

[DOI 10.29327/230731.13.26-3](https://doi.org/10.29327/230731.13.26-3)

A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: HISTÓRICO E RESULTADOS.

Carlos Alberto Aragão de Carvalho (EGN)
Hudson Lucio Bignardi (EGN)¹

RESUMO: Esta pesquisa teve como objetivo descrever a evolução e o uso da energia nuclear no Brasil, identificando a trajetória nacional no desenvolvimento de conhecimentos sobre seu aproveitamento seguro e sustentável. Para tal, o estudo sintetizou a história brasileira da pesquisa sobre energia nuclear e agregou fatos atuais que podem impactar o futuro dessa energia no País, além de verificar tecnologias para geração e distribuição da energia nuclear, seu reposicionamento como energia limpa, entre outras possibilidades. E finalmente apresentou futuros possíveis para o Brasil. Destaca-se, ainda, que o presente artigo é fruto de pesquisa do Subgrupo de Energia Nuclear e Futuro do Laboratório de Simulação e Cenários da Escola de Guerra Naval.

Palavras-chave: Energia Nuclear; Tecnologia; Estratégia.

ABSTRACT: This research aimed to describe the evolution and use of nuclear energy in Brazil, identifying the national trajectory in the development of knowledge about its safe and sustainable use. To this end, the study synthesized the Brazilian history of research on nuclear energy and added current facts that may impact the future of this energy in the country, in addition to verifying technologies for the generation and distribution of nuclear energy, its repositioning as clean energy, among other possibilities. And finally, it presented possible futures for Brazil. It is also noteworthy that this article is the result of research by the Nuclear Energy and Future Subgroup of the Simulation and Scenarios Laboratory of the Naval War College.

Keywords: Nuclear energy; Technology; Strategy.

¹ Os autores são pesquisadores do Laboratório de Simulações e Cenários da Escola de Guerra Naval, mais especificamente do Subgrupo de Energia Nuclear e Futuro, sendo o Prof. Dr. Carlos Alberto Aragão de Carvalho Filho o Pesquisador Sênior do subgrupo. Outros pesquisadores do subgrupo também participaram da elaboração do presente artigo: André Luiz de Mello Braga, Fabíola de Souza Freitas, Marcelo José Anghinoni Nava e Monah Marins P. Carneiro.

Introdução

O Brasil está entre as 20 maiores economias do mundo. No entanto, para avançar no desenvolvimento sustentável do País, os brasileiros devem estar atentos à evolução das tecnologias de geração de energia mais limpa e, dentre elas, as de origem nuclear.

O envolvimento brasileiro com a área nuclear remonta à década de 1940 e teve grande impulso quando, em 1953, o então Presidente da República, Getúlio Vargas, aprovou a proposta do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) destinada a capacitar o País em conhecimentos, tecnologias, equipamentos e materiais úteis para o domínio da energia nuclear (FGV CPDOC, 2014).

A gênese do interesse brasileiro por energia nuclear tem conexões diretas com a Marinha do Brasil (MB), pois o Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva, além de marinheiro, químico e professor, foi pioneiro nos estudos sobre o tema. Respeitado pela comunidade acadêmica, ele foi um dos idealizadores e primeiro presidente do CNPq. Foi durante seu mandato que a proposta aludida foi apresentada a Getúlio Vargas.

A existência de extensas reservas de urânio e o acesso a esse recurso natural no território nacional oferecem vantagem competitiva ao Brasil, detentor da sexta maior reserva do mundo desse mineral. Pesquisas recentes têm logrado êxito no reaproveitamento de rejeitos radioativos, o que permite considerar a energia nuclear como uma fonte limpa e segura.

O presente artigo tem o objetivo de descrever a evolução do uso dessa fonte de energia no Brasil, identificando a trajetória nacional no desenvolvimento de conhecimentos sobre seu aproveitamento seguro e sustentável, bem como as políticas para o setor, o fomento à pesquisa, as tecnologias nucleares e as potencialidades futuras dessa fonte de energia.

2 A Energia Nuclear no Brasil

O desenvolvimento da energia nuclear no Brasil ocorreu por meio da pesquisa científica e do desenvolvimento tecnológico, orientados por políticas públicas para a área. Desde o início da chamada Era Nuclear, as instituições brasileiras identificaram a relevância estratégica dessa fonte de energia para promover o desenvolvimento econômico, industrial e científico do País (FGV CPDOC, 2014). A pesquisa universitária, a empresa nacional de energia nuclear (atual ELETRONUCLEAR) e os programas estratégicos da Marinha do Brasil (MB) relacionados ao tema nuclear representam a coluna vertebral do desenvolvimento tecnológico nuclear brasileiro.

2.1 Programa Nuclear Brasileiro (PNB)

Em 1947, o Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva redigiu a primeira política nuclear, aprovada pelo Conselho de Segurança Nacional (CSN). Em 1951, foi indicado para a presidência do então Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq). Durante a presidência do Almirante Álvaro Alberto, um dos objetivos do CNPq era estimular pesquisas sobre recursos minerais relevantes e expandir a industrialização do setor nuclear.

Ao final da década de 50, entraves relacionados a acordos nacionais e internacionais, orçamentos limitados e instabilidades políticas causavam atrasos nas pesquisas na área. Para enfrentar esses problemas de maneira coordenada, foi criada a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 1956, no início do governo de Juscelino Kubitschek, sob supervisão presidencial e em estreita colaboração com a política norte-americana, no âmbito do Programa “Átomos para a Paz”.

Em 1962, terminava a construção do primeiro reator de pesquisa feito no País, chamado de Argonauta, localizado no Instituto de Energia Nuclear (IEN), na cidade do Rio de Janeiro; porém, ele só entraria em funcionamento em 1965. O reator Argonauta

foi uma adaptação de um reator construído pelo Laboratório Nacional de Argonne, nos Estados Unidos da América (EUA) (HECHT, 2014).

Além do programa “Átomos para a Paz”, o Brasil e a Alemanha assinaram o Acordo de Cooperação para o Desenvolvimento da Energia Atômica com Finalidades Pacíficas, em 1955. Esse acordo previa a compra de reatores de pesquisa que operavam com urânio enriquecido.

Havia duas correntes de pensamento à época: por um lado, aqueles que defendiam a importação de tecnologia americana; por outro, os que almejavam o desenvolvimento de tecnologia nacional, utilizando urânio natural ou tório, como única forma de desenvolver uma política científica propriamente autóctone (MARTINS, 2010).

Durante o governo dos militares, iniciado em 1964, foi estabelecida uma política nuclear baseada na obtenção de usinas nucleares para a geração de energia elétrica e na criação de complexos industriais nucleares brasileiros autônomos. Como consequência dessa política, o Brasil viria a adquirir todas as tecnologias necessárias para o domínio do ciclo do combustível nuclear a longo prazo.

Em 1968, o governo criou o “Conceito Estratégico Nacional”, no qual argumentava que uma das maneiras de superar a posição periférica do Brasil no cenário internacional seria por meio da tecnologia nuclear. Em 1973, houve a crise do petróleo e a expansão do mercado internacional de reatores e, em 1974, houve a decisão dos EUA de suspender o fornecimento de urânio enriquecido para as novas usinas. Portanto, em 1978, o Brasil procurava outro parceiro para obter a tecnologia nuclear que julgava necessária (HECHT, 2018).

Naquele período, o Presidente Geisel visitou a Alemanha para acertar um acordo que previa a construção de centrais nucleares no Brasil – elas seriam responsáveis pelo desenvolvimento das etapas do ciclo de produção de energia elétrica. Em decorrência do Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, o País comprometeu-se a desenvolver um programa de construção de oito grandes reatores nucleares para a geração de eletricidade e a implantar uma indústria teuto-brasileira para a fabricação de

componentes e de combustível, por 15 anos. O acordo envolvia a empresa alemã *Kraftwerk Union* (KWU).

Das oito centrais previstas, apenas duas foram construídas. Levando em consideração os fatos ocorridos e os resultados obtidos até então, os militares brasileiros decidiram desenvolver um programa nuclear de tecnologia nacional para enriquecimento de urânio. Esse novo programa iniciou-se em 1979 (MARQUES, 2016).

Apesar das usinas de Angra I, II e, futuramente, Angra III, utilizarem tecnologias importadas, as respectivas implantações permitiram a aquisição de conhecimentos relevantes para o setor nuclear nacional. Além delas, os reatores de pesquisa no Brasil também têm sido importantes, inclusive para a produção de radioisótopos.

2.2 Programa Nuclear da Marinha (PNM)

O Programa Nuclear da Marinha (PNM) teve seu lançamento formal em 1979 e tinha dois objetivos principais: o domínio do ciclo do combustível nuclear e o desenvolvimento da propulsão nuclear para uma nova classe de submarinos. O Programa contou, desde o início, com a colaboração do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), de São Paulo.

O PNM fez parte do Programa Nuclear Paralelo desenvolvido pela Marinha do Brasil (MB), pelo Exército Brasileiro (EB) e pela Força Aérea Brasileira (FAB); porém, somente a MB teve condições de realizar atividades em escala industrial (GALANTE, 2014).

O Programa vem demonstrando grande capacidade de mobilização e estímulo aos setores de Ciência e Tecnologia. São inúmeras as parcerias estabelecidas com universidades, centros de pesquisa e desenvolvimento, indústrias e empresas de engenharia (GUIMARÃES, 2012).

O Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), dentro do campus da Universidade de São Paulo (USP), agrupa importantes centros de pesquisa e atua em vários projetos. Inclui também as instalações do Centro Industrial Nuclear de Aramar

(CINA), na cidade de Iperó.

Atualmente, o PNM segue estruturado em duas vertentes: aprimorar o domínio do ciclo do combustível nuclear e desenvolver o projeto do Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE) de construção de uma planta nuclear, protótipo em terra da planta a ser embarcada no submarino com propulsão nuclear (HECHT, 2018).

A MB já domina todo o ciclo para a produção de combustível de reatores. O início dos estudos para o domínio de tal tecnologia ocorreu nos anos 70. Os avanços foram gradativos, e atualmente, a Marinha contribui para a produção do combustível nuclear utilizado pelas usinas de Angra I e II, pois sua tecnologia de enriquecimento é utilizada pelas Indústrias Nucleares do Brasil S.A.

No CINA, foi inaugurado o primeiro módulo da Unidade Piloto de Hexafluoreto de Urânio (USEXA), que alimenta as ultracentrífugas no processo de enriquecimento. A USEXA é utilizada para a produção de combustível em escala de demonstração industrial (GALANTE, 2014).

O ciclo do combustível passa por um longo trajeto até chegar ao reator. Primeiro ocorre o processo de prospecção e mineração, em que são extraídos da natureza os minérios que contêm urânio. O urânio é separado pelo processo de lixiviação, na forma de concentrado de urânio, ou *Yellow Cake*, como normalmente é conhecido.

O próximo passo consiste na transformação do concentrado, na forma sólida, em hexafluoreto de urânio (UF), na forma gasosa. A próxima etapa, a do enriquecimento, é a que concentra a atenção dos órgãos internacionais reguladores de tecnologia nuclear.

Para o entendimento do ciclo, alguns pontos devem ser esclarecidos: o primeiro ponto refere-se aos isótopos de urânio existentes na natureza, que podem ser encontrados na forma de ^{235}U (0,7% na natureza) e de ^{238}U (99,3 % na natureza). O urânio utilizado como combustível no Brasil tem, no entanto, percentual maior de ^{235}U que o encontrado na natureza. Por conta disso, realiza-se o processo de seu enriquecimento (MARTINS, 2010).

Ainda segundo Martins (2010), o processo de enriquecimento do urânio brasileiro é realizado por ultracentrífugas que utilizam levitação magnética para separar o ^{235}U do

^{238}U no hexafluoreto de urânio. Esse mecanismo é realizado por diversas vezes e é chamado de processo cascata. Por meio dele, o nível de ^{235}U passa de 0,7 % para valores entre 4% e 5%.

Os órgãos internacionais realizam inspeções quanto ao nível de enriquecimento para saber qual é o fim destinado a uma dada massa de urânio, lembrando que o enriquecimento a uma taxa superior a 93% serve para a produção de artefatos bélicos explosivos.

Após o enriquecimento, o produto passa por diversas técnicas industriais até chegar às pastilhas de urânio que são utilizadas nos reatores. A pastilha é de forma cilíndrica e o tamanho das pastilhas é, aproximadamente, de um centímetro de raio por um de altura. Mesmo sendo pequena, a pastilha pode produzir uma grande quantidade de energia (GALANTE, 2012).

A outra vertente do PNM é o LABGENE. Esse laboratório tem a finalidade de alcançar a capacidade técnica para projetar, operar e manter reatores a água pressurizada (do inglês *Pressurized Water Reactor* — PWR). Tais reatores serão empregados nos submarinos brasileiros de propulsão nuclear (SN-BR). Vale destacar que a tecnologia gerada no LABGENE também poderá ser utilizada para a geração de eletricidade.

O CTMSP possui laboratórios que desenvolvem projetos para aplicação na indústria naval em diversas áreas, como bombas a vácuo, conversores estáticos, giroscópios, sistemas de controles de máquinas navais, entre outros. O Centro conta com muitos engenheiros de várias especialidades e interage com a Universidade de São Paulo (USP) (LIMA, 2019).

A tecnologia nuclear é tratada pelos países como um assunto sensível e muito restrito. Portanto, o conhecimento sobre ela não é compartilhado. O domínio dessa tecnologia permite ao Brasil dispor de uma alternativa energética, profissional e técnica para auxiliar no atendimento ao consumo interno, bem como para expandir o relacionamento com as nações que a detêm.

O CTMSP desenvolve toda a parte de propulsão nuclear para o submarino. Além

disso, produz tecnologias que podem ser empregadas em outros meios navais. Todos os sistemas que operam em um submarino estão sendo estudados e analisados no CINA para que se alcance um novo patamar na MB: a obtenção do submarino convencional de propulsão nuclear (SCPN) (Figura 1).



Figura 1 - Concepção Artística do SCPN. Fonte: DGTNDM

2.3 Programa de Desenvolvimento do Submarino Convencional de Propulsão Nuclear (SCPN)

A tecnologia para construir submarinos avançou no Brasil graças ao conhecimento obtido com a construção dos submarinos projetados a partir do modelo alemão TKL-209. Com esse modelo, foram construídos quatro submarinos das classes “Tupi”² e “Tikuna” no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro. Tal conhecimento deixa o Brasil em nível bastante elevado, visto que poucas nações possuem a capacidade de construir um submarino.

² Da Classe Tupi, foram construídos no Brasil: Tamoio, Timbira e Tapajó.

Mesmo com o conhecimento e a competência na construção de submarinos com propulsão diesel-elétrica, a construção de uma planta nuclear para um submarino com propulsão nuclear ainda seria um salto muito desafiador para o País. Por isso, o Brasil optou por buscar parcerias com outras nações para alcançar essa meta.

Na atualidade, Rússia e França desenvolvem e produzem ambos os tipos de submarinos. Esses países detêm capacidade comprovada de construir submarinos de propulsão nuclear e dispõem, cada um, de projeto de um submarino diesel-elétrico com potencial para a transição para um nuclear. Do lado russo, existe o *Amur 1650* e, do lado francês, o *Scorpène* (MARQUES, 2016).

A Marinha do Brasil buscava um projeto de submarino que pudesse ser compatibilizado com o reator nuclear em desenvolvimento no CTMSP e que incluísse a transferência de conhecimento tecnológico. A Rússia e a França possuíam projetos que atendiam aos objetivos brasileiros, mas a primeira não se dispôs a transferir a tecnologia de construção dos seus submarinos.

Além disso, não havia, à época, nenhum país que fosse cliente da Rússia ou que com ela estivesse em negociação. Diferentemente, a França possuía metodologias mais usuais, de melhor compreensão para técnicos e engenheiros, e já havia exportado os seus produtos para Chile, Índia e Malásia (LIMA, 2019).

No final de 2008, os presidentes do Brasil e da França estabeleceram uma parceria estratégica, envolvendo acordos políticos, técnicos e comerciais. O Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) faz parte desses acordos técnico-comerciais. Nesses últimos, destacava-se a então empresa francesa *Direction des Constructions Navales et Services* (DCNS), hoje *Naval Group*, que criou a Escola de Projeto de Submarinos, em *Lorient*, na França, inaugurada em 2010. Seu objetivo era a transferência de tecnologia em projeto de submarinos (HECHT, 2018).

A partir do momento em que foi definida a parceria com a França, foi criada a Coordenadoria Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN), subordinada inicialmente à Diretoria-Geral de Material da Marinha (DGMM), hoje na Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear

e Tecnológico da Marinha (DGDNTM). A COGESN é a responsável pelo gerenciamento do projeto global que inclui a construção do estaleiro e da Base Naval, em Itaguaí, que atuarão na construção e manutenção dos submarinos.

O projeto do SN-BR teve seu início em 2016. A propulsão nuclear é de responsabilidade do CTMSP, que tem como meta sua instalação e integração aos sistemas do submarino. Já a parte do casco do submarino ficou a cargo da Nuclebrás Equipamentos Pesados (NUCLEP), empresa que participou da construção dos cascos dos submarinos da classe “Tupi”, no passado, e da classe “Riachuelo” mais recentemente. Foi também criada a Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM), em 2013, responsável pela fabricação das chapas metálicas das seções do SN-BR, além da produção e instalação dos conveses, tubulações e anteparas (GALANTE, 2014).

3 Tecnologias Atuais

Nesta seção do artigo, pretende-se apresentar algumas novas tecnologias de destaque na atualidade que configuram possibilidades de desenvolvimento futuro para a energia nuclear. Serão discutidos reatores compactos, reatores flutuantes, fusão nuclear, baterias de rejeitos nucleares e uso no espaço.

3.1 Reatores Modulares Compactos

Os “Reatores Modulares Compactos” (em inglês: *Small Modular Reactors – SMR’s*) representam uma novidade tecnológica muito relevante para a produção de energia nuclear. Esses reatores são construídos, de maneira modular, em sítios industriais dedicados. Seus módulos são então transferidos para os locais de operação, onde são integrados.

Os SMR são reatores de pequenas dimensões que podem ser instalados em série para atingir as mesmas capacidades de geração de energia de um reator de grande

porte, sem exigir as grandes áreas ocupadas por complexas usinas nucleares, como ocorre hoje. São mais versáteis e seguros. Com eles, pretende-se popularizar a energia nuclear, de modo análogo ao que ocorreu com os PC's em relação aos grandes computadores.

Existem cerca de 70 projetos de SMR listados pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), dos mais diversos países. Dentre eles, o projeto argentino do reator CAREM está bem adiantado, com seu comissionamento previsto para 2023. Na China e nos Estados Unidos também há projetos bastante avançados.

O interesse global nos SMR tem se incrementado. Segundo a AIEA (2022), isso é devido à sua capacidade de atender a necessidade de geração de energia de forma flexível e com uma ampla variedade de aplicações, substituindo antigas usinas de energia a combustível fóssil. A AIEA (2022) acrescenta que esses reatores apresentam desempenho de segurança aprimorado, oferecem melhor custo de capital inicial e ainda são compatíveis para aplicações em cogeração e não elétricas. São uma opção viável para regiões remotas com infraestruturas limitadas e permitem utilização em sistemas de energia híbrida sinérgica que combinam fontes de energia nuclear e alternativas, incluindo renováveis.

Apenas como ilustração, pode-se citar o modelo da empresa NuScale, o qual recebeu da Comissão Reguladora Nuclear (NRC) dos Estados Unidos da América (EUA), em 2020, a primeira certificação. Ver a figura 2 a seguir.

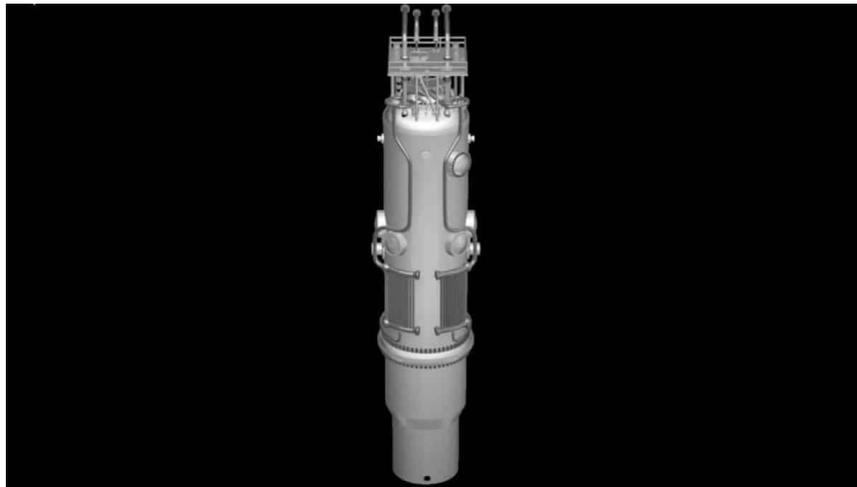


Figura 2 - *Small Reactor*. Modelo da empresa NuScale
Fonte: (NOGUEIRA, 2020)

Transformar uma boa ideia em algo aplicável é o que transforma futuro em presente, portanto os SMR já são uma realidade. Daí decorre que as pesquisas nacionais devem contemplar seriamente esse tema, até para evitar um distanciamento tecnológico em relação ao resto do mundo.

Como descrito anteriormente, o LABGENE está construindo um reator nuclear de pequeno porte que é o protótipo em terra do que embarcará no SCPN. Esse reator poderá servir para capacitar técnicos e engenheiros e prover os recursos humanos necessários para um programa de construção de SMR com grande potencial de uso para produção de energia, dessalinização, produção de hidrogênio e produção de radioisótopos, além é claro de emprego na propulsão nuclear naval.

3.2 Plantas Nucleares Flutuantes

As chamadas Plantas Nucleares Flutuantes podem ser entendidas como uma instalação com um ou mais reatores nucleares operando a partir de uma plataforma no mar. Podem ser autopropulsadas, isto é, uma verdadeira embarcação que carrega uma

usina nuclear de geração de energia. Segundo o FORONUCLEAR (2022), as vantagens desse tipo de instalação são:

- construção em fábrica ou estaleiro, não exigindo construção *in loco*;
- simplicidade de localização, não exigindo estudos de viabilidade em terra;
- facilidade de resfriamento, pois o mar atua como fonte infinita de água de resfriamento em caso de emergência;
- baixo impacto ambiental; e
- mobilidade, isto é, são usinas nucleares que podem ser levadas para locais remotos que demandem fornecimento de energia elétrica.

Como desvantagens ou preocupações relevantes, tem-se:

- descomissionamento em local especializado;
- exigência de consideração de alguns fatores específicos: restrição de acesso a pessoal qualificado e necessidade de procedimentos de segurança para garantir que não haja vazamento de material radioativo para o mar.

O FORONUCLEAR (2022) identifica apenas três países desenvolvendo projetos com essa tecnologia: a Federação Russa (Rússia), República Popular da China (RPC) e os EUA.

A Rússia é o único Estado que já possui instalações operacionais, sendo uma referência nessa tecnologia, destacadamente a empresa estatal russa Rosatom e sua divisão de energia elétrica, Rosenergoatom. No segundo semestre de 2019, antes do inverno fechar as rotas pelo Ártico, os russos realizaram uma travessia para levar uma planta flutuante (*Navio Akademik Lomonosov*) para atender as necessidades de geração de energia da cidade de *Pavek*, no norte na Sibéria.

Como iniciativa estadunidense pode-se citar a do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) que possui um projeto de desenvolvimento de uma pequena usina nuclear

offshore (OFNP) a ser estacionada a uma distância mínima de 12 km da costa. O projeto combina duas tecnologias consideradas confiáveis, o reator nuclear e a plataforma de petróleo *offshore*. A ideia do MIT é posicioná-la em águas profundas, distante das populações costeiras, estando conectado à terra apenas por uma linha de transmissão de energia submarina. Ver a figura 3 a seguir.



Figure 3 - visão artística da Planta flutuante do MIT
Fonte: FORONUCLEAR - [World Nuclear News](#), [MIT](#)

3.3 Energia Nuclear Limpa

Tecnologias recentes permitem reduzir os problemas de armazenamento de rejeitos nucleares das usinas de energia nuclear e também seu reaproveitamento em pilhas nucleares, entre outras possibilidades. Essas tecnologias nos levam a considerar a

energia nuclear como uma opção de energia limpa que contribui para reduzir a utilização de combustíveis fósseis e para o uso sustentável dos recursos naturais.

Conforme Gonçalves (2021), rejeito é normalmente um subproduto da geração de energia nuclear e outras aplicações de fissão nuclear ou tecnologia nuclear tal como em pesquisa, indústria, medicina, agricultura etc. De acordo com a AIEA, rejeito nuclear, também conhecido como resíduo radioativo, é qualquer material que contenha uma concentração de radionuclídeos superior à considerada segura pelas autoridades nacionais.

A tecnologia de plasma é uma solução eficiente para tratamento de rejeitos radioativos, resíduos hospitalares contaminados e resíduos tóxicos (Guihard, 2002 *apud* Gonçalves, 2021). Submetido ao processo de plasma térmico, qualquer substância pode ser vitrificada, ou seja, seu volume é reduzido. Estudos mostram que a tecnologia de plasma tem sido utilizada para disposição final de resíduos. Os efeitos de plasma térmico permitem o emprego das técnicas mais proeminentes para remover e recuperar materiais residuais em qualquer estado. Há, portanto, bons motivos para estudar a viabilidade técnico-econômica da aplicação dessa tecnologia para tratamento de rejeitos radiativos (Gonçalves, 2021).

Como outro exemplo de avanço no armazenamento de rejeitos, pode-se mencionar o uso do grafeno para reduzir resíduos nucleares. Segundo o *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) desenvolveu pesquisa inédita sobre tratamento de rejeitos radioativos líquidos orgânicos com o uso de grafeno, que identificou que tal utilização possibilita a redução de 900 litros de resíduos nucleares a apenas 90 litros. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) trabalham no desenvolvimento de projeto que possa expandir essa utilização do grafeno e aplicá-la na redução dos rejeitos das usinas nucleares (FAPERJ, 2020).

Talvez, o maior problema ambiental na produção de energia nuclear seja a geração de rejeitos. Atualmente, como já vimos, estão sendo desenvolvidas diversas pesquisas

sobre formas de tratamento dos rejeitos nucleares. Além disso, a disseminação de boas práticas, no âmbito da força de trabalho, tem contribuído para a minimizar a contínua produção de rejeitos, um princípio basilar na política de gestão de rejeitos da indústria nuclear.

Apesar de os volumes de rejeitos nucleares produzidos serem pequenos, a questão mais importante para a indústria nuclear é a gestão da sua natureza tóxica de uma forma que respeite o ambiente e não apresente nenhum perigo, tanto para trabalhadores como para o público em geral (Guimarães & Mattos, 2011). Barreiras múltiplas de disposição geológica são planejadas para garantir que nenhuma liberação ambiental significativa ocorra. Estas imobilizam e isolam os elementos radioativos dos rejeitos de alta e média atividade para a biosfera.

Outro aspecto importante a ser analisado é a eficiência energética. De acordo com Guimarães e Mattos (2011), no futuro energético da humanidade certamente as energias renováveis, como a solar, a eólica, a das marés e a geotérmica têm um papel relevante a desempenhar, semelhante ao que a energia hídrica vem desempenhando há séculos. A energia nuclear também oferece uma tecnologia eficiente para, sem impacto ambiental destrutivo, alimentar uma economia próspera.

A densidade energética expressa a quantidade de combustível que uma usina necessita para produzir uma determinada quantidade de eletricidade e indica também a quantidade de resíduos produzidos por unidade de geração de energia. Dado que a densidade energética está diretamente ligada à quantidade de combustível necessária, ela também está ligada à quantidade de resíduos produzidos. Quanto maior a densidade energética de um combustível, menor é a quantidade de combustível usada por uma usina. Sendo utilizada uma quantidade menor de combustível, necessariamente haverá menos resíduos (Guimarães & Mattos, 2011).

Guimarães e Mattos (2011) afirmam que, para efeito de comparação, com relação à emissão de carbono, enquanto uma planta nuclear de 1000 MWe de potência não emite carbono para gerar energia elétrica, uma central de geração elétrica a carvão de

mesma potência produz uma média de 400.000 toneladas de cinzas e 8 milhões de toneladas de gases de efeito estufa.

As novas tecnologias em consideração estão associadas ao desenvolvimento de reatores da Geração IV, compreendendo reatores rápidos e reatores incineradores de rejeitos, que visam a: reduzir a quantidade e a toxicidade dos resíduos nucleares destinados à eliminação geológica; ampliar o uso eficaz e reduzir o custo da eliminação geológica; reduzir os estoques de plutônio; e, finalmente, recuperar a energia útil ainda presente no combustível usado das centrais nucleares comerciais (Guimarães & Mattos, 2011).

Essas tecnologias contemplam a recuperação de elementos do grupo dos actínidos (plutônio, amerício e cúrio) que estão presentes no combustível usado dos reatores das centrais nucleares comerciais. A toxicidade do combustível irradiado sem actínidos atinge os valores do minério natural de urânio após um período de 300 anos. De maneira semelhante, também é reduzida a carga de calor que vem principalmente do decaimento radioativo dos actínidos de longa vida (Guimarães & Mattos, 2011).

Outra questão importante, segundo Welle (2020), é o projeto que a Comissão Europeia apresentou para rotular como “verdes” as centrais nucleares e a gás com o objetivo de facilitar o financiamento dessas instalações. O objetivo é contribuir para o combate às mudanças climáticas.

O documento estabelece os critérios que permitem classificar como “sustentáveis” os investimentos em centrais nucleares ou a gás para a produção de eletricidade, com o objetivo de orientar as “finanças verdes” para atividades que contribuam para a redução dos gases com efeito de estufa (Welle, 2020).

Ainda de acordo com Welle (2020), os países que são favoráveis ao uso de gás e energia nuclear avaliam que as energias renováveis, já rotuladas como energia verde pela Comissão, sofrem de produção intermitente e não permitirão nos próximos anos fornecer eletricidade a baixo custo e com uma produção que possa ser controlada.

Entretanto, aquele autor chama atenção para a oposição dos ambientalistas ao reconhecimento das centrais a gás, que emitem dióxido de carbono (CO₂), e das centrais de energia nuclear, devido à produção de lixo radioativo e, que, um pequeno grupo de países, liderado pela Alemanha, luta pela exclusão da energia nuclear do conceito de energia verde.

3.4 Fusão Nuclear

A fusão nuclear é um processo em que combina dois núcleos de átomos, formando um único núcleo mais pesado e liberando energia. Pode-se mencionar como exemplo as reações de fusão que ocorrem no sol, produzindo a poderosa energia da estrela. Trata-se de uma reação que libera energia em quantidades maiores que um milhão de vezes aquela liberada em uma reação química típica.

A equação de Einstein, $E=mc^2$, explica o porquê dessa reação liberar tanta energia, pois a massa do novo núcleo fundido é menor que a soma das massas dos dois núcleos somados, sendo a massa perdida convertida em energia.

Um reator de fusão operacional pode ser considerado virtualmente um gerador inesgotável de energia. O grande problema que deve ser resolvido para esse reator funcionar é o do balanço de energia: a quantidade de energia necessária para provocar a fusão e manter o processo autossustentável deve ser inferior à energia liberada.

No Brasil, grupos na USP, na Universidade de Campinas (Unicamp) e no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) dedicaram-se ao estudo da fusão nuclear. Com a crise do petróleo em 1973, vários grupos de pesquisa buscavam por fontes alternativas de energia, entre elas a fusão nuclear. Com o fim da crise dos combustíveis, alguns desses grupos voltaram-se para a pesquisa básica, com a consequente perda de interesse na área de fusão.

Internacionalmente, o primeiro protótipo de reator de fusão industrial foi o T-15 (*Tokamak³-15*), resultado das pesquisas realizadas no Instituto *Kurchatov*, na Rússia. Atualmente, face aos altos custos da pesquisa, existem algumas iniciativas promissoras: no MIT, nos EUA; no *Institute of Plasma Physics (IPP)*, na China; no *Joint European Torus (JET)*, no Reino Unido; e, talvez a mais promissora, no *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*, que envolve um consórcio internacional composto pela União Europeia, Índia, Japão, China, Rússia, República da Coreia (Coreia do Sul) e EUA. A União Europeia é responsável por financiar quase metade do custo da construção do ITER, sendo o restante custeado pelos demais membros.

Segundo a AIEA (2022^a), existem pesquisas sobre fusão nuclear em todo o mundo com progressos relevantes na física de fusão e plasma. Muitas questões científicas foram resolvidas nos últimos anos. O desafio é provar que a fusão nuclear é uma fonte de energia viável; a chave está em se conseguir uma reação de fusão estável, o que exige equipamentos complexos e caros, uma vez que são necessárias grandes quantidades de energia para se obter um fluxo de plasma. Assim, mesmo quem possui pesquisas próprias, considera mais promissor valer-se de colaboração internacional.

Como já mencionado, o MIT vem desenvolvendo o SPARC, um novo modelo de reator para substituir o seu modelo Alcator C-Mod⁴. O IPF chinês desenvolve o EAST (Tokamak Experimental Supercondutor Avançado), também chamado de “sol artificial”, que bateu um novo recorde de temperatura no dia 28 de maio de 2021 ao atingir 120 milhões de graus Celsius por 101 segundos. Os chineses recentemente tem quebrado seguidos recordes de temperatura em seu reator de testes e também de tempo na manutenção do fluxo de plasma. O ITER, iniciativa mais promissora, localizado no sul da França, nas proximidades de *Cadarache*, pretende construir o maior reator de fusão nuclear do mundo, um grande *tokamak*. Espera-se que entre em operação em 2025.

³ *Tokamak* é uma expressão russa que significa “câmara toroidal com bobinas magnéticas”. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/205136-fusao-nuclear-realidade-cinco-anos.htm>.

⁴ Alcator C-Mod é um reator experimental de fusão desenvolvido pelo MIT em escala menor, mas semelhante aos demais reatores de fusão existentes. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/205136-fusao-nuclear-realidade-cinco-anos.htm>.

O Brasil, não possui pesquisa relevante sobre o assunto, tão pouco faz parte do consórcio ITER. Assim, pode ficar à margem do desenvolvimento dessa tecnologia. Apesar disso, existem alguns pesquisadores brasileiros que trabalham no ITER e têm conseguido fazer contribuições relevantes. Como exemplo, pode-se mencionar o pesquisador brasileiro Dr. Vinícius Njaim Duarte que conseguiu esclarecer o problema de variações bruscas de frequência nos *tokamaks*.

Resultados experimentais, observados ao longo de 20 anos, permitiram identificar que a forma pela qual os íons rápidos (dentre os quais as partículas – α) são ejetados do plasma varia muito entre diferentes *tokamaks*. No entanto, não se conhecia que condições experimentais determinavam esse comportamento. Em *tokamaks*, partículas rápidas excitam ondas eletromagnéticas que podem acarretar variações bruscas de frequência (*chirping*) e não se sabia por que o fenômeno ocorria em algumas máquinas, enquanto em outras não.

Vinícius, que realiza trabalho de pós-doutoramento no Laboratório de Física do Plasma de Princeton, EUA, demonstrou, por meio de uma modelagem numérica de dados experimentais, que a produção ou não do *chirping* depende do nível de turbulência do plasma existente no interior do *tokamak*. Seu trabalho foi orientado pelo Prof. Dr. Ricardo Magnus Galvão, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Sua pesquisa permitiu a realização de experimentos para testar a explicação proposta por ele no maior *tokamak* dos Estados Unidos, o DIII-D, com resultados que confirmaram suas previsões.

As pesquisas de produção de energia líquida, nos reatores de fusão, tem obtido avanços recentes. No início de fevereiro de 2022, o protótipo JET (*Joint European Torus*), localizado no Reino Unido bateu o recorde de produção de energia, ao gerar 59 megajoules, em forma de nêutrons, durante uma descarga de plasma de cinco segundos (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022).

O JET tem sido utilizado como um laboratório do ITER. A experiência realizou fusão de deutério e hidrogênio, o mesmo combustível planejado para uso no reator de fusão

do ITER. Apesar disso, não produziu energia líquida, pois foram produzidos 11 MW que exigiram 40 MW de potência de entrada. Os pesquisadores consideram que o JET é muito pequeno para produzir energia líquida, mas a experiência indicou a viabilidade do ITER lograr sucesso na geração de energia líquida (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022).

Outra abordagem promissora em desenvolvimento é o uso de Inteligência Artificial (IA) para controlar o fluxo de plasma em reatores de fusão. Segundo Stern (2022), pesquisadores da empresa estadunidense DeepMind desenvolveram uma IA para controlar o plasma superaquecido. A ideia foi contribuir para solucionar um problema fundamental para geração de energia por fusão, qual seja: obter uma reação de plasma estável. Ver figura 4 a seguir.



Figure 4 - Interior do reator nuclear TCV, onde foi testada a IA da DeepMind. Imagem: A. Herzog, Swiss Plasma Center, EPFL. Fonte: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2022/02/18/ia-controla-plasma-de-reator-de-fusao-nuclear.htm>

3.5 Foguetes Termonucleares

Um novo projeto de reator de fissão nuclear (HALEU, da sigla em inglês para *High Assay Low Enriched Uranium*) será capaz de levar o homem ao planeta vermelho (Marte), distante da terra por 140 milhões de quilômetros, aproximadamente, em três

meses, em média. Isso significa reduzir o tempo de percurso pela metade, utilizando o programa DRACO (*Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations*).

O projeto utiliza urânio de baixo enriquecimento LEU (*Low-Enriched Uranium*), com menos de 20% de urânio físsil ²³⁵ microencapsulado em cerâmica resistente, por onde o gás é ejetado através de bocais capazes de suportar temperaturas de pico entre 2.800 e 3.000 Kelvin (K) em sistemas de motor NTP (*Nuclear Thermal Propulsion*) para atingir o ISP⁵ de 900 segundos (s) usando hidrogênio propelente como refrigerante.

O reator trabalha com uma temperatura média de saída do núcleo de 1325 K, produzindo um impulso específico de 615 s e empuxo necessário de 111,2 kN. Isso permite que o hidrogênio mais frio flua pela seção mais quente do núcleo, melhorando o aquecimento do hidrogênio e reduzindo as temperaturas máximas dos elementos combustíveis a base de Cerâmica Metálica com Carboneto (Cermet) no núcleo do reator, gerando potência ao motor de 25.000 lbf. O combustível contém carboneto de silício, formando uma barreira hermética que impede o escape de produtos radioativos do reator nuclear, protegendo os astronautas.

O combustível nuclear de fissão é 107 vezes maior em potencial energético do que os combustíveis químicos, tendo relação empuxo/peso cinco vezes maior em eficiência de propelente e 10.000 vezes maior que a propulsão elétrica. Requer menor espaço de armazenagem e mecanismos térmicos nucleares compactos, pesando a metade em relação aos poderosos motores a reação química. Quando usado em uma propulsão de alto empuxo (ISP) o sistema NTP pode levar a missões mais rápidas para Marte, com duração entre 120 e 220 dias em cada sentido, que podem ser alteradas para retornar em um ano sem necessidade de abortar. A figura 3 a seguir apresenta um esquema do reator.

⁵ ISP: Impulso Específico = força propulsora por segundo de massa de propelente consumido.

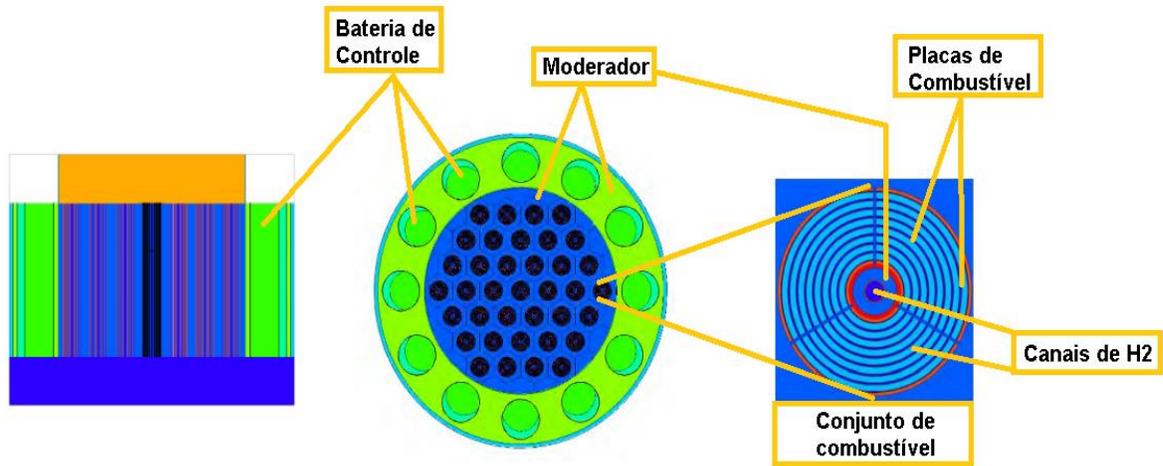


Figure 5 - Reator termonuclear para foguete, adaptado e traduzido por Hudson Lucio Bignardi
Fonte: ANS 2022.

No Brasil, pesquisas sobre as tecnologias relacionadas à energia nuclear e à propulsão podem aproximar os setores nuclear e espacial na corrida tecnológica e militar – pesquisas sobre a compactação de reatores nucleares e a eficiência energética podem produzir tecnologias de interesse para propulsão naval, exploração espacial, energias sustentáveis, colonização e sobrevivência fora da terra, bem como monitoramento de aeronaves. As viagens espaciais seriam facilitadas e teriam encurtado o tempo de viagem, melhorando a logística, com maior capacidade de carga de transporte e armazenamento.

4 O Brasil e as Perspectivas Futuras

Em 2011, Guimarães e Mattos afirmaram que, baseado nos princípios do desenvolvimento sustentável, as análises de ciclo de vida das várias opções de geração elétrica não conseguirão elaborar um cenário para os próximos 50 anos em

que não haja uma significativa participação da fonte nuclear para atender as demandas de geração de energia concentrada.

Verificando-se o histórico e as tendências do setor, a energia nuclear mostra-se uma opção viável e cada vez mais sustentável, em face da sua eficiência energética e das novas tecnologias para a redução de resíduos. Especificamente para o Brasil, um Estado Não Nuclearmente Armado que desenvolve pesquisas relacionadas ao uso da energia nuclear, pode-se considerar as possibilidades a seguir.

4.1 Exploração das Minas Brasileiras

O Brasil retomou os processos de licenciamento e exploração de duas minas de urânio em 2020: as de Santa Quitéria, no Ceará, e Caetité, na Bahia. À época, a mina de Santa Quitéria encontrava-se em processo de negociação envolvendo a administração pública municipal, a estadual e a iniciativa privada, além de órgãos reguladores ambientais, para a retomada das atividades (LIMA, 2020).

O projeto da mina de Santa Quitéria foi remodelado de forma a garantir a exploração da maior reserva de urânio associado a fosfato do mundo, o que gera benefícios não somente para a produção de energia, mas também é muito útil para o agronegócio na produção de fertilizantes (LIMA, 2020).

O então Ministro de Minas e Energia, Bento Albuquerque, e representantes das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) reuniram-se na mina de Caetité para marcar o início das atividades de exploração do urânio em lavra a céu aberto (LIMA, 2020). O evento pode ser considerado um marco da primeira fase de um processo para consolidar o Brasil como um exportador de “*yellowcake*” (U_3O_8).

A retomada da produção nas minas reforça a posição brasileira no Grupo de Fornecedores Nucleares (*Nuclear Suppliers Group* – NSG) e contribui para autonomia na produção de combustível nuclear (LIMA, 2020).



Figure 6 - Mina de Urânio no Brasil

Fonte: <https://www.noticiasdemineracao.com/produ%C3%A7%C3%A3o/news/1399430/brasil-vai-exportar-ur%C3%A2nio-e-cortar-compra-de-fertilizantes-se-projeto-prosperar>

4.2 Reator Multipropósito

O Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) vem sendo desenvolvido sob responsabilidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por meio de sua Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento (DPD) (IPEN, 2021).

O projeto do RMB prevê um reator de piscina aberta, com potência máxima de 30 MW, tendo como referência o Reator Nuclear OPAL, de 20 MW, projetado pela INVAP (empresa argentina) e construído na Austrália (IPEN, 2021).

Segundo o IPEN (2021), os objetivos das instalações nucleares e radioativas associadas ao RMB são:

- produção de radioisótopos e radiofármacos para atender a demanda nacional;
- irradiação e teste de combustíveis nucleares e materiais estruturais; e
- desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas utilizando feixes de nêutrons.

Os benefícios tecnológicos dos radioisótopos advêm de sua diversificada aplicação em: saúde (medicina nuclear), agricultura, meio ambiente e indústria, entre outras (IPEN, 2021).

A empresa estatal AMAZUL participa do projeto RMB, agregando a experiência e qualificação de seus funcionários, adquiridas nos trabalhos desenvolvidos no Programa Nuclear da Marinha (IPEN, 2021). Há grandes possibilidades de aplicação desse projeto, principalmente incorporando novas tecnologias. O projeto vale-se da histórica cooperação entre o Brasil e a Argentina, descrita a seguir.

Em 18 de julho de 1991, brasileiro e argentinos assinaram, em Guadalajara, o Acordo Bilateral para o Uso Exclusivamente Pacífico da Energia Nuclear. O acordo de Guadalajara criou a ABACC (Agência Brasileiro Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares), órgão bilateral para aplicar e administrar o sistema comum de contabilidade e controle⁶. Após ser aprovado pelos respectivos parlamentos, o Acordo Bilateral entrou em vigor em dezembro de 1991.

Em 13 de dezembro de 1991 foi assinado o Acordo Quadripartite, documento que abarca, além de Argentina e Brasil, a ABACC e a AIEA, e compõe o Acordo de Salvaguardas Abrangentes (CSA – *Comprehensive Safeguards Agreement*) de Argentina e Brasil junto à AIEA, documento formal que estabelece procedimentos para aplicação de salvaguardas, como parte do regime de não proliferação de armas nucleares.

⁶ SCCC - Sistema Comum de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares.

A menção à ABACC é relevante para entender o espírito de cooperação técnica entre Brasil e Argentina na temática de utilização da energia nuclear, comprometida com o regime internacional de não proliferação de armas nucleares. A Argentina possui tecnologia de construção de reatores compactos reconhecida internacionalmente. Destaca-se o projeto de desenvolvimento do Reator CAREM 25, por sua *Comisión Nacional de Energía Atómica* – CNEA e pela empresa INVAP, entre outros parceiros.

Iniciado em 1984, o CAREM 25 é um PWR do tipo modular simplificado (SMR) de 100 MWt com geradores de vapor integrados, projetado para geração de eletricidade (29 MWe brutos, 25 MWe líquidos), para uso como reator de pesquisa e até para dessalinização de água. O projeto inova no sistema de refrigeração primário, localizado dentro do vaso de pressão do reator (11m de altura, 3,5m de diâmetro), autopressurizado e baseado em convecção, o que contribui para sua segurança operacional. Assim, a INVAP torna-se um relevante ator para o Brasil por ser a empresa contratada, em maio de 2013, para construir o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB).

4.3 Fusão Nuclear para o Brasil

Na qualidade de Santo Graal da energia do futuro, o Brasil necessita engajar-se mais nas pesquisas relacionadas a esse conhecimento. A participação no ITER é um avanço, mas espera-se que um país como o Brasil deva ser mais proativo nessa área.

É verdade que os custos nesse campo de pesquisa são muito altos e com resultados ainda incertos. Contudo, há uma expectativa entre os pesquisadores do ITER de que os avanços obtidos apontam para resultados promissores. Um Estado que não busque inserir-se nesse processo pode perder o “bonde da história”.

4.4 Cenários Futuros Possíveis para o Brasil

Podem ser visualizados alguns cenários futuros para o setor nuclear no Brasil, desde um favorável até um desfavorável. Os autores deste artigo selecionaram dois cenários, elaborados levando em conta os seguintes fatores críticos: pesquisa e desenvolvimento (P&D) no setor nuclear; eficiência energética; tratamento de resíduos; e compactação dos reatores.

Um cenário favorável poderia ocorrer com o sucesso do Programa do SCPN, servindo de base para a padronização de reatores compactos, a partir do reator desenvolvido para o submarino. Esses reatores poderiam ser também utilizados no fornecimento de energia elétrica e dessalinização para pequenas cidades em locais remotos do Brasil. Adicionalmente, o sucesso do RMB fomentaria desenvolvimento na indústria, no agronegócio, na medicina, entre outros. Além disso, a questão da sustentabilidade no setor nuclear avançaria pelo aproveitamento cada vez mais eficiente dos resíduos. A fusão nuclear, no entanto, não deve se concretizar nos próximos cinco anos, havendo a necessidade de continuar as pesquisas, abrindo espaço para a maior participação brasileira no processo.

Um cenário desfavorável poderia ocorrer com o sucesso do ITER viabilizando os reatores de fusão, ampliando o distanciamento tecnológico entre o Brasil e os países líderes do consórcio. Apesar do eventual sucesso do Programa do SCPN e da possível padronização de reatores compactos, os reatores de fusão começariam a dominar o mercado de energia global, tornando obsoletas as tecnologias de fissão nuclear, e deixando o Brasil fora desse novo circuito tecnológico.

Esses dois cenários enfatizam os seguintes pontos relevantes para considerações estratégicas:

– o futuro reserva um lugar de destaque para a energia nuclear, principalmente por sua eficiência energética associada às possibilidades de reaproveitamento de

material radioativo das usinas que, além de contribuírem para uma matriz energética mais sustentável, mostram-se úteis como fontes de energia capazes de atender as necessidades da exploração espacial;

– o programa SCPN do Brasil traz um arrasto tecnológico relevante para a sociedade brasileira e que pode levar o Brasil para uma posição significativa no concerto das nações;

– a fusão nuclear é um tema que exige maior atenção dos decisores estratégicos nacionais.

Considerações Finais

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica existem, atualmente, 442 reatores nucleares operando em 32 países ao redor do mundo e fornecendo um terço da eletricidade mundial com baixas emissões de carbono. Há ainda 53 reatores nucleares em construção.

A energia nuclear tem um histórico comprovado de fornecimento de energia confiável, acessível e livre de carbono, ao mesmo tempo em que estimula as economias locais onde as usinas estão localizadas. Com crescente apoio tanto de políticas domésticas quanto de organizações internacionais, a energia nuclear tem um papel inegável na abordagem da crise climática (Derr, 2022).

O Brasil pode ser considerado um ator relevante na questão nuclear em virtude de possuir projetos consistentes de utilização da energia nuclear (fissão nuclear), contudo, quando se fala em fusão nuclear, o País ainda necessita de um maior esforço que, face ao distanciamento tecnológico, indica para um caminho mais longo a ser percorrido. Um esforço isolado parece inviável, mas participando mais ativamente em pesquisas existentes, o País pode garantir um lugar na exploração dessa energia potencialmente ilimitada.

O artigo procurou identificar alguns futuros possíveis para o País, destacando algumas possibilidades e alertando para os riscos de ficar à margem dos avanços em fusão nuclear. Ao lembrar os desafios vencidos pelos pesquisadores nacionais ao longo da história e os resultados atingidos, é possível vislumbrar um papel relevante para o nuclear na matriz energética em um futuro próximo, de curto prazo.

Referências

AIEA. *Small Modular Reactors*. [Agência Internacional de Energia Atômica, em inglês *International Atomic Energy Agency - IAEA*]. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. Acesso em: 30 jan. 2022.

AIEA. *International fusion activities and the IAEA's role*. [Agência Internacional de Energia Atômica, em inglês *International Atomic Energy Agency - IAEA*]. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/fusion>. Acesso em: 30 jan. 2022a.

ANS. Time Dependence of Fission Energy Deposition in Nuclear Thermal Rockets. [*National Aeronautics and Space Administration – NASA, Aerospace Nuclear Science and Technology Division Universities Space Research Association – ANS*]. In: *Nuclear and Emerging Technologies for Space*, NASA-NETS. P 260-269, Feb. 2015.

ANS. Preliminary Design Study of an Innovative High-Performance Nuclear Thermal Rocket Utilizing LEU Fuel – NASA, *Aerospace Nuclear Science and Technology Division Universities Space Research Association – ANS*. In: *Nuclear and Emerging Technologies for Space*, NASA-NETS. P 58-67, Feb. 2015.

ANS. Nuclear and Thermal Hydraulic Design for a Low-Enriched Nuclear Thermal Rocket. [*National Aeronautics and Space Administration – NASA, Aerospace Nuclear Science and Technology Division Universities Space Research Association – ANS*]. In: *Nuclear and Emerging Technologies for Space*, CONFERENCE PROCEEDINGS-NETS, P 9-18, 2017.

ANS. Control System Requirements for a Nuclear Thermal Propulsion System. [*National Aeronautics and Space Administration – NASA, Aerospace Nuclear Science and Technology Division Universities Space Research Association – ANS*]. In: *Nuclear and Emerging Technologies for Space*, CONFERENCE PROCEEDINGS-NETS, P 108-117, 2017.

ANS. Abou-Jaoude, Abdalla PARAMETRIC EVALUATION OF ALTERNATIVE NUCLEAR PROPULSION CORES USING CURVED FUEL. [*National Aeronautics and Space Administration – NASA, Track 2: Nuclear Fission Power and Propulsion – ANS*]. In: *Nuclear and Emerging Technologies for Space, CONFERENCE PROCEEDINGS, NASA-NETS*. P 1-4, Abr. 2022.

BRASIL. INB-Caetité volta a produzir urânio para geração de energia no Brasil. Ministério de Minas e Energia 2021. Disponível em: http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9lcdBICN/content/inb-caetite-volta-a-produzir-uranio-para-geracao-de-energia-no-brasil. Acesso em 7 dez. 2020.

_____. Nosso Patrono. [Marinha do Brasil – Diretoria-Geral do Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha]. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dgdntm/node/71>. Acesso em 22 abr. 2021.

CDTN. (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear). Relatório de Atividades (2015 – 2018). Rejeitos Radioativos, p. 21. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/62615943/cdtn-centro-de-desenvolvimento-da-tecnologia-nuclear>.

Derr, E., O que esperar da Energia Nuclear em 2022?. Nuclear Energy Institute. Disponível em: <https://www.nei.org/news/2022/whats-next-for-nuclear-in-2022> Acesso em: 06 jan. 2022.

FAPERJ. Paula Guatimosin. Utilização do Grafeno pode reduzir volume do rejeito radioativo em 90%. Disponível em: <http://www.faperj.br/?id=3914.2.8>. 23 jan. 2020.

FGV CPDOC. O programa nuclear brasileiro: uma história oral. Fundação Getúlio Vargas [organização: Carlo Patti], 270 p. ISBN 978-85-60213-12-2, 2014.

FORONUCLEAR. *What is a floating nuclear power plant?* In: *World Nuclear News*, MIT. Disponível em: <https://www.foronuclear.org/en/updates/in-depth/what-is-a-floating-nuclear-power-plant/>. Acesso em 30 jan. 2022.

GALANTE, A., Poder Naval na Proteção da Amazônia Azul. *O Periscópio*, Rio de Janeiro, ano XLVII, n. 65, p. 162-165, 2012.

_____. Desenvolvimento Nuclear da Marinha. *Marinha em Revista*, Brasília, ano 04, n. 10, p.10-14, jun 2014.

GONÇALVES, M. F. S., Aplicação da tecnologia de plasma na rede de logística reversa de rejeitos radioativos. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021.

GUIHARD, B. Industrial and environmental applications of non transferred plasma. International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, New Orleans, USA, 2002.

GUIMARÃES, L.S.; MATTOS, J. R. L. de., A Opção Nuclear para Contribuir com uma Produção Limpa e Sustentável de Eletricidade. 3rd Workshop International | Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2011.

GUIMARÃES, L. S., Doutrina construir para evoluir: questões para reflexão sobre o submarino nuclear. Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, v. 132, n. 07/09, p. 17-18, jul/set 2012.

HECHT, L. A. R., Histórico do desenvolvimento da propulsão nuclear no Brasil. O Periscópio, p. 46-55, 2018.

INB. Indústrias Nucleares do Brasil. INB Caetité. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Caetite> . Acesso em 1 nov. 2021.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Reator de fusão nuclear bate novo recorde de energia. In: Inovação Tecnológica. 9 fev. 2022. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=reator-fusao-nuclear-bate-novo-recorde-energia&id=020115220209&ebol=sim>. Acesso em: 26 fev. 2022.

IPEN. [Instituto Pesquisas Energéticas e Nucleares]. Reator Multipropósito Brasileiro. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=2773. Acesso em: 1 dez. 2021.

LIMA, Armando de Oliveira, Urânio no CE: projeto Santa Quitéria é retomado com US\$ 400 mi de investimento e deve atender agro. Diário do Nordeste. 27 set. 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/uranio-no-ce-projeto-santa-quiteria-e-retomado-com-us-400-mi-de-investimento-e-deve-atender-agro-1.2993620>. Acesso em: 1 nov. 2021.

LIMA, M. C. A., Fundamentação Estratégica do Emprego Coordenado dos Submarinos Convencionais e Nucleares no Espaço Geopolítico do Atlântico Sul. O Periscópio, Rio de Janeiro, ano XLIX, n. 67, p.24-38, 2019.

LOHBAUER, C.; SILVA, M. R., Brasil e Alemanha: a Importância dos acordos na área nuclear entre 1964-1999 e as fases de uma parceria. São Paulo: Fundação *Konrad Adenauer*, 2001.

MARQUES, A. L. F., Aspectos do acordo nuclear entre Brasil e Alemanha. *Revista Austral*. UFRGS, Porto Alegre, p.36-49, 2016.

MARTINS, E. A. P., Por que precisamos de um Submarino Nuclear? *Marinha em Revista*, Brasília, ano 01, n. 03, p. 22-25, 2010.

NOGUEIRA, Luiz, Reator nuclear compacto é o primeiro do tipo a obter aprovação nos EUA. Ministério de Minas e Energia. *ARS Technica*. 1 set. 2020. Disponível em <https://olhardigital.com.br/noticia/reator-nuclear-compacto-e-o-primeiro-do-tipo-a-obter-aprovacao-nos-eua/106234>. Acesso em: 5 set. 2020.

OLIVEIRA, F. L. M.; SOUZA, F. P., Os Impactos Táticos a partir da incorporação de um Submarino de Ataque. *Marinha em Revista*, Brasília, ano 07, n. 11, p. 27-30, 2014.

STERN, Juliana. IA controla fusão nuclear e abre caminho para energia inesgotável. *In: Tilt*. 18 fev. 2022. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2022/02/18/ia-controla-plasma-de-reator-de-fusao-nuclear.htm>. Acesso em: 26 fev. 2022.

Welle, D., Comissão Europeia afirma que a energia nuclear e a gás podem ajudar o bloco a alcançar a sustentabilidade. *PODER 360*. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/meio-ambiente/ue-quer-rotular-gas-e-energia-nuclear-como-fontes-verdes/> Acesso em: 01 jan. 2022.