mudança
de governo,
frequentemente,
traz revisões
de prioridades,
redefinições de
investimentos
e alterações de
governança

Financiamento: condição necessária, mas não suficiente

É comum afirmar que o principal problema do setor nuclear é a falta de recursos financeiros. A realidade é mais complexa. O financiamento é certamente indispensável. Entretanto, investidores tendem a evitar projetos caracterizados por instabilidade regulatória, indefinição estratégica e incerteza institucional.

Em outras palavras, o capital não foge necessariamente da energia nuclear. Ele foge da imprevisibilidade. Por isso, a participação do BNDES e de mecanismos estruturados de financiamento de longo prazo possui importância estratégica.

A experiência internacional demonstra que praticamente todos os programas nucleares relevantes contaram com alguma combinação de garantias soberanas, bancos de desenvolvimento, apoio estatal ou instrumentos específicos de financiamento.

A energia nuclear é uma infraestrutura estratégica. Consequentemente, exige instrumentos financeiros compatíveis com sua natureza.

A nova oportunidade: energia nuclear e a economia do século XXI

Talvez a maior mudança em curso seja o surgimento de novas demandas

capazes de redefinir completamente a posição estratégica da energia nuclear.

Durante décadas, o setor foi percebido principalmente como fornecedor de eletricidade. Hoje, essa visão tornou-se insuficiente. A revolução digital, a inteligência artificial, a produção de hidrogênio de baixa emissão, os combustíveis sintéticos, a dessalinização, a eletrificação industrial e os grandes complexos de processamento de dados estão criando uma demanda crescente por energia firme, confiável e livre de emissões.

Nesse contexto, a energia nuclear deixa de ser apenas uma fonte de geração e passa a atuar como infraestrutura habilitadora da nova economia. Os países que compreenderem essa transformação poderão posicionar suas indústrias nucleares como elementos centrais do próximo ciclo de desenvolvimento tecnológico.

O Brasil reúne condições excepcionais para participar desse movimento.

O desafio silencioso: pessoas e conhecimento

Existe, porém, um ativo ainda mais valioso que as instalações físicas: o conhecimento acumulado. Competências nucleares não são construídas rapidamente. Projetistas, operadores, inspetores, especialistas em segurança, engenheiros de sistemas, licenciadores e gestores de grandes empreendimentos levam décadas para atingir maturidade profissional.

A perda desses profissionais representa um dos maiores riscos estratégicos para qualquer programa nuclear.

O mesmo vale para a cadeia industrial. Uma vez desmobilizados fornecedores especializados, reconstruir capacidades produtivas pode exigir muitos anos e investimentos elevados.

Por essa razão, continuidade de projetos não é apenas uma questão econômica. É uma questão de preservação de capital humano e tecnológico.

Um plano de ação para a próxima década

Uma estratégia nuclear nacional poderia ser estruturada em três horizontes complementares.

No curto prazo, seria necessário consolidar a governança do setor, definir o futuro de Angra 3, regulamentar plenamente a Lei nº 14.514/2022, fortalecer a ANSN e acelerar o RMB.

No médio prazo, o foco deveria recair sobre a expansão do ciclo do combustível, a modernização da Nuclep, o fortalecimento da INB, a preparação regulatória para SMRs e a criação de instrumentos financeiros dedicados.

No longo prazo, o Brasil poderia consolidar uma indústria nuclear integrada, capaz de apoiar novas usinas, produção de hidrogênio, aplicações industriais, radioisótopos, exportação de bens e serviços especializados e suporte energético para novos polos tecnológicos.

Conclusão

O setor nuclear brasileiro não carece de recursos naturais, conhecimento técnico ou potencial de mercado. O país já construiu, ao longo de décadas, uma base tecnológica e industrial que poucos países possuem. O desafio agora é transformar essa base em uma estratégia nacional coerente.

Os sete elementos fundamentais — política de Estado, coordenação institucional, conclusão de Angra 3, modernização regulatória, financiamento estruturado, integração com as novas demandas econômicas e preservação de talentos e capacidades industriais — não são iniciativas independentes. Eles formam uma arquitetura integrada de governança.

Juntos, constituem os pilares de uma estratégia nuclear capaz de posicionar o Brasil não apenas como produtor de energia, mas como uma potência tecnológica, industrial e científica no século XXI.

A questão fundamental, portanto, não é se o Brasil possui condições para desenvolver plenamente seu setor nuclear.

A questão é se o país está disposto a transformar essas capacidades em um projeto nacional de longo prazo, compatível com suas ambições de soberania, desenvolvimento e protagonismo internacional.

*Leonam Guimarães é assessor da Diretoria Executiva e coordenador do Comitê de C&T da Amazul.



A ENERGIA QUE MOVE O BRASIL

Com operações em Santa Catarina e no Ceará, a Diamante Energia fortalece a Segurança Energética do sistema elétrico nacional, impulsionando o desenvolvimento do país e garantindo eletricidade contínua para milhões de lares, indústria e comércio.

diamanteenergia.com
@diamante.energia
Diamante Geração de Energia

DIAMANTE
GERAÇÃO DE ENERGIA

Desenvolvimento e Testes de Tecnologias Críticas Aplicáveis a Microrreatores Nucleares

Adolfo Braid

Os microrreatores nucleares (MRNs) emergem como uma das tecnologias mais promissoras da nova fronteira energética global. Compactos, modulares, transportáveis e capazes de operar de forma autônoma e contínua, esses sistemas representam uma ruptura paradigmática em relação à geração nuclear convencional, abrindo oportunidades inéditas para a descarbonização de sistemas energéticos isolados, operações industriais remotas e infraestruturas críticas que requerem energia firme e contínua.

Diferentemente das grandes usinas nucleares, que demandam elevados investimentos de capital e longos períodos de implantação, os MRNs são concebidos para fabricação seriada em ambiente industrial controlado, transporte facilitado e instalação simplificada, reduzindo significativamente prazos, riscos de construção e custos associados — atributos que os posicionam como alternativa concreta e economicamente competitiva para a geração distribuída de energia limpa.

No contexto internacional, o interesse pelos MRNs cresce de forma acelerada. Não existe atualmente uma contagem oficial e universalmente aceita do número de projetos de microrreatores nucleares em desenvolvimento. A partir das bases de dados da IAEA (ARIS), da OECD-NEA (SMR Dashboard) e da World Nuclear Association (SMR Design Database), é possível identificar algumas dezenas de conceitos ativos, sendo a maior concentração observada nos Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Rússia e China.

No Brasil, o contexto é particularmente favorável ao aproveitamento dessa tecnologia. A população nacional distribui-se em 5.570 municípios, dos quais aproximadamente 68% possuem menos de 20 mil habitantes — perfil demográfico que se alinha com precisão à faixa de potência de 1 a 10 MWe característica dos MRNs. Uma única unidade de 5 MWe é capaz de atender à demanda de energia elétrica de municípios entre 5 mil e 10 mil habitantes; uma combinação de uma a quatro unidades poderia abastecer até 68% dos municípios brasileiros — um total de 3.787 municípios. Além disso, segmentos de alta intensidade energética como *data centers* e infraestrutura de inteligência artificial, mobilidade elétrica, mineração e processamento mineral, operações *offshore* no pré-sal, produção de hidrogênio e calor de processo industrial, entre outros, exigem energia segura, contínua, de baixo carbono e, muitas vezes, geograficamente descentralizada. O

MRN figura entre as poucas tecnologias capazes de atender simultaneamente a todos esses requisitos em localidades remotas ou de difícil acesso à rede elétrica.

Entre os diversos conceitos em desenvolvimento mundial, destacam-se os microrreatores refrigerados por *heat pipes*, que combinam simplicidade operacional, elevado nível de segurança passiva e reduzida necessidade de infraestrutura de apoio. Inserido nessa categoria, o microrreator nuclear Harpia™ (*Heat-pipe Advanced Reactor for Power and Industrial Applications*), da Terminus Energia, consiste em um microrreator brasileiro projetado para produzir aproximadamente 5 MWe de energia elétrica de forma contínua, empregando transferência de calor totalmente passiva e ciclos de combustível de longa duração (superiores a 10 anos), com foco em aplicações distribuídas, sistemas isolados e microrredes.

Em fevereiro de 2025, a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) aprovou, com nota máxima (100 pontos), o projeto “Desenvolvimento e Testes de Tecnologias Críticas Aplicáveis a Microrreatores Nucleares”. O projeto é executado por um consórcio de amplitude nacional que reúne empresas, universidades e centros de pesquisa de diferentes regiões do país.

No âmbito empresarial, participam três organizações: a Diamante atua como empresa líder perante a Finep, sendo responsável pela coordenação administrativa, financeira e contratual do projeto; a INB – Indústrias Nucleares do Brasil lidera as atividades relacionadas à fabricação das varetas combustíveis destinadas à Unidade Crítica. A Terminus P&D em Energia S/A é a detentora do conceito tecnológico do microrreator Harpia™ e responsável pela liderança técnica e científica do projeto, coordenando a integração entre os pacotes de trabalho e a evolução do nível de maturidade tecnológica (TRL).

O projeto conta com dez Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) formalmente contratadas, cobrindo um espectro abrangente de competências nucleares e tecnológicas: IEN/Cnen – Instituto de Engenharia Nuclear (Rio de Janeiro); Ipen/Cnen – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (São Paulo); DDNM/MB – Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha do Brasil (São Paulo); Amazul – Amazônia Azul Tecnologias de Defesa (São Paulo); CNPEM – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (Campinas-SP); Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações (Santa Rita do Sapucaí-MG); UFC – Universidade Federal do Ceará; UFMG – Universidade Federal de

Minas Gerais; Unicamp – Universidade Estadual de Campinas; UFABC – Universidade Federal do ABC.

Integram ainda o consórcio, em regime de colaboração *pro bono*, a Atech — empresa do Grupo Embraer especializada no desenvolvimento e na integração de sistemas críticos de comando, controle, automação e gestão para os setores de defesa e infraestrutura — e o CRCN-NE/Cnen, unidade da Cnen sediada em Recife. A participação dessas instituições amplia a capilaridade regional e multissetorial do projeto, agrega competências em engenharia de sistemas, automação, segurança tecnológica e pesquisa aplicada, e reforça a articulação entre empresas, instituições científicas e tecnológicas e o setor nuclear nacional. No conjunto, as empresas e instituições participantes estão distribuídas em seis estados da Federação, evidenciando o alcance nacional do consórcio e sua capacidade de mobilizar competências técnicas, científicas e industriais em diferentes regiões do País.

O orçamento total do projeto é de R\$ 50 milhões, equivalente a aproximadamente US\$ 10 milhões, estruturado como subvenção econômica não reembolsável. A Finep aporta 60% do total (R\$ 30 milhões), e a contrapartida do consórcio empresarial Diamante/INB/Terminus corresponde aos 40% restantes (R\$ 20 milhões). O prazo de execução é de três anos, com início em 2025 e conclusão prevista para 2028.

O licenciamento da instalação nuclear do projeto, a Unidade Crítica, está sendo conduzido junto à Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), em conformidade com a legislação nuclear brasileira, com a Norma ANSN 1.04 e com os compromissos internacionais do país em matéria de salvaguardas e não proliferação nuclear, sob supervisão da AIEA.

Pacotes de Trabalho

O projeto está estruturado em nove Pacotes de Trabalho (PTs), organizados de forma a cobrir o espectro completo das tecnologias críticas requeridas para o desenvolvimento de microrreatores nucleares. A estrutura reflete uma decomposição lógica do trabalho técnico em frentes especializadas e interdependentes, permitindo o avanço paralelo das atividades e a integração progressiva dos resultados ao longo dos três anos de execução.

PT	Descrição
PT-1	Unidade Crítica (UCri) — Projeto de engenharia, fabricação, licenciamento e operação
PT-2	Transferência de calor — Efeitos separados: caracterização termohidráulica de <i>heat pipes</i>
PT-3	Transferência de calor — Efeitos integrados: combustível nuclear / <i>heat pipes</i> / sistema de conversão de potência
PT-4	Sistemas de proteção e controle da Unidade Crítica
PT-5	Projeto do reator, blindagem biológica e sistema de contenção
PT-6	Desenvolvimento de materiais especiais (grafita, BeO, B ₄ C), <i>heat pipes</i> e combustível nuclear
PT-7	Estudos de sustentabilidade, ciclo de vida e aceitabilidade dos microrreatores nucleares como vetor de microgeração distribuída de energia
PT-8	Sistema de Garantia da Qualidade
PT-9	Gerenciamento do Projeto

Todos os pacotes de trabalho possuem relevância estratégica e contribuem de forma integrada para o alcance dos objetivos do projeto. Nesse conjunto, o PT-1, referente à Unidade Crítica e apresentado em detalhe na seção seguinte, configura-se como o principal entregável experimental. O PT-6, por sua vez, sobressai pela elevada complexidade técnica e por sua contribuição



Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares

Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares

40.107

Inspeções realizadas na Argentina e no Brasil entre 1992 e 2025

75

Instalações sob salvaguardas

127

Cursos de capacitação técnica para inspetores entre 1992 e 2025

VERIFICANDO O USO PACÍFICO DA ENERGIA NUCLEAR NA ARGENTINA E NO BRASIL
VERIFICANDO EL USO PACÍFICO DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN ARGENTINA Y BRASIL

<http://www.abacc.org>

direta para a soberania tecnológica nacional, ao abranger o desenvolvimento e a qualificação de materiais de grau nuclear — grafita, óxido de berílio (BeO) e carbeto de boro (B₄C) — destinados, às funções de moderação, reflexão e absorção neutrônica no núcleo do reator, além do desenvolvimento de tubos de calor *heat pipes* e de combustíveis nucleares avançados. O domínio dessas tecnologias no País é fundamental para assegurar a autonomia do programa, reduzir a dependência de fornecedores externos e mitigar riscos associados a restrições e controles de exportação.

Unidade Crítica — Infraestrutura Central do Projeto

A Unidade Crítica (UCri) é uma instalação nuclear de potência zero, projetada para operar com potência da ordem de 100 W(t). Concebida como uma configuração experimental representativa do núcleo do microrreator Harpia™, a UCri destina-se à realização de experimentos de física de reatores para a verificação e validação de modelos neutrônicos, dados nucleares e metodologias computacionais empregados no projeto.

O núcleo da UCri é moderado por grafita, disposto em rede hexagonal de canais de combustível representativa do conceito do Harpia™. O combustível é composto

por UO₂ enriquecido a 4,25% em ²³⁵U, na forma de varetas combustíveis com revestimento em liga de zircônio M5™. A potência extremamente baixa de operação elimina efeitos térmicos significativos, permitindo medições neutrônicas de alta precisão. O controle de reatividade é realizado por tambores rotativos e placas de controle e segurança, complementados por tanques de água borada que asseguram capacidade independente de desligamento do reator.

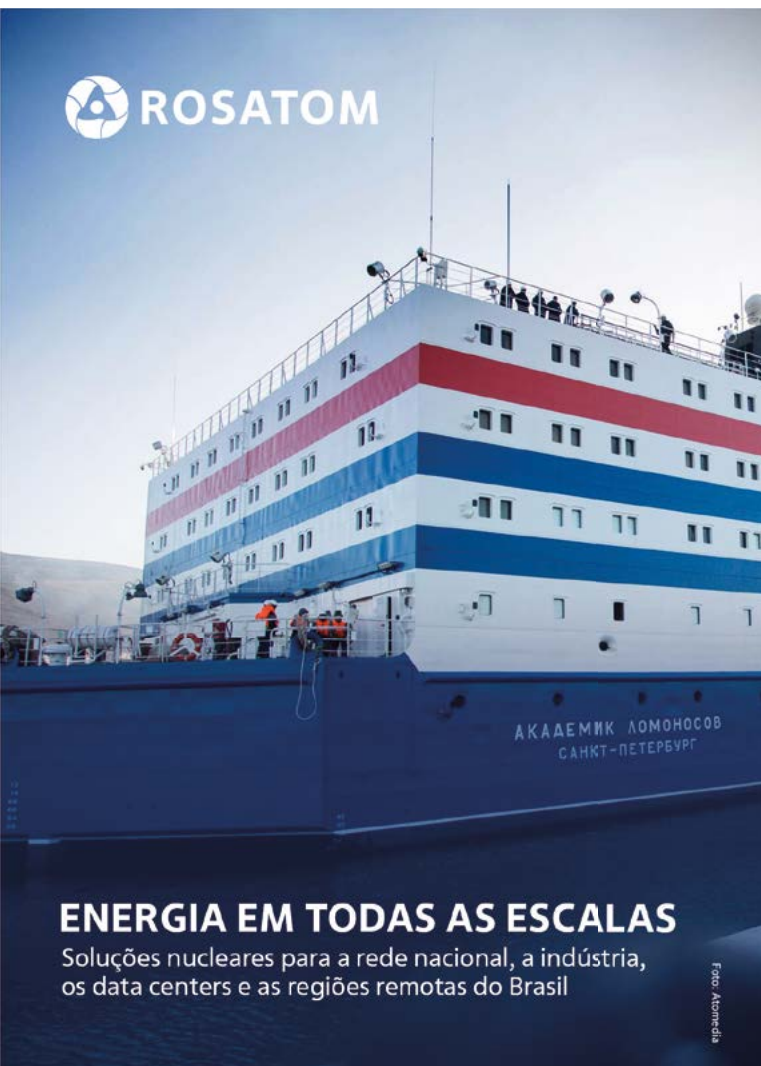
A instalação fornecerá dados experimentais para a verificação e validação de metodologias neutrônicas, a calibração de constantes nucleares e a validação comparativa de códigos computacionais aplicados ao Harpia™. Os resultados gerados poderão ser submetidos ao International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP), da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Agência de Energia Nuclear (OCDE/NEA), contribuindo ao acervo internacional de benchmarks de criticidade e ampliando a visibilidade científica do programa nuclear brasileiro. A fabricação do combustível será conduzida pela INB, assegurando a integração da cadeia produtiva nacional, desde a fabricação das pastilhas de UO₂ até a montagem das varetas combustíveis.

Microrreator Harpia™

O Harpia™ (Heat-pipe Advanced Reactor for Power and Industrial Applications) será o produto comercial resultante. Concebido pela Terminus P&D em Energia S/A com base nos princípios de *Safe-by-Design* e *Defense-in-Depth*, o microrreator encontra-se atualmente em desenvolvimento e tem sua primeira unidade comercial prevista para entrar em operação em 2033, após as etapas de demonstração experimental, qualificação tecnológica e implantação da planta piloto. O sistema está sendo concebido para produzir aproximadamente 5 MWe de energia elétrica limpa, contínua e despachável, em uma planta compacta com dimensões compatíveis com um contêiner padrão de 40 pés.

Entre os principais diferenciais tecnológicos do Harpia™ destaca-se o sistema de remoção de calor totalmente passivo, baseado em *heat pipes* — dispositivos que operam por meio dos fenômenos de evaporação, condensação e capilaridade, sem a necessidade de partes móveis. Essa arquitetura elimina a utilização de bombas de circulação e simplifica os sistemas auxiliares da planta, contribuindo simultaneamente para o aumento da confiabilidade operacional e segurança da instalação.

O projeto prevê a utilização de combustível Haleu (*High-Assay Low-Enriched Uranium*), com enriquecimento de até 19,75% em ²³⁵U, possibilitando ciclos operacionais superiores a dez anos. O núcleo será fabricado e selado em ambiente industrial controlado, eliminando a necessi-



ENERGIA EM TODAS AS ESCALAS

Soluções nucleares para a rede nacional, a indústria, os data centers e as regiões remotas do Brasil

dade de operações de abastecimento e manuseio de combustível no local de instalação. Adicionalmente, o reator não empregará água em funções operacionais ou de segurança, característica que amplia sua aplicabilidade em regiões remotas, ambientes áridos, ilhas, instalações industriais isoladas e operações offshore.

O sistema foi concebido para transporte por modais convencionais e instalação simplificada após a preparação do sítio, favorecendo sua utilização em aplicações distribuídas e em sistemas elétricos isolados. A vida útil de projeto da planta é estimada em 60 anos, mediante a substituição programada do combustível ao final de cada ciclo operacional, sempre realizada em ambiente industrial controlado.

Sob a perspectiva da segurança nuclear, o Harpia™ incorpora mecanismos intrínsecos e passivos de mitigação de acidentes, incluindo coeficientes de reatividade negativos, remoção passiva do calor de decaimento por meio dos próprios *heat pipes* e múltiplas barreiras físicas de confinamento dos materiais radioativos. Essas características visam atender aos mais elevados padrões internacionais de segurança aplicáveis a reatores avançados, reduzindo a dependência de sistemas ativos e da intervenção humana para a mitigação de eventos postulados.

Marco Temporal e Níveis de Maturidade Tecnológica

O objetivo central do Projeto Finep é elevar o Nível de Maturidade Tecnológica (Technology Readiness Level – TRL) do microrreator Harpia™ do TRL-3, alcançado em 2023 por meio da validação da prova de conceito analítica e dos estudos preliminares de viabilidade, para o TRL-6, correspondente à demonstração da tecnologia em ambiente relevante e à validação integrada de seus principais subsistemas. Essa evolução tecnológica, prevista para ser concluída até 2028, constituirá um marco fundamental para a mitigação dos riscos técnicos associados ao empreendimento e para o avanço rumo às etapas subsequentes de desenvolvimento. Atingido esse objetivo, estarão estabelecidas as bases técnicas e experimentais necessárias para a implantação da planta piloto (TRL-7/8), prevista para 2030, e para a entrada em operação da primeira unidade comercial do Harpia™ (TRL-9), planejada para 2033.

O projeto Finep “Desenvolvimento e Testes de Tecnologias Críticas Aplicáveis a Microrreatores Nucleares” representa um divisor de águas para o programa nuclear brasileiro. Pela primeira vez, um esforço nacional coordenado — com financiamento público expressivo, participação de empresas privadas inovadoras e envolvimento das principais instituições de pesquisa do país — se dedica sistematicamente ao desenvolvimento de tecnologias para reatores nucleares de nova geração.

A construção e operação da Unidade Crítica no IEN/Cnen reativará competências experimentais em física de reatores que o Brasil não exercia desde a segunda carga do reator Ipen/MB-01, e criará uma plataforma nacional permanente para qualificação de projetos neutrônicos. O desenvolvimento de *heat pipes*, materiais nucleares avançados e sistemas de controle autônomos fortalecerá a base industrial de fornecedores nacionais.

Do ponto de vista estratégico, o Harpia™ é um produto brasileiro para um mercado global em formação. O Brasil tem as condições — domínio do ciclo do combustível nuclear, parque industrial, capital humano e arcabouço regulatório — para ocupar uma posição de destaque nesse mercado.

O projeto Finep é, portanto, muito mais do que um programa de P&D: é o ponto de partida de uma nova indústria nuclear brasileira, alinhada com os imperativos da transição energética justa, da soberania tecnológica e do desenvolvimento sustentável.

Adolfo Braid é diretor da Terminus P&D em Energia S/A e Coordenador Executivo do Projeto Finep.



**Proven nuclear technology
for clean, reliable energy**

Learn more at: www.westinghousenuclear.com/ap300

Microesferas de vidro: impactos e desafios para ampliar o acesso à radioembolização hepática no Brasil

Pamela Alves

A radioembolização hepática vem se consolidando, nas últimas décadas, como uma alternativa terapêutica relevante no tratamento de tumores hepáticos primários e metastáticos. Baseada na administração intra-arterial de microesferas carregadas com radioisótopos, a técnica permite uma abordagem locorregional altamente seletiva, com impacto direto no controle tumoral e menor toxicidade sistêmica.

“As microesferas de vidro ou de cerâmica funcionam como veículos do radioisótopo, geralmente o ítrio-90, permitindo a entrega seletiva da radiação diretamente ao tumor e a concentração da dose na lesão, com mínima exposição do tecido adjacente”, explicou o vice-presidente da Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear e Imagem Molecular (SBMN), Paulo Almeida. Por se tratar de uma abordagem locorregional, essa terapia se diferencia de outras, como a quimioterapia e intervenções cirúrgicas, pela sua atuação direta no tumor, possibilitando o tratamento de pacientes que não são elegíveis para cirurgia.

Atualmente, esse modelo terapêutico é oferecido em centros hospitalares de alta complexidade, com serviços de Medicina Nuclear estruturados, utilizando tecnologia importada.

Tecnologia brasileira

O Brasil possui pesquisas em fases experimental e pré-clínica, ainda sem aplicação clínica estabelecida. Entre elas, destaca-se a desenvolvida no Instituto de Energia Nuclear (IEN), unidade técnico-científica da Comissão Nacional

de Energia Nuclear (Cnen), localizado no Rio de Janeiro, sob responsabilidade técnica do pesquisador Ralph Santos-Oliveira. “O que fizemos, de maneira bem prática, foi nacionalizar a produção desse tipo de medicamento. Trata-se de uma tecnologia 100% brasileira, pois utilizamos recursos disponíveis em laboratório nacional”, afirma.

A pesquisa utiliza microesferas de vidro com potencial reciclável para o tratamento de câncer hepático, empregando o radionuclídeo hólmio-166. Os ensaios pré-clínicos foram finalizados em modelos animais, mas não avançaram para a fase clínica devido à falta de interesse institucional por parte de hospitais.

Outra linha de pesquisa é conduzida no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), também unidade técnico-científica da Cnen, com sede em São Paulo. Inicialmente, os estudos focaram em microesferas com ítrio-90 (Y-90) e, posteriormente, passaram a explorar o hólmio-166, que apresenta vantagem estratégica pela possibilidade de produção nacional. “O estudo no Ipen concentrou-se no desenvolvimento do processo produtivo, na validação do material e na otimização de suas propriedades físicas e químicas. No entanto, a pesquisa ainda não avançou para etapas pré-clínicas ou clínicas, principalmente devido à falta de financiamento contínuo e de equipes dedicadas”, explica o pesquisador Leonardo Genova.

“O impacto esperado inclui maior acesso a terapias locorregionais avançadas, consolidação da Medicina Nuclear aplicada à oncologia, aumento da autonomia tecnológica nacional e possível incorporação mais ampla dessas terapias ao sistema de saúde em casos selecionados”, destacou o vice-presidente da SBMN.

Diante desse cenário, surge a questão: por que ainda não houve avanço significativo das tecnologias brasileiras para esse tipo de tratamento?

Segundo o pesquisador Ralph Santos-Oliveira, um dos principais desafios é a dificuldade de financiamento contínuo. Embora os órgãos de fomento reconheçam a relevância das pesquisas, frequentemente se espera que um único edital seja suficiente para custear todas as etapas do desenvolvimento, desconsiderando as especificidades e os custos associados ao uso de material radioativo.

Leonardo Genova também aponta a falta de pessoal qualificado e de uma equipe multidisciplinar estruturada de forma permanente em sua instituição.

Apesar de o Brasil ainda não contar com uma tecnologia nacional consolidada para a produção de microesferas destinadas à radioembolização, as pesquisas em andamento são promissoras e podem garantir maior autonomia tecnológica ao país, além de contribuir para a redução dos custos do tratamento.

A produção nacional de radiofármacos é estratégica para o avanço da Medicina Nuclear e para a redução dos custos de tratamentos já realizados no exterior ou mesmo no Brasil a valores elevados. Estima-se que um procedimento com tecnologia importada possa ultrapassar R\$ 200 mil por paciente. O desenvolvimento de uma tecnologia nacional tende a reduzir significativamente esse custo e ampliar o acesso ao tratamento.



XXIV ENFIR



XVII ENAN



IX ENIN



XI JR. POSTER



XII ExpoINAC

**+600 TRABALHOS
TÉCNICOS SUBMETIDOS**

Energia que vai além. Conhecimento que transforma.

A energia nuclear está presente no futuro e a ABEN está no centro dessa transformação.

Promovendo inovação, pesquisa e desenvolvimento, a Associação Brasileira de Energia Nuclear conecta pessoas, ideias e tecnologias para um mundo mais sustentável.

Porque o futuro precisa de ciência. E a ciência precisa de você.

Junte-se à ABEN e contribua para construir o futuro da energia nuclear.

