

OS PARADIGMAS DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL.

Kleber Saldanha de Siqueira¹

RESUMO: O domínio tecnológico reflete o esforço interno dos países em desenvolver pesquisas científicas capazes de suprir demandas sensíveis da sociedade, projetando-os no cenário mundial. Neste sentido, a economia sofre impacto direto, fortalecendo os setores produtivos e os diferentes segmentos que dependem da inovação como mola-mestra na manutenção de processos tecnológicos. Acompanhando esta realidade, a energia nuclear e sua projeção no cenário brasileiro tem gerado discussões e contrapontos quando apresentada como alternativa diante da atual demanda energética nacional. Sendo assim, este artigo, configurado num estudo bibliográfico de natureza qualitativa-narrativa, tem por objetivo refletir sobre as origens da energia nuclear no Brasil, apresentando sua evolução, principais marcos tecnológicos, seus impactos econômicos e atual estado de desenvolvimento. Para isso, foram reunidos trabalhos publicados entre 1998 e 2023, extraídos dos portais *Scielo* e periódico CAPES, a partir de descritores de busca, critérios de inclusão e exclusão, sendo estabelecidas categorias de análise para a fundamentação das reflexões e discussões apresentadas. Ao final deste estudo, verifica-se que a energia nuclear é uma alternativa viável para o Brasil, dada sua capacidade tecnológica e potencial de investimento, representando uma opção diferencial diante das emergentes questões econômicas e energéticas mundiais.

PALAVRAS-CHAVE: energia; tecnologia nuclear; economia; soberania nacional.

NUCLEAR ENERGY PARADIGMS IN BRAZIL

ABSTRACT: Technological dominance reflects the countries' internal efforts to develop scientific research capable of meeting society's sensitive demands, projecting them onto the world stage. In this sense, the economy suffers a direct impact, strengthening the productive sectors and the different segments that depend on innovation as the mainspring in maintaining technological processes. Following this reality, nuclear energy and its projection in the Brazilian scenario have generated discussions and counterpoints when presented as an alternative to the current national energy demand. Therefore, this article, configured as a bibliographical study of a qualitative-narrative nature, aims to reflect on the origins of nuclear energy in Brazil, presenting its evolution, main technological milestones, its economic impacts and current state of development. To this end, works published between 1998 and 2023 were gathered, extracted from the Scielo and CAPES journals portals, based on search descriptors, inclusion and exclusion criteria, and analysis categories were established to support the reflections and discussions presented. At the end of this study, it appears that nuclear energy is a viable alternative for Brazil, given its technological capacity and investment potential, representing a differential option in the face of emerging global economic and energy issues.

KEYWORDS: energy; nuclear technology; economy; national sovereignty.

¹ Doutorando em Ensino pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestre em Ensino de Física pela UFAL. Graduado em Física pelo Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento econômico e social de um país é fundamental que este possua forte capacidade científica, especialmente voltada para as principais demandas que sustentam a dinâmica mercadológica, o coletivismo social e sua hegemonia no mundo globalizado, sendo condição estratégica na economia contemporânea (DINIZ; DINIZ, 2019). Tal conjuntura tende a impactar de forma decisiva o mecanismo econômico das nações, cada qual, investido no setor tecnocientífico, visando o desenvolvimento de novos processos e paradigmas capazes de aumentar sua influência interna e externa no setor manufatureiro (FAVARO; SEMZEZEM, 2020). Diante disso, os processos de geração de energia, ocupam lugar de destaque por sua importância e determinismo na manutenção de processos vitais para a sociedade em seus diferentes níveis e estrutura. A eletricidade, sendo relevante fonte de energia para um grande número de processos tecnológicos, está na pauta das discussões científicas, nos últimos 60 anos, acerca de sua geração sustentável e uso racional.

Dentre as diversas formas de geração de eletricidade, a energia baseada na matriz nuclear e sua evolução histórica, vem reconfigurando de forma progressiva antigos paradigmas, ideias e estigmas relacionados aos processos nucleares, inicialmente vistos como perigosos à humanidade e ao meio ambiente (IMMICH *et al*, 2023). Com o aperfeiçoamento dos reatores e surgimento de novas tecnologias e instrumentação no estado da arte para o monitoramento e controle destes processos, a energia nuclear vem consolidando-se nas últimas quatro décadas como uma solução eficiente e segura para a geração de eletricidade, principalmente em países onde existe escassez de recursos ambientais, inviabilizando processos baseados na sua hidrografia, relevo, clima e padrões meteorológicos. Favorecendo este cenário Pereira (2019) destaca que:

Mesmo quando toda a energia consumida no processo produtivo do combustível nuclear é considerada, particularizando-se em seus diferentes estágios os gastos com as fontes de energia neles utilizadas (carvão, óleo, hidro, nuclear, etc.), ainda assim o balanço geral é extremamente favorável para a energia nuclear (PEREIRA, 2019, p. 8).

Em contrapartida, o Brasil, mesmo possuindo uma malha hidrográfica que favorece a construção de usinas hidrelétricas, parques eólicos e sistemas baseados na energia solar, a energia nuclear mesmo constituindo fração de 2% do total energético gerado no país, é capaz de atender às demandas a ela direcionadas.

Este cenário não torna o Brasil independente da energia nuclear, uma vez que o domínio tecnológico dos processos nucleares vai além da geração de eletricidade, impulsionando relevantes pesquisas nos setores civil e militar.

O aperfeiçoamento da tecnologia nuclear e suas possibilidades reafirma o poder científico das nações que desenvolvem, valoram, utilizam e exploram sistemas baseados na força do átomo, alcançado hegemonia e desenvolvimento. Neste sentido, este artigo, estruturado na forma de um estudo bibliográfico de natureza qualitativa-narrativa, tem por objetivo refletir sobre o atual papel da energia nuclear no Brasil, apontando seus impactos na economia, desenvolvimento tecnocientífico e projeção mundial. Para isso, foram consultados trabalhos publicados entre 1998 e 2023, selecionados por meio de descritores de busca, critérios de inclusão e exclusão e categorias de análise, objetivando fundamentar as discussões apresentadas ao longo do trabalho.

Este artigo está dividido em oito seções, iniciando com a introdução, reunindo os objetivos e motivações da pesquisa, seguida da seção dois, que destaca o processo metodológico, reforçando a importância do estudo bibliográfico como instrumento de pesquisa científica, com ênfase no caráter narrativo-qualitativo deste processo. Ao mesmo tempo são apresentados os descritores de busca utilizados e elencados os critérios de inclusão e exclusão, finalizando com as categorias de análise utilizadas no estudo do referencial bibliográfico selecionado. A seção três destaca a linha temporal da tecnologia nuclear no Brasil desde as primeiras pesquisas e estabelecimento dos primeiros centros de pesquisa, passando pelo seu aprimoramento nos anos 70 e 80. Os principais eventos econômicos resultantes do desenvolvimento e uso dos processos nucleares são discutidos na seção quatro.

Na seção cinco são apresentados os principais marcos tecnológicos oriundos da pesquisa nuclear no Brasil com destaque na produção nacional de reatores e tecnologias originadas da pesquisa brasileira. Analisando o atual cenário da energia nuclear no Brasil, a seção seis discute os principais problemas enfrentados pela indústria e pesquisa nacional para a solução de problemas tecnológicos importantes e hegemonia brasileira no setor. A seção sete reúne as principais conclusões extraídas das discussões e reflexões propostas ao longo do trabalho, ao mesmo tempo estimulando novas reflexões e posteriores pesquisas centradas no tema energia nuclear no Brasil.

METODOLOGIA

A revisão bibliográfica constitui importante meio investigativo através do qual é possível delimitar a abrangência teórica de determinado domínio de pesquisa (RICHARDSON, 2009). Caracterizada pela busca, análise e interpretação de um

conjunto bibliográfico consolidado capaz de subsidiar reflexões acerca de dado fenômeno em estudo, este método apresenta diversas vantagens para o pesquisador, economizando tempo, fornecendo dados, resultados e adensando discussões, tornando possível ao pesquisador inferir juízo crítico-interpretativo na explicação do fenômeno em tela.

Sendo assim, esta pesquisa baseia-se num estudo bibliográfico de natureza narrativa-qualitativa, reunindo trabalhos publicados nos portais *Scielo* e periódico CAPES, entre 1998 e 2013. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes descritores de busca, aplicados a ambos os portais: (1) '*energia nuclear no Brasil*', (2) '*programa nuclear brasileiro*', (3) '*desenvolvimento nuclear brasileiro*', (4) '*política nuclear brasileira*' e (5) '*tecnologia nuclear brasileira*'. Ao mesmo tempo, objetivando o refinamento do quantitativo de trabalhos inicialmente encontrados, foram estabelecidos os critérios de inclusão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios de inclusão adotados para o refinamento do esteio bibliográfico.

| Critério de inclusão | Considerações |
|--|--|
| Trabalhos com mais de 50% de sua base bibliográfica formada por artigos. | Isso permite selecionar trabalhos com fundamentação teórica atual, baseados em pesquisas consolidadas. |
| Trabalhos publicados em periódicos <i>Qualis Capes A₁-B₃</i> . | Considera-se importante atentar para a qualidade científica dos trabalhos selecionados. |
| Trabalhos reproduzíveis. | A possibilidade de reproduzir estudos gera confiabilidade científica dos resultados analisados. |
| Trabalhos com pelo menos 8 páginas. | Pesquisas com este quantitativo mínimo de páginas explicitam de forma objetiva os resultados obtidos em seus estudos. |
| Trabalhos com estrita relação com os descritores de busca utilizados. | É importante garantir congruência entre o escopo da pesquisa em curso e os trabalhos selecionados para constituir sua base bibliográfica. |
| Trabalhos com dados empíricos e forte viés teórico. | Para a qualidade de uma pesquisa, faz-se necessário reunir dados congruentes com sua fundamentação teórica. |
| Trabalhos em língua portuguesa. | Considerando que a pesquisa objetiva o mapeamento e análise do setor nuclear brasileiro, foram reunidos apenas trabalhos publicados por pesquisadores brasileiros. |

Fonte: Autor (2024).

De forma semelhante, foram estabelecidos os critérios de exclusão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios de exclusão adotados para o refinamento do esteio bibliográfico.

| Critério de exclusão | Considerações |
|---|--|
| Literatura cinzenta (<i>gray literature</i>). | Trabalhos desprovidos de rigor científico, publicados por periódicos, portais ou outros diretórios sem confiabilidade acadêmica. |
| Trabalhos com fragilidades metodológicas. | Sendo o processo metodológico de extrema importância para os resultados de uma pesquisa, este deve ser robusto e consistente. |
| Trabalhos duplicados. | Mais de um portal pode conter o mesmo trabalho. |
| Trabalhos não avaliados ou em processo de avaliação <i>Qualis-Capes</i> . | A qualidade dos trabalhos publicados relacionam-se com o periódico ao qual estão vinculados. |
| <i>Preprints</i> | De forma geral, <i>preprints</i> não correspondem a publicações concretas. |
| Trabalhos com menos de 15 referências bibliográficas. | A fundamentação teórica de uma pesquisa depende fortemente da consistência e extensão do seu referencial teórico. |
| Trabalhos oriundos de pesquisas em curso/inconclusivas. | Pesquisas em andamento ou com resultados preliminares não podem ser usadas dado seu caráter volátil e contínuo aperfeiçoamento teórico/metodológico. |

Fonte: Autor (2024).

Após a aplicação dos descritores de busca, foram reunidos 641 trabalhos, dos quais 79 foram extraídos do portal *Scielo* e 562 do portal periódico CAPES. Considerando os critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados ao todo 258 trabalhos, destes, após análise preliminar e posterior leitura integral, foram selecionados 19 artigos (5 presentes no portal *Scielo* e 14 no periódico CAPES). Excluem-se deste processo, 3 livros e 10 notícias extraídas de portais especializados em tecnologia nuclear. O Quadro 3, apresenta e analisa os trabalhos selecionados, destacando os objetivos de pesquisa e as categorias de análise estabelecidas para cada um.

Quadro 3 - Análise das obras selecionadas para o corpo bibliográfico da pesquisa.

| Título | Autor(es) | Ano de publicação | Objetivo de pesquisa | Categoria de análise | Diretório |
|---|---|--------------------------|--|--|---|
| A dinâmica política da criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear | ANDRADE , Ana Maria Ribeiro de; SANTOS, Tatiane Lopes dos | 2013 | Compreender a conjuntura política que impulsionou a política nuclear brasileira em seus primórdios, identificando os principais marcos tecnológicos e o surgimento das primeiras agências de pesquisa nacionais para o setor nuclear. | Primeiras políticas nucleares brasileiras. | https://www.scielo.br/j/bgoeldi/a/L_Sv4GCKhVfZyGpcMgXFm78M/ |
| Ditadura, política nuclear e interesses empresariais: a participação da Siemens no acordo de cooperação nuclear Brasil-Alemanha | BRANDÃO , Rafael Vaz da Motta | 2020 | Analisar o contexto político-empresarial que determinou os primeiros acordos internacionais que permitiram ao Brasil expandir suas pesquisas em energia atômica, destacando seus benefícios, erros e contrapontos diante dos interesses alemães. | Nuances (organização) do acordo nuclear Brasil-Alemanha. | https://revistas.unifacs.br/index.php/continentes/article/view/275 |
| História das usinas nucleoeletricas no Brasil | CABRAL, Anya | 2011 | Determinar os principais eventos históricos relacionados ao desenvolvimento nuclear nacional e como estes articulam-se com os interesses internos e externos da nação. | Surgimento das primeiras usinas nucleares brasileiras. | https://revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/viewFile/1639/1440 |
| A energia nuclear no Brasil: histórico e resultados | CARVALHO, Carlos Alberto Aragão de, BIGNARDI , Hudson Lucio | 2021 | Mapear os principais resultados da política nuclear brasileira e seus resultados mais expressivos, delimitando o sucesso desta iniciativa a partir dos principais avanços evidenciados no setor. | História da energia nuclear no Brasil. | http://www.ree.uff.br/index.php/ree/article/view/260 |
| Ideias, interesses e escolha racional: o | CHAVES, Rodrigo Moraes | 2018 | Reunir informações acerca da atuação do congresso na defesa dos interesses | Postura política brasileira no acordo nuclear Brasil-Alemanha. | https://periodicos.uff.br/index.php/csonline/art |

| | | | | | |
|--|--|------|--|---|---|
| congresso nacional e o acordo nuclear Brasil-Alemanha | | | brasileiros no setor nuclear, analisando qual a postura brasileira na defesa de seus interesses diante de pressões externas. | | icle/view/17398 |
| Pesquisa científica, conhecimento e educação: reflexões sobre sua importância econômica e social | DINIZ, Márcia Jucá Teixeira; DINIZ, Marcelo Bentes | 2019 | Compreender como o desenvolvimento tecnocientífico influencia a dinâmica econômica dos países, tornando-os competitivos e mercadologicamente atrativos no cenário globalizado. | Desenvolvimento científico e economia. | https://periodicos.ufpa.br/index.php/cepec/article/view/8316/6098 |
| A produção científica subjugada à lógica econômica: elementos para uma análise crítica | FAVARO, Neide de Almeida Lança Galvão; SEMZEZE M, Priscila | 2021 | Investigar como o desenvolvimento científico e tecnológico movimenta a economia interna dos países e como este fenômeno impacta as relações econômicas e o comércio mundial. | Relações entre desenvolvimento econômico e ciência. | https://periodicos.uninove.br/eccos/article/view/10655 |
| Energia nuclear: uma opinião da sua relação com a sustentabilidade | IMMICH, Vinicius; WEBER, Fernanda Hart; CLASEN, Barbara Estevao; LANZANO VA, Luciane Sippert; LANZANO VA, Mastrângelo Enívar | 2023 | Analisar o atual cenário da energia nuclear como fonte congruente com os atuais princípios de sustentabilidade e preservação do meio ambiente, compreendendo como a tecnologia pode ser concebida a partir de ideias de preservação. Ao mesmo tempo, delimitar avanços tecnológicos no setor nuclear que demonstrem a possibilidade de expansão dessa energia nas próximas décadas como energia limpa. | Tecnologia nuclear para a preservação do meio ambiente. | https://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/3474 |
| Uma breve história da política nuclear brasileira | KURAMOTO, Renato Yoichi Ribeiro | 2002 | Coletar importantes eventos históricos da política nuclear nacional, reunindo nomes, iniciativas, resultados e avanços desta política. | Marcas da política nuclear brasileira. | https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6612/6104 |

**Universidade Federal Fluminense
Instituto de Estudos Estratégicos**

| | | | | | |
|--|---|------|---|---|---|
| Potencial Uranífero no Brasil: uma revisão bibliográfica | LIMA, Fernanda Silva; SILVA FILHO, Wilson Seraine da | 2021 | Destacar as principais potencialidades minerais brasileiras referente à exploração de urânio, número de jazidas, extensão e potencial para a indústria nuclear nacional e estrangeira. | Capacidade extrativa de urânio no Brasil. | https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/31365/pdf/80208 |
| A política industrial chinesa como determinante de sua estratégia <i>going global</i> | MASIERO, Gilmar; COELHO, Diego Bonaldo | 2014 | Avaliar as estratégias econômicas chinesas frente ao mercado externo e como essas vêm firmando-se durante as últimas décadas por meio de estratégias de investimento e domínio de capital. | Posicionamento econômico chinês e persuasão financeira. | https://www.scielo.br/j/rep/a/5BPpHbQyrTrrtKjqcCncTXM/ |
| Visões civis sobre o submarino nuclear brasileiro | MARTINS FILHO, João Roberto | 2014 | Compreender, a partir da perspectiva de analistas civis, o trajeto desenvolvimentista do programa nuclear da Marinha brasileira, destacando suas implicações para o setor tecnocientífico militar nacional e seus possíveis desdobramentos. | Projeção tecnológica do programa nuclear da Marinha na ciência nacional. | https://www.scielo.br/j/bcsoc/a/VJRRGQRSfPb3XPks6XSY69q/ |
| As bombas atômicas podem dizimar a humanidade – Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos | OKUNO, Emico | 2015 | Reunir informações, delimitar eventos históricos e relacionar a tecnologia nuclear moderna com a atual conjuntura energética mundial. | Energia nuclear e desenvolvimento armamentista, aspectos passados e contemporâneos. | https://www.scielo.br/j/ea/a/9s86bRNRXrHyRTj8xz4pZh/ |
| Território em risco: discussão acerca dos impactos da implantação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) em Angra dos Reis – RJ | OLIVEIRA, César Antônio de; GIACOMO, Leonardo | 2020 | Analisar as principais implicações na construção das usinas de Angra, avaliando seus impactos, históricos de insucessos, falhas de projeto e deterioração do meio ambiente e impacto populacional. | Erros e acertos na construção das usinas de Angra. | https://revistamaster.emnuvens.com.br/RM/article/download/175/90 |
| | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|------|--|---|---|
| Energia nuclear: da energia inesgotável à energia limpa | PEREIRA, Newton Müller | 2019 | Compreender a evolução da energia nuclear como fonte adequada capaz de suprir a crescente demanda energética mundial, destacando suas potencialidades e mudanças de paradigmas quanto à segurança e preservação ambiental. | Evolução paradigmática da energia nuclear no mundo. | https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/147/130/ |
| Importância da transferência de tecnologia realizada nas universidades brasileiras para a alavancagem da competitividade do país no cenário econômico mundial | ROMAN, Vinícius Bortolussi, LOPES, Marco Túlio de Paula | 2012 | Investigar os impactos positivos do processo de transferência de tecnologia, bens tangíveis e intangíveis, seus impactos na economia e desenvolvimento científico nacional. | Processos de transferência tecnológica e importância. | https://incubadora.periodicos.ufsc.br/index.php/IJIE/article/download/2089/pdf/8331 |
| O Programa nacional de atividades espaciais frente aos embargos Tecnológicos | SANTOS, Reginaldo | 1999 | Compreender os principais mecanismos estratégicos usados pelas nações desenvolvidas para suplantarem países com tecnologia em ascensão, na busca pelo controle econômico externo. | Estratégias agressivas de controle econômico e mercado. | https://seer.cgee.org.br/parcerias/estrategicas/article/view/95 |
| Repensando a energia nuclear | SOVACCO L, Benjamin K | 2012 | Reunir informações capazes de evidenciar como a energia nuclear no mundo vem sendo ressignificada a partir da necessidade de expansão energética global. | A energia nuclear como nova alternativa. | https://www.scielo.br/j/ea/a/gSddGFx3CJdq8dfsjDBFH3f/ |
| O modelo atômico de Bohr e o início da mecânica quântica | VELASQUEZ-TORIBIO, Alan Miguel | 2022 | Destacar elementos da fenomenologia atômica presentes nos sistemas nucleares. | Interação atômica e processos nucleares em reatores. | https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/download/35812/24704/118726 |

Fonte: Autor (2024).

OS PRIMEIROS PASSOS DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

Os processos nucleares, em seu domínio teórico, davam seus primeiros passos com o desenvolvimento da Física Quântica, tornando possível manipular o átomo, sua estrutura e fenômenos interacionais, *átomo-átomo* e *radiação-átomo* (VELASQUEZ-TORIBIO, 2022). O primeiro indício desta possibilidade veio com o final da Segunda Grande Guerra em maio de 1945, momento em que o mundo foi apresentado às armas nucleares e à sua espantosa capacidade de destruição, sendo esta a primeira impressão registrada pela humanidade, considerando os efeitos devastadores causados nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki (OKUNO, 2015). No entanto, logo após a Segunda Guerra, paralelamente à reconstrução da Europa e Japão, as pesquisas voltadas para o uso pacífico da energia nuclear ganharam força, sendo empreendido esforço científico para transformar o potencial energético das armas nucleares em sistemas capazes de beneficiar a humanidade.

Especificamente no Brasil, as primeiras pesquisas voltadas para o uso pacífico da energia nuclear, iniciaram em meados de 1947, a partir dos trabalhos do então Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva, redigindo a primeira política nuclear brasileira, analisada e aprovada pelo Conselho de Segurança Nacional (CSN) (CARVALHO; BIGNARDI, 2021). Este cenário foi favorecido pela lei *MacMahon*, instituída pelo governo norte-americano, que restringia o intercâmbio e cooperação científica dos EUA, no campo das pesquisas nucleares, sendo este assunto tratado como questão de segurança nacional, uma vez que os norte-americanos eram, até então, os únicos a dominarem a tecnologia nuclear no mundo. (KURAMOTO, 2002). Estes entraves estimularam a pesquisa nacional, sendo criado em 1951, pelo então Presidente Getúlio Vargas, o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), para o qual, foi indicado o Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva como presidente, sendo-lhe dada a tarefa de estimular estudos em mineralogia e exploração mineral com potencial econômico e tecnológico nuclear (BRANDÃO, 2020).

Tentando burlar a política protecionista norte-americana, o Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva, após acordo secreto firmado com o governo alemão, tentou realizar a construção de três ultracentrífugas, utilizando tecnologia nazista, visando dominar o processo de enriquecimento de urânio utilizado na época, buscando colocar o Brasil na vanguarda do processo. No entanto, após vazamento de informações, as três ultracentrífugas foram confiscadas pelo governo norte-americano, antes mesmo de chegarem ao Brasil. No ano de 1955, após várias tentativas do Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva de colocar o Brasil como

desenvolvedor de tecnologia nuclear, este renuncia à presidência do CNPq, durante a presidência de Café Filho, após este assinar um acordo com os EUA, no qual o Brasil forneceria areias monazíticas² em troca de trigo norte-americano. Entre o final dos anos 40 e início dos anos 60 o Brasil apresentou lento progresso nas pesquisas nucleares, sendo este desenvolvimento acelerado nas décadas seguintes, principalmente com a chegada dos militares ao poder, os quais buscaram incentivar o desenvolvimento tecnológico nuclear nacional dados seu valor estratégico.

Antes dos militares assumirem o país em 1964, o então presidente Juscelino Kubitschek criou a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1956, contrapondo-se às exportações de areias monazíticas firmadas por Café Filho (ANDRADE; SANTOS, 2013). Este cenário concorria com disputas ideológicas nas quais nacionalistas defendiam o desenvolvimento autônomo da tecnologia nuclear brasileira, formados principalmente por políticos e representantes das forças armadas. Este grupo era antagônico àqueles que defendiam maior aproximação com os EUA e o fortalecimento dos acordos de cooperação tecnológica firmados com os norte-americanos. Dessa forma, com o estabelecimento do governo militar, a política tecnológica nuclear brasileira assumiu caráter autônomo, sendo a construção de parques industriais e usinas geradoras de eletricidade a principal prioridade do governo, o que a longo prazo, permitiu ao Brasil dominar o ciclo do combustível nuclear, aperfeiçoar técnicas e assinar acordos de cooperação tecnológica com outras nações, principalmente a Alemanha.

Ainda no início da década de 60, o primeiro reator nuclear brasileiro de pesquisa, o Argonauta, ficou pronto em 1962, sendo colocado em operação apenas em 1965. Este reator foi instalado nas dependências do Instituto de Energia Nuclear (IEN), na cidade do Rio de Janeiro, concebido a partir de projeto norte-americano, cuja gênese remonta ao Laboratório Nacional de Argonne nos EUA. Nesta época, a política protecionista norte-americana, apesar de ainda ativa, já permitia certa abertura para a transferência de tecnologia nuclear a países parceiros. Sendo o Brasil um parceiro neste acordo, em 1968 o governo firmou contrato para a compra de um reator norte-americano de água pressurizada, projetado pela empresa *Westinghouse Electric Corporation*, visando a construção da primeira usina nuclear brasileira em Angra dos Reis (CABRAL, 2011). A efetivação deste projeto ficou a cargo da FURNAS Centrais Elétricas, subsidiária da Eletrobrás, sendo o combustível do reator, urânio enriquecido, também fornecido pelos EUA.

² Areia constituída por metais pesados, principalmente tório, de grande incidência no Brasil, usada para o desenvolvimento de substâncias radioativas artificiais. Durante os anos 50, os EUA demonstraram interesse na aquisição desta areia, estando o Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva à frente de várias negociações, balizando os interesses brasileiros.

Batizada de Angra - I, a primeira usina nuclear brasileira passou por diversos problemas de projeto, eficiência operativa, além de gerar discussões acerca da sua construção numa área inadequada devido a falhas geológicas presentes na região da usina. No entanto, no início dos anos 70 a parceria Brasil-Alemanha trouxe razoáveis avanços para a tecnologia nuclear nacional, principalmente nas pesquisas voltadas para o enriquecimento de urânio, tecnologia de reatores, instrumentação e controle de processos (CHAVES, 2018). Com a celebração do acordo, a parceria inicial com a *Westinghouse* foi extinta, sendo criada, por força do Decreto 76.803 em 16 de dezembro de 1975, a Nuclebrás Engenharia S.A., empresa estatal responsável pelo gerenciamento e cumprimento dos acordos entre o Brasil e a Alemanha. Do lado alemão, a empresa *Kraftwerk Unio*, realizava tarefa semelhante àquela desempenhada pela Nuclebrás.

Marcado por imprecisões, superdimensionamentos e financiamentos duvidosos, o acordo Brasil-Alemanha iniciou seu fim com a paralisação dos projetos de construção das usinas Angra - II e III pelo então presidente João Figueiredo, alegando dificuldades econômicas para o andamento dos projetos. Durante sua existência, dados os indícios de má gestão financeira das atividades técnicas e científicas, marcada pelo superfaturamento, foi criada em 1978 uma Comissão Parlamentar de Inquérito (CPI) para apurar possíveis irregularidades no cumprimento dos contratos firmados. Dado o momento político que vivia o Brasil nesta época, a comissão foi encerrada sem reunir resultados consistentes de sua investigação.

Diante da aparente desmoralização do acordo Brasil-Alemanha, foi criado um programa nuclear de pesquisas, paralelo ao vigente, com forte viés militar, visando a obtenção e desenvolvimento de tecnologia de enriquecimento de urânio e outras técnicas capazes de colocar o Brasil na ponta de lança da energia atômica, principalmente a construção de um submarino nuclear brasileiro, com envolvimento direto do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e da Marinha (MARTINS FILHO, 2014). Com o prosseguimento das pesquisas, houve significativos avanços nas técnicas de enriquecimento de urânio, sendo realizada em 1982, a primeira experiência brasileira com enriquecimento isotópico de urânio utilizando ultracentrífugas projetadas e construídas no Brasil, sendo observado, inicialmente enriquecimento de 1,2%. Com o aperfeiçoamento das pesquisas a taxa de enriquecimento tornou-se próximo de 3%, concentração considerada ideal para o urânio usado no reator de Angra - I.

Com o progresso das pesquisas e necessidade de transparência (o Brasil vivia seu processo de redemocratização), em 1987, o então Presidente José Sarney assinou o Decreto-lei 2.464, de 31 de agosto de 1988, retirando da 'clandestinidade' o projeto paralelo, ao mesmo tempo restabelecendo a construção

das usinas nucleares de Angra - II e III, mesmo diante dos graves problemas econômicos vivenciados pelo Brasil naquela época (OLIVEIRA; GIACOMO, 2020). Apenas em 1995 a Marinha removeu o *status* de programa 'paralelo' das suas atividades de pesquisa em energia atômica, sendo estas centradas em tecnologia de reatores, produção e enriquecimento de combustível nuclear.

IMPACTOS ECONÔMICOS IMEDIATOS

Quando se pensa em números, a energia nuclear brasileira destinada à geração de eletricidade ocupa uma fração muito pequena quando comparada ao processo hidrelétrico. Sendo o Brasil detentor de uma expressiva malha hidrográfica, formada por grandes rios e bacias com grande fluxo e extensão, a geração de eletricidade baseada na força dos rios mostra-se atrativa, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico, uma vez que este tipo de processo demanda baixo investimento e recursos materiais acessíveis, quando comparados às usinas nucleares que necessitam de reatores e combustíveis apropriados, além de operadores especialmente qualificados (geralmente no exterior) para o gerenciamento do reator e descarte do combustível consumido no processo. Neste sentido, para Sovacool (2012):

Mesmo as instalações nucleares modernas exigem investimento maciço de capital e levam anos para serem construídas. Uma usina típica com reator de água leve de 1,1 mil megawatts custa entre US\$ 2 e US\$ 3 bilhões para licenciar e construir. Esse valor aumenta ainda mais se forem incluídos os gastos adicionais com armazenamento de resíduos nucleares e a desativação de usinas velhas (SOVACOOOL, 2012, p. 289).

Segundo dados da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) o Brasil possui potencial hidrelétrico estimado em 172 GW, dos quais já foram aproveitados 60%, estando outros 70% localizados nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia. Sendo assim, considerando a demanda energética brasileira e sua capacidade hídrica, a construção de usinas nucleares para suprir a demanda nacional de eletricidade torna-se cara e insuficiente, sendo a geração nacional de energia nuclear direcionada para pequenos setores, constituindo diminuta parcela do consumo total do país, sendo as usinas utilizadas majoritariamente como parques de pesquisa em tecnologia nuclear.

Diante deste cenário, considerando as atuais pesquisas realizadas pelo Brasil no setor atômico, a valoração de tecnologia tangível e intangível neste setor, representa importante elemento para a economia nacional, estando o processo de enriquecimento de urânio no topo da lista das inovações brasileiras no setor. Sendo

muitos países, principalmente da Europa e Leste Europeu, dependentes da energia nuclear para a geração de eletricidade, o desenvolvimento de combustíveis capazes de suprir tal demanda através de processos tecnológicos próprios e com baixo custo, representa importante fator de incremento econômico para o Brasil, o que nas últimas décadas vêm consolidando a tecnologia nacional no setor, principalmente a partir das pesquisas realizadas pela Marinha. Fortalecendo este cenário, o Brasil ocupa lugar de destaque como detentor natural de jazidas de urânio potencializando o setor.

Segundo estudos realizados pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), nosso país ocupa o nono lugar no *ranking* mundial de jazidas de urânio, concentradas em maior número nos estados da Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais (LIMA; SILVA FILHO, 2021). Outrossim, com o crescente aumento dos custos de extração e refino de combustíveis fósseis e suas implicações ambientais, a energia nuclear vem se tornando uma alternativa limpa, dado que nos processos nucleares não há emissão de óxidos de carbono. O primeiro acordo comercial firmado pelo Brasil para a exportação de urânio enriquecido foi celebrado com a Argentina em 2016, no qual, quatro toneladas de urânio, divididos em três lotes enriquecidos a 1,9%, 2,6% e 3,1% foram enviados para um reator localizado na cidade de Lima, norte de Buenos Aires, rendendo para o Brasil US\$ 4,5 milhões (AGÊNCIA BRASIL, 2016). Enriquecido na própria fábrica da INB, através do processo de ultracentrifugação, técnica aperfeiçoada pelo Centro Tecnológico da Marinha juntamente com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, a transferência deste combustível não envolveu intercâmbio de conhecimento.

Dadas as vantagens econômicas do primeiro acordo em 2021, foi celebrado um segundo contrato, também com o governo argentino, para a venda de urânio enriquecido a 4,15%. Neste acordo, por questões de sigilo, a quantidade em massa de urânio negociada foi mantida em segredo (MALHEIROS, 2020). Estas negociações demonstram o potencial científico e tecnológico brasileiro, convertendo-se em lucro para os cofres públicos, o que tende a impulsionar diretamente o setor e suas demandas secundárias. É importante frisar que apenas 13 países dominam a técnica de enriquecimento de urânio França, Alemanha, Holanda, Reino Unido, Estados Unidos, China, Rússia, Japão, Argentina, Índia, Paquistão, Irã e Brasil, o que coloca estes países num seleto grupo de fornecedores para o resto do mundo. Isto projeta o Brasil em posição de destaque na América, estando apenas atrás dos EUA, dada sua capacidade científica, logística e de produção.

Reforçando a necessidade de desenvolver e aprimorar técnicas de enriquecimento de urânio e construção de reatores, recente estudo realizado pela Agência Internacional de Energia Atômica apontou que a participação da energia

nuclear mundial em 2019 equivalia a 396 mil MWe (*megawatt electrical*) gerados por 436 reatores, correspondendo a 10,5% da geração mundial de energia (PETRONOTÍCIAS, 2019). A partir de estudos relacionados à demanda energética mundial para as próximas décadas, está em fase de implementação o Projeto Harmony, sob responsabilidade da *World Nuclear Association* (WNA) cuja meta principal é ampliar o percentual de geração de energia nuclear para 25% até 2050. Para que esta meta seja alcançada é necessário esforço na construção de mais reatores, o que já foi iniciado com a produção preliminar de 56 novos reatores pelos principais países produtores de energia nuclear.

Esta demanda crescente por tecnologia nuclear está progressivamente criando novos mercados e reconfigurando o cenário energético mundial, privilegiando a geração de energias limpas e seguras apesar das várias controvérsias associadas à energia nuclear, que ainda carrega o estigma de perigosa para o planeta. Sendo o Brasil um dos poucos países no mundo que dominam o enriquecimento de urânio e exportam combustível nuclear, as próximas décadas podem ser vantajosas para as exportações brasileiras, principalmente para países como França e China, dada a alta dependência francesa em energia nuclear e a expansão da economia chinesa baseada no *going global*³ segundo Masiero e Coelho (2014).

O Brasil pode também a médio prazo desenvolver reatores para o mercado externo, principalmente para a Argentina, parceiro nas últimas aquisições de combustível nuclear. Nesse contexto, a valoração de bens intangíveis (transferência de conhecimento) também pode beneficiar o Brasil no mercado externo, uma vez que as pesquisas realizadas em nosso país tem chamado a atenção da comunidade científica internacional desde os anos 90, dada sua qualidade técnica, levando principalmente a Marinha a ocultar determinadas informações relativas ao seu programa de pesquisas em enriquecimento de urânio. Assim, o Brasil possui a possibilidade de explorar um mercado em franca evolução com competitividade e capacidade científica, moldando o cenário mercadológico a partir das demandas de outros países.

DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

Após décadas de pesquisas e investimentos, o Brasil consolidou-se no seleto grupo de nações capazes de enriquecer urânio para fins de geração de energia. Este processo, como mencionado na seção anterior, baseia-se na

³ Estratégia de mercado agressiva marcada pela inserção das empresas chinesas em negócios e terceiros mercados, através de exportações ou investimento direto no exterior, levando à gradual fixação e influência destes investimentos nesses mercados.

ultracentrifugação, processo em constante aperfeiçoamento nos laboratórios de tecnologia da Marinha. Dono da sétima reserva de urânio do mundo, desde 2021, o Brasil vem buscando sua autossuficiência na produção de urânio enriquecido, visando o abastecimento das duas únicas usinas nucleares brasileiras, Angra I e II e o mercado internacional. Para alcançar este objetivo, foi inaugurada a nona cascata de ultracentrífugas na Fábrica Nacional de Combustíveis, pertencente à INB, com sede em Resende, Rio de Janeiro (SALLES, 2021). Este investimento representa R\$ 54 milhões, permitindo ao Brasil aumentar em 65% as recargas anuais das suas duas usinas em operação, esperando-se que até 2033 a produção brasileira seja capaz de atender a toda demanda por combustível nuclear.

Já a autossuficiência está prevista para ser alcançada em 2037 com a construção de 30 cascatas, diminuindo significativamente as importações brasileiras de urânio enriquecido, principalmente da Europa. Outro benefício importante das pesquisas nucleares no Brasil, diz respeito ao programa nuclear da Marinha, que dentre outras atividades, vem trabalhando no desenvolvimento do primeiro submarino nuclear brasileiro, resultado de pesquisas e tecnologia nacional com parceria francesa, levando à criação da Coordenadoria Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN). Para o sistema propulsor deste submarino, a Marinha projetou seu próprio reator nuclear, deixando a cargo da empresa Nuclebrás Equipamentos Pesados (NUCLEP) a construção do casco. Sendo a tecnologia empregada pela Marinha na construção de seu reator de alto valor estratégico, considerando as normas internacionais e necessidade de inspeção da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), esta vem negociando critérios para a visita dos representantes da agência, buscando assegurar sigilo acerca do sistema nuclear usado no submarino (GODOY, 2023).

Tal preocupação mostra-se consistente uma vez que a Marinha vem realizando pesquisas inovadoras, no estado da arte, para obter um sistema propulsor com eficiência e capacidade próximas daqueles utilizados pelas Marinhas das grandes potências. Em entrevista recente, o atual Comandante da Marinha, Almirante de Esquadra Marcos Sampaio Olsen, afirmou que o submarino nuclear brasileiro ficará pronto em 2034, representando um marco tecnológico para a ciência nacional, fomentando o avanço científico, ao mesmo tempo fortalecendo as instituições civis e militares como também seus intercâmbios (PORTAL UOL, 2024). A partir do programa nuclear da Marinha, a médio prazo, o Brasil terá condições de projetar e construir seus próprios reatores nucleares, com finalidades diversas.

Demonstrado este domínio, a construção de novos parques ou manutenção das atuais usinas nucleares brasileiras acarretará na diminuição dos custos operacionais e manutenção, reduzindo a participação estrangeira no setor com a implementação de tecnologia nacional. Tal desenvolvimento trará impactos

importantes no cenário internacional, principalmente maior atenção dos órgãos regulatórios como a AIEA. Sendo o Brasil um dos 189 países que assinaram o tratado de não proliferação de armas nucleares (TNP), em 1998, após décadas de discussões e debates, torna-se necessário o balizamento dos interesses nacionais diante das preocupações externas. Faz-se necessário então, um posicionamento firme pelos representantes políticos brasileiros com vistas à preservação dos interesses tecnológicos nucleares nacionais, buscando principalmente a inserção em novos mercados e intercâmbio de conhecimento.

Sendo o setor energético internacional diretamente impactado por instabilidades políticas e conflitos, principalmente países do oriente médio produtores de petróleo e derivados, a exemplo da crise do petróleo em 1973, em 1990 com a Guerra do Golfo, 2004 com a Guerra no Iraque e recentemente com a Guerra entre Israel e o grupo terrorista Hamas, elevando o risco de aumento do barril de petróleo para US\$ 150 (R\$ 759,39), segundo estudos do Banco Mundial (NAKAGAWA, 2023), a difusão crescente da energia nuclear como alternativa aos combustíveis fósseis constitui importante oportunidade para a tecnologia nuclear brasileira afirmar sua capacidade técnica, estabelecendo acordos comerciais para a aquisição de combustível nuclear, desenvolvimento de reatores, instrumentação e controle.

Para isso, é importante uma política forte, capaz de analisar diferentes contextos comerciais, diferenciando a necessidade de cumprimento dos acordos internacionais para o uso pacífico da energia nuclear de estratégias de mercado baseadas nestes acordos, objetivando mitigar a representatividade tecnocientífica de países como o Brasil, que vem destacando-se nas últimas décadas no setor nuclear, sendo prática comum no cenário internacional. Diante disso, Santos (1999), destaca que:

Os mecanismos internacionais de controle de exportação, apesar de explicitamente objetivarem evitar a proliferação de armas de destruição em massa, podem ser usados, e são, como ferramentas de pressão política em negociações internacionais, bem como retardadores do desenvolvimento de países emergentes, pelos países exportadores (SANTOS, 1999, p. 117).

A principal justificativa dada pelos países desenvolvidos para dificultar a inserção da tecnologia nuclear brasileira no exterior é que o Brasil não dispõe de mecanismos rígidos de controle destes recursos quanto à exportação, sendo estabelecidos alguns embargos para a transferência de tecnologia nuclear e intercâmbio de conhecimento, principalmente pelos EUA. No entanto, com a crescente demanda energética mundial e restabelecimento da energia nuclear como importante opção frente a outras fontes de energia, nas últimas décadas vê-se maior abertura do cenário internacional, com importantes parcerias firmadas

pelo Brasil e os países americanos. Dessa forma, observam-se novas relações entre os países, ao mesmo tempo a preservação dos interesses de cada nação no aspecto econômico e científico, exigindo diferentes mecanismos e relações de cooperação. Nesse sentido, Roman e Lopes (2012) afirmam que:

Percebe-se nos dias atuais uma ampla discussão sobre a necessidade de melhorar as interações institucionais a fim de propulsionar a inovação. Com estatutos e objetivos diferentes, cada uma das partes envolvidas têm seus próprios interesses, que podem até ser dificilmente conciliáveis. Porém é necessário que as partes percebam a importância desse processo em cada organização (ROMAN; LOPES, 2012, p. 116).

No contexto comercial tecnológico não há diferença, cada país possui suas demandas econômicas e busca atingir suas metas de mercado, preservando ao máximo seus interesses no setor global. Cabe ao Brasil estar preparado para enfrentar tais desafios, estabelecendo doutrina comercial voltada para a excelência tecnológica e preservação dos seus interesses estratégicos, principalmente aqueles relacionados ao programa nuclear da Marinha. A partir das possibilidades comerciais externas e do manejo político-estratégico dos nossos representantes, o Brasil pode se tornar um grande fornecedor de tecnologia nuclear em pouco tempo, fazendo frente a grandes nações do hemisfério norte.

LACUNAS E DEMANDAS ATUAIS

Quando comparado às nações do primeiro mundo, o Brasil está cerca de 30 anos atrás dos principais avanços realizados por estes países no setor nuclear, gerando um cenário preocupante para nossa indústria, que ainda não conseguiu projetar e construir um reator nuclear genuinamente nacional. Enquanto nos EUA a indústria nuclear tem alcançado grande incentivo governamental e apoio da população nos últimos anos, no Brasil, ainda está sendo finalizada a construção de Angra - III, projeto originado no início dos anos 80. Este quadro, além de consternador, mostra a necessidade do Brasil em investir na energia nuclear, popularizando seu uso, ao mesmo tempo combatendo a ideia de 'energia perigosa'. Até o momento, o Brasil vem se destacando no processo de enriquecimento de urânio, técnica que vem ganhando novos contornos tecnológicos graças a pesquisas da Marinha. No entanto, desde o princípio do programa nuclear brasileiro, os parques tecnológicos nacionais voltados para a geração e pesquisa de energia atômica vem se limitando às usinas nucleares de Angra I e II.

Considerando que estas foram as primeiras usinas nucleares do Brasil, construídas no início dos anos 70, sendo Angra - I colocada em operação no ano

de 1984, diversas modernizações foram realizadas nos sistemas de controle da usina, além da expansão física e modernização do reator. Diante disso, dada a vida útil dos sistemas necessários para a operação da usina, estima-se que sua capacidade operativa possa ser estendida por mais 20 anos, mesmo inicialmente programada para encerrar suas atividades em 2012. O pedido para estender as operações de Angra - I foi realizado pela empresa Eletronuclear, que solicitou formalmente para a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) o prolongamento das atividades da usina (EXAME NEGÓCIOS, 2019). Este cenário coloca o Brasil numa situação delicada diante dos países desenvolvidos, uma vez que estas nações priorizam não apenas a modernização de seus sistemas nucleares, como também a aquisição de novas tecnologias e a construção de novas centrais de energia atômica.

Estando a energia nuclear em franca expansão no mundo, a construção de novas e modernas usinas representa importante iniciativa para o Programa Nuclear Brasileiro, caso o Brasil deseje ocupar lugar de destaque junto às potências que dominam este setor. A construção de novas usinas, além de demonstrar a capacidade técnica e o amadurecimento científico do Brasil, torna possível o aprimoramento das pesquisas voltadas para a construção de reatores, principalmente os reatores de fusão nuclear, tecnologia dominada por apenas 50 países no mundo, estando o maior deles, o JT-60SA, atualmente instalado no Japão (SANTOS, 2023; PORTAL INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2023). Apesar de dominar o ciclo total de enriquecimento de urânio, o Brasil não possui projetos que viabilizem a construção de um reator nuclear nacional para as usinas de Angra. Dessa forma, as pesquisas voltadas para a construção de reatores restringem-se ao uso embarcado destes sistemas.

Dado o elevado grau de complexidade técnica e especificidades na construção dos reatores usados pela Marinha para a propulsão de seus submarinos, o desenvolvimento de sistemas nucleares de geração de energia para uso civil requer grande incentivo, investimento nos centros de pesquisa das Universidades Federais, parcerias com empresas do setor público e privado, intercâmbio de conhecimento e transferência tecnológica. Nesse sentido, destacam-se as pesquisas realizadas pelo Centro Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, inaugurado em 1964, o qual opera um reator subcrítico, desenvolvendo pesquisas nas áreas de dosimetria e instrumentação nuclear, aplicações das radiações em sistemas poliméricos e engenharia de reatores. Seguindo linha semelhante, a Universidade Federal de Minas Gerais, com seu Departamento de Engenharia Nuclear, criado ainda no início dos anos 50, destaca-se pelas pesquisas nas áreas de ciências das radiações e engenharia nuclear e da energia.

Assim, dado o potencial científico nacional, parcerias entre instituições podem diminuir o *gap* das pesquisas brasileiras com relação aos países desenvolvidos, incentivando a participação de capital privado, consolidando a tecnologia nacional e atraindo mercados para o desenvolvimento de reatores modernos, como os reatores rápidos regeneradores (*Fast Breeder Reactor* - FBR) que ainda não atingiram estágio comercial (LEITE, 2007). Esta nova geração de reatores, sucessor do tradicional reator de água pressurizada, ainda em operação em diversas instalações nucleares ao redor do mundo, é capaz de aumentar em cerca de 50 vezes o potencial uranífero das reservas hoje em atividade dada sua capacidade de aumentar a quantidade de material físsil durante seu ciclo de operação. Nesta classe de reatores, boa parte do urânio utilizado no processo transforma-se em plutônio, elemento químico produzido artificialmente. Apesar de controverso, devido o plutônio ser o material base para a confecção de armas atômicas e extremamente radioativo, o uso destes reatores representa significativo avanço na tecnologia destes sistemas.

Atualmente, uma terceira geração de reatores está em desenvolvimento, caracterizados pela segurança e simplicidade a exemplo do reator avançado de água fervente (*Advanced Boiling Water Reactor* - ABWR), o único em operação e instalado no Japão (LEITE, 2007). Diante das crescentes pesquisas internacionais para o desenvolvimento de novos e eficientes reatores, capazes de gerar mais energia com menos consumo de combustível, o Brasil tem o dever de intensificar seus programas de desenvolvimento de reatores buscando o domínio tecnológico dos reatores de água pressurizada, comuns nas usinas de Angra e em boa parte dos países produtores de energia atômica, viabilizando sua autossuficiência tecnológica e capacitação de recursos humanos. Sendo assim, a indústria nuclear brasileira tem a possibilidade de crescer interna e externamente caso haja liderança e visão que organize os recursos tecnológicos nacionais, seus centros de pesquisa e a própria indústria, no sentido de acompanhar as demandas internacionais por consumo energético (ISHIGURO, 2002).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das considerações realizadas ao longo deste trabalho, baseadas no referencial bibliográfico reunido, concluímos que o domínio da energia nuclear pelo Brasil representa importante passo para o desenvolvimento nacional de tecnologias sensíveis, de interesse internacional, capazes de reconfigurar o cenário econômico externo. Nesse sentido, destacam-se as pesquisas voltadas para o enriquecimento de urânio e o desenvolvimento de reatores nucleares para submarinos realizados pela Marinha. Tal capacidade demonstra o alcance e evolução da tecnologia

nuclear nacional nas últimas décadas, reverberando a possibilidade de crescimento do setor civil a partir do adensamento das pesquisas em curso, intercâmbio de conhecimento entre instituições de pesquisa nacionais e internacionais e o fortalecimento de acordos comerciais para a compra e venda de urânio enriquecido.

No entanto, para o Brasil alcançar representatividade comercial no exterior, faz-se necessário estabelecer uma liderança política forte capaz de defender os interesses nacionais frente aos países que dominam o setor nuclear. Concluímos também que, sendo o Brasil detentor de importantes jazidas de exploração de urânio, além de dominar e aperfeiçoar o processo de enriquecimento de urânio por ultracentrifugação, o país está próximo de alcançar sua autossuficiência na produção de combustível nuclear, assegurando o funcionamento das usinas de Angra, o comércio com países vizinhos e possíveis acordos externos. Outro passo que pode ser dado pelo Brasil nas próximas décadas é o desenvolvimento de um reator totalmente nacional para suas usinas, abrindo caminho para novas tecnologias e pesquisas, diminuindo a diferença de conhecimento tecnológico entre as nações hegemônicas no setor, aumentando a cooperação técnica e científica.

Paralelamente, concluímos que o Brasil concentra importantes centros de pesquisas nucleares, restando aos entes públicos reconhecer esta importância, fomentando investimentos capazes de incentivar o trabalho acadêmico nacional para a hegemonia brasileira no setor. Considerando os atuais cenários políticos interno e externo brasileiro, juntamente com as diferentes demandas energéticas observadas ao redor do mundo, a tecnologia nuclear nacional tem hoje, a chance de redimir antigos problemas originados dos primeiros acordos firmados para o desenvolvimento atômico nacional, alcançando metas e cumprindo objetivos outrora suprimidos pela interferência interna de agentes públicos e seus interesses particulares ou pelo temor de certas nações do Brasil dominar a energia nuclear, tornando-se uma potência mundial no setor. Dada a enormidade dos recursos minerais brasileiros e seu amadurecimento nas pesquisas nucleares, considerando a impulsão desta fonte energética no contexto internacional, será inevitável restringir a presença brasileira neste mercado, possibilitando ao Brasil alcançar crescimento e representação científica de forma definitiva.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Ana Maria Ribeiro de; SANTOS, Tatiane Lopes dos. A dinâmica política da criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1956-1960, **Revista de Ciências Humanas**, Belém, v. 8, n. 1, p. 113-128, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bgoeldi/a/LSv4GCkhVfZyGpcMgXFm78M/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

BRANDÃO, Rafael Vaz da Motta. Ditadura, política nuclear e interesses empresariais: a participação da Siemens no acordo de cooperação nuclear Brasil-

Alemanha, **Revista Continentes**, Rio de Janeiro, v. 09, n. 16, p. 124-155, 2020. Disponível em: <https://revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/275>. Acesso em: 22 mar. 2024.

Brasil exportará urânio enriquecido pela primeira vez. **Agência Brasil**, Brasília, 02/07/2016. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2016-07/brasil-exportara-uranio-enriquecido-pela-primeira-vez>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CABRAL, Anya. História das usinas nucleoeletricas no Brasil, **Revista Eletrônica de Energia**, Salvador, v. 01, n. 01, p. 58-71, 2011. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/viewFile/1639/1440>. Acesso em: 22 mar. 2024.

CARVALHO, Carlos Alberto Aragão de, BIGNARDI, Hudson Lucio. A energia nuclear no Brasil: histórico e resultados, **Revista Brasileira de Estudos Estratégicos**, Niterói, v. 13, n. 25, p. 51-83, 2021. Disponível em: <http://www.rest.uff.br/index.php/rest/article/view/260>. Acesso em: 11 mar. 2024.

CHAVES, Rodrigo Moraes. Ideias, interesses e escolha racional: o congresso nacional e o acordo nuclear Brasil-Alemanha, **Revista Eletrônica de Ciências Sociais**, Juiz de Fora, v. 01, n. 27, p. 27-42, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/csonline/article/view/17398>. Acesso em: 22 mar. 2024.

DINIZ, Márcia Jucá Teixeira; DINIZ, Marcelo Bentes. Pesquisa científica, conhecimento e educação: reflexões sobre sua importância econômica e social, Belém, **Revista Cadernos CEPEC**, v. 08, n. 02, p. 9-33, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/cepec/article/view/8316/6098>. Acesso em: 11 mar. 2024.

Energia nuclear terá que aumentar a construção de reatores para chegar na meta de 25% da geração mundial até 2050. **Petronotícias**, São Paulo, 23/04/2019. Disponível em: <https://petronoticias.com.br/energia-nuclear-tera-aumentar-construcao-de-reatores-para-chegar-na-meta-de-25-da-geracao-mundial-ate-2050/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

Eletronuclear pede financiamento e extensão de vida útil de Angra I. **Exame Negócios**, São Paulo, 11/11/2019. Disponível em: <https://exame.com/negocios/eletronuclear-pede-financiamento-e-pede-extensao-de-vida-util-de-angra-i/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

FAVARO, Neide de Almeida Lança Galvão; SEMZEZEM, Priscila. A produção científica subjugada à lógica econômica: elementos para uma análise crítica, São Paulo, **Revista Científica ECCOS**, São Paulo, v. 57, n. 57, p. 1-18, 2021. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/eccos/article/view/10655>. Acesso em: 11 mar. 2024.

GODOY, Marcelo. Marinha do Brasil mantém posição quanto aos segredos militares do reator do submarino nuclear diante de inspeção da AIEA, **Defesa Aérea e Naval**, São Paulo, 30/07/2023. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/marinha-do-brasil-mantem-posicao-quanto-aos-segredos-militares-do-reator-do-submarino-nuclear-diante-de-inspecao-da-aiea>. Acesso em: 23 mar. 2023.

IMMICH, Vinicius; WEBER, Fernanda Hart; CLASEN, Barbara Estevo; LANZANOVA, Luciane Sippert; LANZANOVA, Mastrângello Enívar. Energia nuclear: uma opinião da sua relação com a sustentabilidade, **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, Porto Alegre, v. 9, n. 02, p. 143-153, 2023. Disponível em: <https://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/3474>. Acesso em: 11 mar. 2024.

ISHIGURO, Yuji. **A energia nuclear para o Brasil**. São Paulo. MAKRON Books, 2002.

KURAMOTO, Renato Yoichi Ribeiro. Uma breve história da política nuclear brasileira, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 3, p.379-392, 2002. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6612/6104>. Acesso em: 17 mar. 2024.

LEITE, Antônio Dias. **A energia do Brasil**. 2ª Ed. Rio de Janeiro. CAMPUS/Elsevier, 2007.

LIMA, Fernanda Silva; SILVA FILHO, Wilson Seraine da. Potencial Uranífero no Brasil: uma revisão bibliográfica, **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 07, n. 06, p. 58852-58867, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/31365/pdf/80208>. Acesso em: 22 mar. 2024.

Maior reator de fusão nuclear do mundo é ligado. **Inovação Tecnológica**, São Paulo, 01/11/2023. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=maior-reator-fusao-nuclear-mundo-ligado&id=010115231101>. Acesso em: 24 mar. 2024.

MALHEIROS, Tania. Brasil exporta urânio enriquecido para a Argentina. **Ipen Institucional Notícias**, São Paulo, 05/10/2020. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=14907#:~:text=A%20exporta%C3%A7%C3%A3o%20de%20ur%C3%A2nio%20enriquecido,est%C3%A3o%20sendo%20mantidos%20em%20sigilo. Acesso em: 22 mar. 2024.

MASIERO, Gilmar; COELHO, Diego Bonaldo. A política industrial chinesa como determinante de sua estratégia *going global*, **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 34, n. 01, p. 139-157, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/5BPpHbQyrTrrtKjgcCncTXM/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MARTINS FILHO, João Roberto. Visões civis sobre o submarino nuclear brasileiro, **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, v. 29, n. 85, p. 129-224, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/VJRRGQRSfPb3XPks6XSY69g/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

NAKAGAWA, Fernando. Petróleo pode atingir US\$ 150 se guerra em Israel escalar, alerta Banco Mundial, **CNN Brasil**, São Paulo, 31/10/2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/petroleo-pode-atingir-us-150-se-guerra-em-israel-escalar-alerta-banco-mundial/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

OKUNO, Emico. As bombas atômicas podem dizimar a humanidade – Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos, **Revista de estudos avançados**, São Paulo, v. 29, n. 84, p. 209-218, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/9s86bRNRXrHyRTj8xzx4pZh/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

OLIVEIRA, César Antônio de; GIACOMO, Leonardo. Território em risco: discussão acerca dos impactos da implantação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) em Angra dos Reis – RJ, **Revista Master**, Araguari, v. 10, n. 05, p. 63-75, 2020. Disponível em: <https://revistamaster.emnuvens.com.br/RM/article/download/175/90>. Acesso em: 22 mar. 2024.

PEREIRA, Newton Müller. Energia nuclear: da energia inesgotável à energia limpa, **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v. 08, n. 02, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/147/130/>. Acesso em: 11 mar. 2024.

ROMAN, Vinícius Bortolussi, LOPES, Marco Túlio de Paula. Importância da transferência de tecnologia realizada nas universidades brasileiras para a alavancagem da competitividade do país no cenário econômico mundial, **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2012. Disponível em: <https://incubadora.periodicos.ufsc.br/index.php/IJIE/article/download/2089/pdf/8331>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SANTOS, Marcos. Cerca de 90 reatores de fusão nuclear funcionam no mundo, **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, 01/02/2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/cerca-de-90-reatores-de-fusao-nuclear-funcionam-no-mundo/>. Acesso em: 24 mar. 2024.

SANTOS, Reginaldo. O Programa nacional de atividades espaciais frente aos embargos Tecnológicos, **Revista Parcerias Estratégicas**, v. 04, n. 07, p. 117-130, 1999. Disponível em: https://seer.cgee.org.br/parcerias_estrategicas/article/view/95. Acesso em: 23 mar. 2024.

SALLES, Stéfano. Brasil enriquece mais urânio em busca de autossuficiência para energia nuclear, **CNN Brasil**, Rio de Janeiro, 26/11/2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/brasil-enriquece-mais-uranio-em-busca-de-autossuficiencia-para-energia-nuclear/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SOVACOOOL, Benjamin K. Repensando a energia nuclear, **Revista de Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 287-291, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/gSddGFx3CJdq8dfsjDBFH3f/>. Acesso em: 22 mar. 2024.

Submarino de propulsão nuclear nacional ficará pronto em 2034. **Portal UOL**, São Paulo, 04/03/2024. Disponível em: <https://www.band.uol.com.br/noticias/canal-livre/videos/submarino-de-propulsao-nuclear-nacional-ficara-pronto-em-2034-17227478>. Acesso em: 23 mar. 2024.

VELASQUEZ-TORIBIO, Alan Miguel. O modelo atômico de Bohr e o início da mecânica quântica, **Cadernos de Astronomia**, Vitória, v. 03, n. 01, p. 65-83, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/download/35812/24704/118726>. Acesso em: 22 mar. 2024.