

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG (EN) SALVADOR RAMOS DA SILVA NETO

PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO/GESTÃO ESTRATÉGICA: MODELOS PARA A MB:

A indústria de combustível nuclear no Brasil – Modelos de gestão

Rio de Janeiro

2022

CMG (EN) SALVADOR RAMOS DA SILVA NETO

A indústria de combustível nuclear no Brasil – Modelos de gestão

Tese apresentada à Escola de Guerra Naval como requisito parcial para a conclusão do Curso de Política e Estratégia Marítimas.

Orientador: CMG (RM1-FN) Adriano Lauro.

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, CMG (RM1-FN) Adriano Lauro, pelas valiosas orientações que muito contribuíram para a elaboração deste trabalho. Desde a lapidação do objeto de estudo até o auxílio no delineamento do escopo, sua seriedade e camaradagem foram de grande importância para levarmos a bom termo esta pesquisa.

Aos instrutores da Escola de Guerra Naval, registro minha admiração e agradecimento pelo elevado nível dos conteúdos compartilhados, que passam a compor o nosso repertório de conhecimentos.

Aos companheiros e companheiras da turma do Curso de Política e Estratégia Marítimas registro meus agradecimentos pelo convívio amigável e colaborativo, que favoreceram um ambiente profícuo e que, tenho certeza, se estenderá para nossas carreiras após a conclusão do curso.

Por fim, agradeço à minha esposa, Ana Emília, às minhas filhas Ana Carolina e Maria Luíza e ao meu filho Salvador, pela motivação, encorajamento, suporte e afeto.

RESUMO

Esta pesquisa tem o objetivo de formular e comparar modelos de gestão para a indústria brasileira de combustível nuclear que contribuam para o Brasil alcançar autonomia em todas as atividades que compõem o ciclo do combustível. O modelo atualmente empregado reflete o monopólio estatal sobre os recursos minerais e as atividades da indústria nuclear brasileira, impondo limites para o desenvolvimento dessa indústria. Para atender às demandas internas, o Brasil depende da contratação de serviços e da aquisição de insumos externos. Essas importações representam um contrassenso quando se consideram as expressivas reservas de urânio que o País possui e a tecnologia própria desenvolvida. Novos modelos de gestão podem abreviar o caminho na busca por maior autonomia para a indústria nuclear brasileira. Empregando uma abordagem descritiva, seguida por análises de fatos históricos e posicionamentos políticos assumidos pelo Brasil, três aspectos relevantes são analisados. Inicialmente, evidencia-se que a participação da geração termonuclear apresenta tendência de se expandir em âmbito mundial, indicando que essa indústria é atrativa para a iniciativa privada. Adicionalmente, verifica-se que o Brasil, além de possuir reservas significativas de urânio, desenvolveu tecnologia própria para realizar todas as etapas do ciclo do combustível, restando superar desafios para que o País obtenha o domínio industrial e a autossuficiência. Por fim, analisando a legislação brasileira, constata-se que o monopólio estatal sobre o minério e as atividades nucleares pode representar um entrave ao desenvolvimento de tecnologia no Brasil, por limitar as fontes de investimento no setor. A adoção de um novo modelo de gestão que inclua maior participação da iniciativa privada, com estabelecimento de parcerias com o setor público, traz novas fontes de recursos financeiros e humanos para a indústria nuclear brasileira, mantendo o controle das atividades com a União e aproveitando os recursos minerais brasileiros e a tecnologia desenvolvida no Brasil.

Palavras-chave: Ciclo do combustível nuclear. Geração termonuclear. Indústria nuclear brasileira. Programa nuclear brasileiro. Programa Nuclear da Marinha.

ABSTRACT

This research aims to formulate and compare management models for the Brazilian nuclear fuel industry that help Brazil achieve autonomy in all activities that make up the fuel cycle. The model currently used reflects the state monopoly over mineral resources and the activities of the Brazilian nuclear industry, imposing limits on the development of this industry. To meet internal demands, Brazil depends on contracting services and purchasing external inputs. These imports represent a contradiction when considering the significant uranium reserves that the country has and the technology developed in-house. New management models can shorten the way in the search for greater autonomy for the Brazilian nuclear industry. Employing a descriptive approach, followed by analyzes of historical facts and political positions taken by Brazil, three relevant aspects are analyzed. Initially, it is evident that the participation of thermonuclear generation tends to expand worldwide, indicating that this industry is attractive to the private sector. Additionally, it is verified that Brazil, in addition to having significant uranium reserves, has developed its own technology to carry out all stages of the fuel cycle, remaining some challenges to overcome for the country to achieve industrial dominance and self-sufficiency. Finally, analyzing Brazilian legislation, it appears that the state monopoly on ore and nuclear activities can represent an obstacle to the development of technology in Brazil, by limiting the sources of investment in the sector. The adoption of a new management model that includes greater participation of the private sector, with the establishment of partnerships with the public sector, brings new sources of financial and human resources to the Brazilian nuclear industry, maintaining control of activities with the State and taking advantage of the Brazilian mineral resources and the technology developed in Brazil.

Keywords: Nuclear fuel cycle. Thermonuclear generation. Brazilian nuclear industry. Brazilian Nuclear Program. Brazilian Navy Nuclear Program.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	16
FIGURA 2 – Quantidade de material necessário para obtenção de 1Kg de U235, com base em mineral nuclear contendo 0,5% de urânio natural em sua composição	21
FIGURA 3 – Ciclo do combustível nuclear.....	22
FIGURA 4 – Etapas do ciclo do combustível nuclear incluídas no escopo da pesquisa...	24
FIGURA 5 – Estimativa de duração das reservas brasileiras de urânio	30
FIGURA 6 – Maturidade das etapas do ciclo do combustível nuclear no Brasil	42
FIGURA 7 – Organização industrial das etapas do ciclo, considerando criação de uma nova empresa pública	68
FIGURA 8 – Organização industrial das etapas do ciclo, considerando consolidação da INB para realização de todas as etapas	70
FIGURA 9 – Exemplo de organização industrial das etapas do ciclo, considerando concessão de atividades com Parceria Público-Privada	74
FIGURA 10 – Exemplo de organização industrial das etapas do ciclo, considerando participação da iniciativa privada no fornecimento de serviços e equipamentos	76
QUADRO 1 – Materiais físseis e férteis de interesse para geração termonuclear	19
QUADRO 2 – Principais fontes de energia e suas participações no consumo mundial de energia em 2019	26
QUADRO 3 – Principais fontes de energia renováveis e suas vulnerabilidades	27
QUADRO 4 – Principais empresas que operam comercialmente etapas da indústria do combustível nuclear	29
QUADRO 5 – Maturidade das etapas do ciclo do combustível nuclear no Brasil.....	41
QUADRO 6 – Objetivos da Política Nuclear Brasileira atendidos	61
QUADRO 7 – Objetivos da Política Nuclear Brasileira parcialmente atendidos	63
QUADRO 8 – Objetivos da Política Nuclear Brasileira não atendidos	64
QUADRO 9 – Comparação entre modelos de gestão formulados	78

LISTA DE TABELAS

1 – Reservas mundiais de urânio (2019)	20
2 – Quantidade de usinas termonucleares por continente (junho de 2022)	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABACC –	Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
ANSN –	Autoridade Nacional de Segurança Nuclear
BID –	Base Industrial de Defesa
CBTN –	Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear
CEA –	Centro Experimental Aramar
CF –	Constituição Federal
CINA –	Centro Industrial Nuclear de Aramar
CNAAA –	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN –	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq –	Conselho Nacional de Pesquisa; ou Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTMSP –	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
EB –	Exército Brasileiro
EC –	Emenda Constitucional
END –	Estratégia Nacional de Defesa
EPE –	Empresa de Pesquisa Energética
EUA –	Estados Unidos da América
FAB –	Força Aérea Brasileira
FCN –	Fábrica de Combustível Nuclear da INB
GEE –	Gases de efeito estufa
GSI-PR –	Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República
IAEA –	International Atomic Energy Agency
IEA –	International Energy Agency
INB –	Indústrias Nucleares do Brasil
IPEN –	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LABGENE –	Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica
LABMAT –	Laboratório de Materiais Nucleares
LBDN –	Livro Branco de Defesa Nacional

LEI –	Laboratório de Enriquecimento Isotópico
MAD –	Mutual Assured Destruction
MB –	Marinha do Brasil
MD –	Ministério da Defesa
ONU –	Organização das Nações Unidas
PEM 2040 –	Plano Estratégico da Marinha
PNB –	Programa Nuclear Brasileiro
PND –	Política Nacional de Defesa
PNE 2050 –	Plano Nacional de Energia 2050
PNM –	Programa Nuclear da Marinha
PPP –	Parceria Público-Privada
PROSUB –	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
Pu239 –	Plutônio de massa atômica 239
SIPRI –	Stockholm International Peace Research Institute
SN-BR –	Submarino convencional brasileiro com propulsão nuclear
TNP –	Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares
ToT –	Transferência de Tecnologia
U –	Elemento químico urânio
U235 –	Urânio de massa atômica 235
U238 –	Urânio de massa atômica 238
U3O8 –	Óxido de urânio
UF6 –	Hexafluoreto de urânio
UFEM –	Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas
USEXA –	Unidade Piloto de Produção de Hexafluoreto de Urânio
USP –	Universidade de São Paulo
WNA –	World Nuclear Association

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivo e relevância da pesquisa.....	11
1.2	Metodologia e Pressupostos teóricos.....	12
1.3	Estrutura do trabalho.....	13
2	A ENERGIA NUCLEAR E A MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL.....	15
2.1	Combustível nuclear.....	18
2.2	Usinas nucleares existentes e em construção.....	26
2.3	Combustível nuclear – demanda nacional e mundial.....	29
3	DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL.....	32
3.1	O Programa Nuclear Brasileiro e o Programa Nuclear da Marinha.....	32
3.2	O Programa de Desenvolvimento de Submarinos – PROSUB.....	36
3.3	Maturidade das etapas do ciclo.....	37
3.4	Autonomia brasileira na obtenção de combustível nuclear.....	41
4	DOCUMENTOS QUE CONDICIONAM O DESENVOLVIMENTO NUCLEAR NO BRASIL.....	44
4.1	O Plano Baruch e as Compensações Específicas.....	44
4.2	O regime de salvaguardas internacionais dos materiais nucleares.....	46
4.3	Atividades nucleares no Brasil – Documentos condicionantes.....	50
4.4	A efetividade da Política Nuclear Brasileira.....	60
5	MODELOS PARA A OBTENÇÃO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL.....	66
5.1	Manutenção do monopólio estatal.....	67
5.2	Abertura para a iniciativa privada.....	71
5.3	Comparação entre os modelos de gestão formulados.....	78
6	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre o uso da energia nuclear não é de hoje. Desde os eventos trágicos que puseram em prática o grande poder do urânio e do plutônio, em 1945, com a detonação das primeiras bombas nucleares, parcela significativa da sociedade mundial associa energia nuclear a armamento nuclear, impactando as decisões quanto às suas aplicações para fins pacíficos. A geração de resíduos nucleares é outro fator que favorece a rejeição ao emprego dessa tecnologia.

Quando realizada de forma controlada, tanto a energia térmica quanto a radiação das reações nucleares encontram importantes usos pacíficos, com aplicações na medicina, na indústria, na agricultura, entre outras. A geração de energia elétrica está entre as aplicações pacíficas mais conhecidas e difundidas da energia nuclear. Essa modalidade de geração se configura como uma possibilidade para suprir novas demandas ou para substituir modalidades poluentes que se baseiam na queima de combustíveis fósseis.

Para que a geração termonuclear¹ seja possível, é necessário que combustível nuclear seja produzido, envolvendo uma série de etapas industriais cuja tecnologia é dominada por poucos países. O Brasil tem o domínio dessas etapas, tendo desenvolvido tecnologia própria, cujos grandes protagonistas são a Marinha do Brasil (MB) e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). A MB, com o Programa Nuclear da Marinha (PNM), desenvolve instalações industriais no Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA) com vistas a obter combustível nuclear para atender o PNM e o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB)², que são programas estratégicos da MB (MB, 2020b). O Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e suas Organizações Militares subordinadas são as instituições responsáveis pelos projetos, contratações,

1 Geração termonuclear é a geração de energia elétrica a partir de reatores nucleares. O calor gerado pelo processo de fissão nuclear possibilita a geração de vapor d'água que, por sua vez, aciona uma turbina acoplada a um gerador elétrico.

2 O PROSUB, programa criado em 2008 pelo contrato de parceria estratégica estabelecida entre o Brasil e a França, envolve a construção de infraestrutura para construção de submarinos e a fabricação de quatro submarinos convencionais. O principal objetivo do PROSUB – seu objeto precípua – é a obtenção do primeiro submarino convencional brasileiro com propulsão nuclear (SN-BR). Para tanto, essa parceria inclui a transferência de tecnologia nas áreas de projeto e construção de submarinos (MB, 2022c).

implantação e operação das facilidades industriais dedicadas ao ciclo do combustível nuclear.³

No que se refere ao combustível empregado nas usinas term nucleares de Angra 1 e 2, sua fabricação é realizada na Indústrias Nucleares do Brasil (INB), na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende-RJ.

Na INB são executadas diferentes etapas do ciclo, principalmente as etapas finais, relativas à fabricação de pastilhas e dos elementos combustíveis.⁴ A capacidade industrial da INB foi adquirida inicialmente pela transferência de tecnologia ocorrida no âmbito do Acordo Brasil-Alemanha, firmado entre as décadas de 1960 e 1970, cujo escopo incluía a transferência de tecnologia para todas as etapas do ciclo (CABRAL, 2011).

As atividades da INB atendem ao Programa Nuclear Brasileiro (PNB), sendo este definido, conforme Decreto N° 9.600/2018, como o conjunto de projetos e atividades relacionadas com a utilização, para fins pacíficos, da energia nuclear sob orientação, controle e supervisão do Governo Federal (BRASIL, 2018). A construção de novas centrais term nucleares no Brasil e o fomento ao desenvolvimento e à inovação tecnológica brasileira na área nuclear estão no escopo do PNB. O PNM, de objetivos mais específicos, visa obter uma planta nuclear para propulsão de submarinos e o domínio do ciclo do combustível nuclear (MB, 2022a).

Esta pesquisa realiza uma análise da capacidade brasileira de produzir combustível nuclear e propõe modelos de organização industrial que aproveitem o potencial brasileiro nessa área.

1.1 Objetivo e relevância da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é formular e comparar modelos de gestão para a indústria de combustível nuclear no Brasil, visando contribuir para que o País alcance

3 O ciclo do combustível nuclear é um conjunto de atividades que, por etapas de transformações químicas, processos físicos e atividades fabris, converte o minério de urânio em elementos combustíveis, que são empregados em reatores nucleares.

4 As atividades industriais realizadas pela INB encontram-se descritas no site da empresa, a partir da página “Nossas Atividades”. (INB, 2022c).

autonomia para atender suas necessidades internas. Tal indústria deve atender às necessidades do PNB, fornecendo combustível para as centrais termonucleares brasileiras existentes e a serem instaladas; e outras demandas nacionais por combustível nuclear para fins pacíficos no Brasil, podendo atender as necessidades da MB.

Para tanto, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar se a indústria de combustível nuclear representa um mercado atrativo a nível mundial;
- b) avaliar a maturidade da indústria nuclear brasileira voltada à produção de combustível nuclear; e
- c) analisar a legislação que condiciona o desenvolvimento de tecnologia nuclear no Brasil.

Para atender às demandas internas, o Brasil depende da contratação de serviços e da aquisição de insumos externos. Essas importações representam um contrassenso quando se consideram as expressivas reservas de urânio que o País possui e a tecnologia própria desenvolvida na área nuclear. Novos modelos de gestão podem abreviar o caminho na busca por maior autonomia para a indústria nuclear brasileira.

A organização industrial brasileira no setor nuclear reflete o monopólio estatal sobre os recursos minerais e as atividades da indústria nuclear brasileira, impondo limites para o desenvolvimento dessa indústria.

1.2 Metodologia e Pressupostos teóricos

Para o desenvolvimento deste trabalho, haverá prevalência da metodologia descritiva, com base em pesquisa em livros, artigos, documentação técnica e arcabouço normativo que rege a atividade nuclear no Brasil. Serão utilizadas fontes abertas para a pesquisa. Cada capítulo inclui partes relativas a análises e avaliações do conteúdo pesquisado.

A tendência mundial de utilização da modalidade termonuclear na matriz energética se suporta nos dados apresentados pela *World Nuclear Association* (WNA)⁵.

5 A World Nuclear Association é a organização internacional que representa a indústria nuclear global. Sua missão é “promover uma compreensão mais ampla da energia nuclear entre os principais influenciadores internacionais, produzindo informações confiáveis, desenvolvendo posições comuns da indústria e contribuindo para o debate sobre energia” (WNA, 2022e).

O caminho percorrido pelo Brasil para o desenvolvimento tecnológico na área nuclear é analisado.

As medidas internacionais contra a proliferação de armamento nuclear são explicadas com base na análise histórica dos esforços internacionais realizados nesse sentido.

No plano interno, realiza-se um estudo comparativo dos diferentes textos constitucionais, a partir da Constituição Federal (CF) de 1891 e são analisadas as principais leis e decretos que disciplinaram as atividades nucleares no País, bem como a Política Nacional de Defesa (PND), a Estratégia Nacional de Defesa (END) e o Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040). É realizada uma avaliação sobre a efetividade da Política Nuclear Brasileira, procurando discriminar os objetivos dessa Política que estão sendo atendidos – e os que não estão – com base na estrutura industrial que, de fato, encontra-se implementada no Brasil.

A rigor, não são elaboradas hipóteses iniciais para este trabalho. O conhecimento produzido pela presente pesquisa é alicerçado nos argumentos construídos no desenvolvimento do texto.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta pesquisa é desenvolvida em quatro capítulos, além desta Introdução e da Conclusão.

No capítulo 2 serão apresentadas as etapas que definem o ciclo do combustível nuclear; é analisada a demanda atual por combustível nuclear e a expectativa de crescimento dessa demanda. Tal análise tem por base novas unidades de geração termonuclear planejadas e em construção; e a transição energética mundial. Adicionalmente, o conflito Russo-Ucraniano, iniciado em 24 de fevereiro de 2022, é analisado quanto ao impacto na oferta de energia para países europeus. Este último fator pode influenciar decisões governamentais quanto à participação da energia nuclear na matriz energética de seus países. É realizada, ao final do capítulo, uma avaliação quanto à atratividade que a indústria de combustível nuclear apresenta para a iniciativa privada.

No capítulo 3 é realizado um exame do caminho percorrido pelo Brasil na busca pela autonomia no setor nuclear, que inclui um breve histórico do PNM e da INB. Enquanto a MB, busca obter combustível nuclear para seus propósitos, a INB é responsável pela fabricação dos elementos combustíveis para a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), onde se localizam as usinas termonucleares de Angra 1 e 2 e, futuramente, Angra 3. Desde o estabelecimento do PNB, na década de 1940, muito progresso foi obtido, seja pela transferência de tecnologia recebida de outros países, seja pelo desenvolvimento nacional, a exemplo do exitoso projeto das ultracentrífugas brasileiras. É realizada uma avaliação quanto à maturidade nacional no domínio industrial do ciclo do combustível nuclear.

O capítulo 4 trata da análise do corpo normativo que rege a exploração e o processamento de material radioativo no Brasil. Inicialmente, a evolução das medidas internacionais contra a proliferação de armamento nuclear é analisada. No plano interno, a legislação brasileira é analisada quanto ao tratamento dos materiais e das atividades nucleares no País. Realiza-se um estudo comparativo dos diferentes textos constitucionais, a partir da CF de 1891; são analisadas as principais leis e decretos que disciplinaram as atividades nucleares no País, bem como a PND, a END e o PEM 2040; por fim, é realizada uma avaliação sobre a efetividade da Política Nuclear Brasileira.

No capítulo 5 são formulados modelos para a gestão das atividades do ciclo do combustível nuclear no Brasil. Diferentes possibilidades são consideradas, conforme seja mantido o monopólio estatal sobre as atividades nucleares ou haja flexibilização de tal monopólio. O capítulo é concluído com uma análise comparativa dos modelos propostos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões.

Muito embora esta pesquisa se destine a analisar o potencial brasileiro quanto ao desenvolvimento de tecnologia nuclear, o foco está na indústria atrelada ao ciclo do combustível nuclear. Subsidiariamente, procura-se identificar, quando cabível, os reflexos da política nuclear vigente e dos modelos de gestão formulados para os programas estratégicos da MB.

Quando não especificado de outra forma, o termo “ciclo” refere-se ao ciclo do combustível nuclear.

2 A ENERGIA NUCLEAR E A MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

A alvorada da tecnologia nuclear é marcada por eventos que maculam seu real valor, implicando numa desaprovação compreensível por parte de parcela significativa da comunidade mundial. O emprego de reatores nucleares encontra oposição, agravado por acidentes que, não raro, impactam grandes áreas com contaminação radioativa perigosa para a vida. Não obstante essa observação inicial, existem mais motivos para aprovar que para condenar as aplicações pacíficas da energia nuclear.

Enquanto o Projeto Manhattan estava em andamento, que culminaria no desenvolvimento de bombas atômica, eram realizadas pesquisas para a produção de energia a partir do urânio. Em dezembro de 1942, o físico italiano Enrico Fermi provou que uma reação sustentada provocada pela fissão do urânio era possível ao realizar um experimento na Universidade de Chicago (TAVARES, 2015, p. 9), num arranjo conhecido como *Chicago Pile*. O experimento consistiu no emprego de uma quantidade de urânio que, segundo era teorizado, uma vez iniciada a fissão dos núcleos de seus átomos, promoveria um processo sustentado de fissões sucessivas, o que se mostrou verdadeiro.

A fissão nuclear do urânio libera grande quantidade de energia que pode ser convertida em calor, sendo a base para a geração termonuclear. Nas décadas que se seguiram, diversas pesquisas foram realizadas, validando diferentes utilizações pacíficas para os materiais radioativos. Conforme registra Neto (2021, p. 18), “o setor nuclear é um dos grandes portadores de futuro” e “tecnologias nucleares impactam diretamente em todas as áreas do conhecimento humano, estando suas aplicações cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas”.

Os benefícios advindos da tecnologia nuclear transcendem a geração de energia; os efeitos decorrentes do uso pacífico de materiais radioativos encontram aplicações variadas nos campos da medicina, agricultura, indústria, conservação de alimentos, entre outros (MOTTER, 2018). A utilização principal, entretanto, refere-se à geração de energia elétrica.

A segurança energética é matéria que está em pauta na agenda internacional, motivado por fatores como a transição energética e o conflito Russo-Ucraniano. Esse conflito, iniciado no dia 24 fevereiro de 2022, tem impactado a economia europeia. De todo

o gás natural consumido naquele continente, 40% são importados da Rússia, que, alegando problemas técnicos, tem ameaçado reduzir o fornecimento. O preço desse insumo mais do que dobrou na Europa entre os meses de junho e julho deste ano, contribuindo para uma inflação generalizada e trazendo insegurança energética para o bloco (CAUTTI, 2022). É um alerta para os países europeus quanto à necessidade de reduzir sua dependência de fontes externas, com reflexos no planejamento energético dos países afetados.

A transição energética tem tratamento mais perene e diz respeito a aumentar a participação de fontes de energia menos poluentes, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), que agravam o aquecimento global.

As fontes de geração que utilizam combustíveis fósseis são as principais responsáveis por essas emissões e pretende-se que sua participação seja reduzida, com substituição gradual por outras fontes. A respeito dessa preocupação, a Organização das Nações Unidas (ONU) registra, entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável⁶, o objetivo de número 7, específico para a promoção da transição energética, buscando energia limpa e acessível, conforme FIG. 1.



FIGURA 1 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

FONTE: Nações Unidas Brasil.

Dando mais um passo em direção à transição energética, o Parlamento Europeu aprovou, em 6 de julho deste ano, uma proposta que classifica o gás natural e a energia

6 As Nações Unidas lançaram, em 2015, um conjunto de 17 objetivos visando, conforme site oficial no Brasil, “acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade” (NAÇÕES UNIDAS, 2022).

nuclear como “investimentos verdes” (DEUTSCHE WELLE BRASIL, 2022b). Na prática, essa decisão abre caminho para que investimentos privados sejam feitos nessas duas modalidades, dado que passam a ser considerados sustentáveis. A classificação para o gás natural é menos apropriada, pois é uma fonte que ainda gera GEE, apesar de suas emissões ficarem abaixo das emissões provocadas pela queima do carvão mineral e dos derivados de petróleo. A energia nuclear, conforme comentado, não emite esses gases. No contexto do conflito Russo-Ucraniano, essa decisão veio ao encontro da busca por alternativas que contribuam para a segurança energética dos países europeus.

As diferentes fontes de energia de que se utiliza um país compõem a sua matriz energética. É comum que esta seja confundida com a matriz elétrica tratando-se, na verdade, de definições distintas.

A matriz energética diz respeito ao conjunto de todas as fontes de energia disponíveis para qualquer uso, como abastecer automóveis, movimentar indústrias, aquecer as residências, entre outras aplicações; tais fontes são utilizadas, inclusive, para gerar energia elétrica; a matriz elétrica, de significado mais restrito, é formada pelas fontes que contribuem para a geração de energia elétrica.

A transição energética demanda o emprego crescente de fontes não geradoras de GEE, contando com diferentes modalidades de geração. Considerando as opções tecnológicas disponíveis, as usinas termonucleares são uma opção interessante. Conforme Heider (2008, p. 79), a geração termonuclear é uma modalidade que não gera GEE ou que possam gerar chuva ácida; bem como não emite metais carcinogênicos, teratogênicos ou mutagênicos⁷ nem liberam partículas que causem poluição urbana ou redução da camada de ozônio. Possuem, ainda, a vantagem de não depender de condições climáticas, como as modalidades solar e eólica, reduzindo, ainda, as potenciais sazonalidades da modalidade hidrelétrica. Dessa forma, as usinas de geração termonuclear poderão ser, nos próximos anos, protagonistas no processo de busca por autonomia energética, transição para fontes não poluentes e estabelecimento de uma matriz energética diversificada e confiável.

Desde a construção das primeiras usinas nucleares, avanços tecnológicos tornaram essa modalidade mais eficiente e sua implementação está atrelada a fatores

7 Carcinogênica é a qualidade daquilo capaz de provocar ou estimular o aparecimento de carcinomas ou câncer em um organismo; teratogênica é a substância, organismo, agente físico ou estado de deficiência que, estando presente durante a vida embrionária ou fetal, produz uma alteração na estrutura ou função da descendência; mutagênico é qualquer material com potencial para induzir mutações genéticas.

econômicos dessa modalidade frente a outras opções. Outros fatores podem ser determinantes para o crescimento da participação nuclear na matriz energética de um país. No caso brasileiro, por exemplo, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) destaca que o tempo requerido para licenciar e construir novas centrais termonucleares; a capacidade de oferta de combustível nacional; e a escala da indústria de fornecimento são fatores que balizam a expansão desse tipo de geração no País (BRASIL, 2020).

A capacidade de produzir combustível nuclear representa uma vantagem para os países que operam reatores, visto que robustecem a disponibilidade desse insumo, reduzindo ou anulando a dependência externa. Para tanto, dois requisitos são fundamentais: possuir o mineral nuclear necessário; e dominar a tecnologia relativa ao ciclo do combustível nuclear. O Brasil atende a esses dois requisitos.

Os tópicos a seguir descrevem as etapas para obtenção do combustível nuclear e a participação da geração de energia termonuclear na matriz energética mundial.

2.1 Combustível nuclear

Combustível nuclear é, conforme definido na Política Nuclear Brasileira, o dispositivo com capacidade de produzir energia por meio do processo autossustentado de fissão nuclear (BRASIL, 2018).

A fissão nuclear foi estudada pelos químicos alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann, que perceberam que o urânio, quando bombardeado por nêutrons lentos⁸, gerava elementos identificáveis, de menor massa atômica. Coube à física austríaca Lise Meitner e seu sobrinho, Otto Frisch, interpretar esse fenômeno, batizando-o de fissão (TAVARES, 2015, p. 6-7), que significa que o núcleo do urânio, ao incorporar um nêutron lento, torna-se instável, partindo-se em dois elementos menores e liberando calor.

Referente aos materiais nucleares, diferentes elementos químicos possuem a propriedade de incorporar nêutrons em seus núcleos ocorrendo, basicamente, dois fenômenos. Num primeiro caso, o nêutron absorvido causa instabilidade, resultando na fissão do elemento; esses são os elementos físseis. Num segundo caso, a incorporação do

⁸ Ao serem liberados por seu material de origem, os nêutrons possuem alta energia cinética, sendo conhecidos como nêutrons rápidos. Nêutrons lentos – também chamados de nêutrons térmicos – são aqueles que, ao serem liberados, atravessam um material moderador, tendo sua energia reduzida para uma faixa tal que possibilite a absorção desse nêutron por núcleos de certos elementos químicos.

nêutrons, após transformações químicas que ocorrem espontaneamente, produz a transmutação do elemento; esses são os elementos férteis, que geram elementos físséis.

Os principais materiais nucleares de interesse para geradores termonucleares são apresentados no QUADRO 1.

QUADRO 1
Materiais físséis e férteis de interesse para geração termonucleares

Elemento ⁹	Símbolo	Tipo	Obtenção	Fenômeno ao incorporar um nêutron ao núcleo
Tório de massa 232	Th232	Fértil	Natureza	Produção de U233
Urânio de massa 233	U233	Físsil	A partir do Th232	Produção de energia
Urânio de massa 235	U235	Físsil	Natureza	Produção de energia
Urânio de massa 238	U238	Fértil	Natureza	Produção de Pu239
Plutônio de massa 239	Pu239	Físsil	A partir do U238	Produção de energia

Fonte: TAVARES, 2015, p. 8.

Nota: Adaptado pelo autor, com inclusão da primeira e última colunas.

Tanto o urânio de massa atômica 235 (U235)¹⁰, quanto o plutônio de massa atômica 239 (Pu239), quando fissionados, liberam dois ou três nêutrons, que podem atingir novos núcleos, promovendo um processo autossustentado, que é denominado de reação em cadeia. Conforme mostrado no QUADRO 1, o Pu239 não existe na natureza, exceto por quantidades ínfimas geradas espontaneamente em minério de urânio. Esse elemento é obtido a partir do urânio de massa atômica 238 (U238), produzido em reatores nucleares projetados para esse propósito. A obtenção do Pu239 demanda uma etapa chamada de reprocessamento, quando o material, após ser gerado a partir do U238, recebe uma série de tratamentos físicos e químicos para sua recuperação.

Apenas o U235 é um elemento encontrado na natureza com capacidade de produzir energia. As usinas termonucleares brasileiras existentes (Angra 1 e Angra 2) e em construção (Angra 3), bem como os programas estratégicos da MB, utilizam o U235 como combustível nuclear, material mais utilizado para esse fim a nível mundial.

9 Para muitas finalidades, os elementos químicos são identificados por sua massa atômica, que corresponde à soma do número de prótons e do número de nêutrons presentes no núcleo do elemento.

10 O elemento químico urânio possui número atômico 92, indicando a presença de 92 prótons em seu núcleo. O número de nêutrons pode variar e os valores mais comuns são 143 e 146 nêutrons, gerando o U235 e o U238 respectivamente. Elementos que possuem o mesmo número atômico são chamados de isótopos.

Normalmente, o elemento químico urânio (U) é encontrado na natureza na forma de óxido de urânio U3O8, associado, normalmente, a outros minerais. A proporção da ocorrência de U3O8 é o que determina seu aproveitamento comercial.

Conforme a TAB. 1, mesmo tendo menos de um terço de seu território prospectado, o Brasil detém uma importante parcela das reservas mundiais de minério de urânio com aproveitamento comercial.

TABELA 1
Reservas mundiais de urânio (2019)

País	Reservas de urânio (t)	Participação nas reservas mundiais
Austrália	1.692.700	27,53%
Cazaquistão	906.800	14,75%
Canadá	564.900	9,19%
Rússia	486.000	7,91%
Namíbia	448.300	7,29%
África do sul	320.900	5,22%
Brasil	276.800	4,50%
Nigéria	276.400	4,50%
China	248.900	4,05%
Mongólia	143.500	2,33%
Uzbequistão	132.300	2,15%
Ucrânia	108.700	1,77%
Botsuana	87.200	1,42%
Tanzânia	58.200	0,95%
Jordânia	52.500	0,85%
EUA	47.900	0,78%
Outros países	295.800	4,81%
Total das reservas mundiais	6.147.800	

Fonte: *World Nuclear Association* (WNA, 2022b).

Nota: Valores percentuais da última coluna recalculados pelo autor.

De acordo com a INB, a região Norte do Brasil abriga, potencialmente, mais 300 mil toneladas de urânio, dobrando as reservas nacionais desse minério (INB, 2022g). Os valores expressos na TAB. 1 referem-se à ocorrência de urânio na sua proporção natural, que é, para efeitos práticos,

- 99,3% de U238 (não contribui para a geração de energia); e
- 0,7% de U235 (gera energia térmica pelo processo de fissão nuclear).

É importante ressaltar que os valores da TAB. 1 referem-se às quantidades de U extraídas das rochas, que apresentam diferentes níveis de concentração desse elemento. Concentrações com aproveitamento comercial variam de 0,1% a 2% de U. De acordo com a WNA, concentrações raras são encontradas no Canadá, com até 20% de U no minério nuclear (WNA, 2022b). As quantidades relativas à obtenção de 1Kg de U235, partindo de uma concentração típica de 0,5% de U no mineral nuclear, são apresentadas na FIG. 2.



FIGURA 2 – Quantidade de material necessário para obtenção de 1Kg de U235, com base em mineral nuclear contendo 0,5% de urânio natural em sua composição.

Fonte: o autor.

O ciclo do combustível nuclear é um conjunto de etapas que, por transformações químicas, processos físicos e atividades fabris, convertem o minério de urânio em combustível nuclear na forma de elementos combustíveis, que são empregados em reatores nucleares.

A primeira etapa do ciclo refere-se à prospecção do território para identificar os locais onde se encontram as jazidas de urânio. Após a identificação das jazidas com potencial de aproveitamento comercial, seguem-se as etapas de mineração e de beneficiamento, que consiste na retirada de impurezas e produção do *Yellow Cake*, um composto de coloração amarela contendo alto teor de urânio em sua concentração natural (INB, 2022d).

O *Yellow Cake*, pelo processo de conversão, é transformado em hexafluoreto de urânio (UF6). Este composto tem a propriedade de se manter em estado gasoso mesmo em temperaturas próximas à temperatura ambiente, que é o estado necessário para a etapa do enriquecimento.

Enriquecer consiste em elevar a proporção do U235. Para geradores termonucleares do tipo Reator de Água Pressurizada (*Pressurized Water Reactor* ou PWR), a

proporção de U235 deve estar entre 3% e 5%.¹¹ Os PWR compõem a maioria das usinas termonucleares em operação no mundo, sendo o tipo empregado nas usinas de Angra 1, Angra 2 e Angra 3.

Uma vez alcançado o nível de enriquecimento requerido, o UF₆ passa pela reconversão, quando volta ao estado sólido na forma de dióxido de urânio (UO₂) (INB, 2022h). Após essa etapa, é realizada a fabricação das pastilhas de combustível nuclear que compõem, finalmente, os elementos combustíveis. Estes são inseridos num reator, formando seu núcleo.

Iniciada a reação autossustentada da quebra dos núcleos de urânio (reação em cadeia), tem-se a geração de energia térmica que produz o vapor para acionamento de turbinas ligadas a geradores de energia elétrica. A FIG. 3 apresenta as etapas do ciclo.

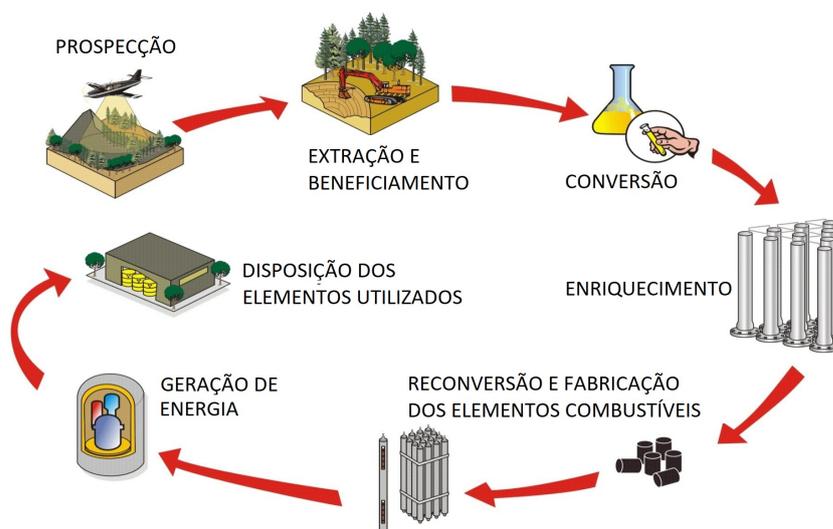


FIGURA 3 – Ciclo do combustível nuclear.

Fonte: Revista Brasil Nuclear, Ano 23, n. 48, p. 10, maio 2018.

Nota: imagem adaptada pelo autor.

Finalizada sua vida útil, os elementos são substituídos, ocorrendo a disposição dos elementos utilizados, inservíveis para a geração de energia.

Ressalta-se que, quando de sua retirada, os elementos combustíveis apresentam quantidades de U235 que podem ser aproveitadas, além possuir grande quantidade de

11 A WNA disponibiliza informações que detalham as etapas do ciclo do combustível nuclear, incluindo as diferentes tecnologias aplicadas ao processo de enriquecimento (WNA, 2020).

U238, matéria-prima para a produção de plutônio, que é, conforme apresentado anteriormente, um material físsil aproveitado em reatores termonucleares próprios. Dessa forma, os elementos retirados de reatores nucleares apresentam grande potencial de utilização futura.

Conforme a CF brasileira, a União detém o monopólio para a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados (BRASIL, 1988a). A execução dessas atividades é concedida à INB, empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia.

No que diz respeito à capacidade industrial de processar o ciclo do combustível nuclear, a INB, além de ter as atribuições de realizar a prospecção e a lavra do minério de urânio, é responsável pela fabricação do combustível nuclear para as usinas da CNAEA (INB, 2022i), localizada no município de Angra dos Reis. A INB tem capacidade industrial para processar as etapas relativas a

- 1 – mineração;
- 2 – enriquecimento (parcial);
- 3 – reconversão e fabricação de pó e de pastilhas; e
- 4 – fabricação de elementos combustíveis. (INB, 2022c)

Com relação ao ciclo, a MB, em parceria com o IPEN, desenvolveu tecnologia nacional, obtendo o domínio tecnológico para converter o minério de urânio em combustível nuclear, processando todas as etapas intermediárias. Quanto à produção em escala industrial, está sendo implantado no Centro Experimental Aramar (CEA)¹² um complexo industrial que realizará, quando concluído, as seguintes etapas¹³:

- 1 – conversão;
- 2 – enriquecimento;
- 3 – reconversão e fabricação de pó e pastilha; e
- 4 – fabricação de elementos combustíveis.

A etapa relativa ao enriquecimento, que representa a parcela de maior complexidade, está implementada no CEA desde 1988, no Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI) (CNEN, 2022d). O emprego do combustível nuclear será realizado, para os

12 O CEA localiza-se no município de Iperó-SP. Suas instalações industriais são dedicadas ao ciclo do combustível nuclear, sendo projetadas, contratadas e implantadas pela Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha (DDNM) e operadas e mantidas pelo Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA).

13 Em visita realizada pela turma C-PEM/2022 ao CEA, em 4 de maio de 2022, verificou-se que parte dessas instalações encontra-se em processo de implantação.

objetivos do PNM, quando o Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica (LABGENE), atualmente em fase de implantação no CEA, entrar em operação. Essa atividade está fora do escopo deste trabalho. A FIG. 4 delimita as etapas do ciclo que esta pesquisa analisa.

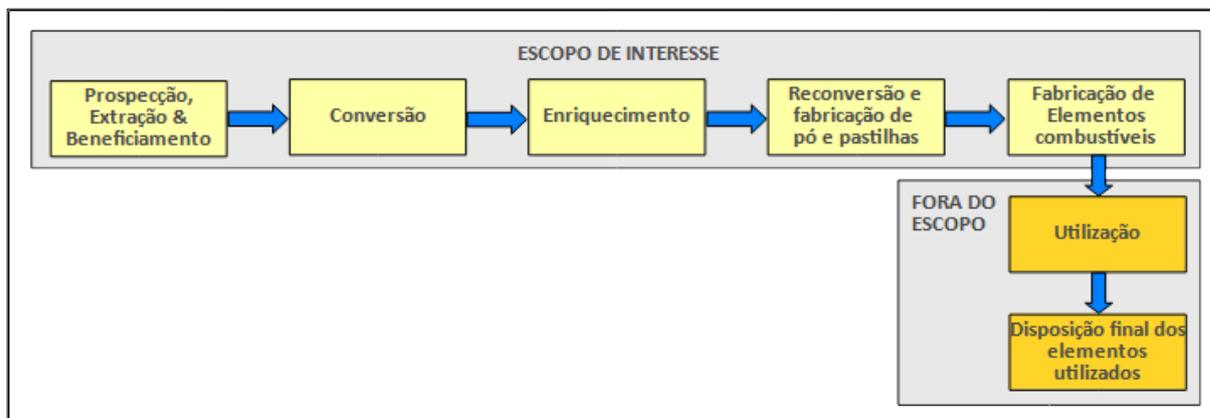


FIGURA 4 – Etapas do ciclo do combustível nuclear incluídas no escopo da pesquisa.

Fonte: o autor.

Nota-se que, considerando a conjugação de esforços entre a MB e a INB, quando da prontificação das instalações do CEA, o Brasil estará em condições de produzir, de forma autônoma, combustível nuclear. A capacidade de produção deverá ser avaliada, visto que as instalações da MB estão dimensionadas para atender, a princípio, as demandas dos seus programas estratégicos – PNM (LABGENE) e PROSUB (SN-BR). Ao mencionar a necessidade de se avaliar a magnitude que a expansão termonuclear pode significar para o País, o PNE 2050 registra que, “caso se alcance economia de escala suficiente, a fabricação de combustível pode gerar a possibilidade de exportação do combustível nuclear” (BRASIL, 2020, p. 131).

A geração termonuclear, além de não emitir GEE, conta com as seguintes características vantajosas:

- a) independe de condições climáticas, como ocorre para a geração eólica e solar;
- b) pode ser posicionada próxima aos centros consumidores, ao contrário das modalidades hídrica, solar e eólica, cujo posicionamento é determinado por condições geográficas ou climáticas;
- c) não é vulnerável a sazonalidades, como ocorre com a geração hídrica;

- d) a produção de energia pode ser regulada de acordo com a demanda, diferente das fontes solar e eólica, cuja geração ocorre de forma independente da demanda de consumo;
- e) alta densidade de energia, implicando área reduzida para sua instalação quando comparada com as demais modalidades; e
- f) adicionalmente, para o Brasil, tem-se reservas consideráveis de minério de urânio e domínio tecnológico do ciclo do combustível nuclear.

Qualquer modalidade de geração de energia apresenta desvantagens, que devem ser pesadas em comparação com outras possibilidades à disposição. Custo de implementação, custo da geração, impacto ambiental, domínio da tecnologia, geração de resíduos e diversificação da matriz energética são alguns dos fatores levados em consideração na escolha de uma modalidade.

Os cuidados inerentes ao emprego de usinas nucleares são consideráveis. O mesmo combustível nuclear, enriquecido a determinados níveis, pode ser empregado para a fabricação de armas nucleares. Nesse sentido, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, da sigla em inglês) desempenha um papel relevante ao fiscalizar a movimentação e a utilização de material radioativo nos países signatários do Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP). O Brasil é um dos 190 Estados signatários do TNP.

Os resíduos nucleares gerados devem ser adequadamente dispostos e qualquer material nuclear deve ser objeto de proteção contra acidentes e contra acesso indevido, de forma a evitar usos não autorizados desse material.

A opinião pública tem grande influência sobre a implementação de políticas que intencionem expandir a participação da energia nuclear. A rejeição à instalação de usinas nucleares deve ser tratada pelo estado. Nesse sentido, o PNE 2050, apontando os seis principais desafios para uma maior participação da geração termonuclear no Brasil, indica, no topo da lista, a necessidade de comunicar de forma efetiva o papel da energia nuclear, registrando que

é preciso aperfeiçoar a comunicação à sociedade acerca de aspectos relacionados à segurança das usinas e da armazenagem de combustível usado, visto que, mesmo com ocorrências restritas de eventos com usinas nucleares, houve o aumento da percepção de risco, sobretudo, após o acidente de Fukushima. Nesse sentido, é fundamental prover informações mais amplas ao público em geral acerca dos padrões de segurança da

tecnologia nuclear, protocolos de armazenamento de combustíveis e planos de contingência a fim de que a percepção de risco se torne mais aderente ao registro de eventos da indústria (BRASIL, 2020, p. 130).

Muito embora existam movimentos contrários à expansão das usinas nucleares, pode-se prever um crescimento dessa modalidade a nível mundial. Dois grandes setores se beneficiam desse mercado potencial. De um lado, tem-se a indústria do combustível nuclear e, de outro lado, o mercado de geração de energia.

2.2 Usinas nucleares existentes e em construção

A matriz energética mundial é composta por diferentes fontes, que podem ser divididas em dois grandes grupos, cujas participações no consumo mundial em 2019 são apresentadas no QUADRO 2.

QUADRO 2
Principais fontes de energia e suas participações no consumo mundial de energia em 2019

FONTES	PARTICIPAÇÃO A NÍVEL MUNDIAL (2019)		
	MATRIZ ENERGÉTICA	MATRIZ ELÉTRICA	
Não renováveis	Carvão mineral	27,00%	36,80%
	Gás natural	31,10%	2,80%
	Petróleo e derivados	23,00%	23,50%
	Nuclear	5,00%	10,20%
Renováveis	Hidráulica	2,60%	16,10%
	Biomassa	9,30%	2,40%
	Outras ¹⁴	2,00%	8,20%

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022c).

Nota: Convertido de gráfico para tabela pelo autor.

Percebe-se uma expressiva participação da energia gerada em 2019 a partir de fontes fósseis (carvão mineral, gás natural, petróleo e derivados), que representou uma parcela de 81% para a matriz energética e 63% para a matriz elétrica mundial. Essas são as três principais fontes de energia que agravam o aquecimento global pela emissão de GEE, além de emitirem outros poluentes que prejudicam a saúde e o meio ambiente.

¹⁴ Solar, eólica, geotérmica e oceânica.

As fontes renováveis aumentam ano a ano a sua participação na matriz energética mundial, contribuindo, ao lado da modalidade termonuclear, para os objetivos da transição energética. O ritmo, no entanto, não atende a ambiciosa meta de alcançar a neutralidade de emissões de carbono até 2050.¹⁵ Conforme a IEA, para que a meta seja atingida, as modalidades de geração não poluentes deveriam triplicar seu ritmo de expansão.¹⁶ A pressão para tal crescimento, notadamente para as modalidades solar e eólica, deve-se a dois fatores: aumento da demanda para manutenção do crescimento sustentável dos países; e transição energética. Entretanto, mesmo que haja a reversão do quadro atual, de forma que fontes renováveis venham a ocupar a maior parte na matriz energética mundial, existe, para a maioria delas, uma vulnerabilidade intrínseca, conforme QUADRO 3.

QUADRO 3
Principais fontes de energia renováveis e suas vulnerabilidades

FONTE RENOVÁVEL	VULNERABILIDADE
Hidráulica	Depende do regime de chuvas, sendo afetada por longos períodos de seca.
Solar	Dependente de condições climática; não gera energia no período noturno.
Eólica	Depende de condições climáticas, sendo afetada por eventuais calmarias.

Fonte: o autor.

Apesar de tratar-se de uma fonte renovável, a modalidade hidrelétrica apresenta potencial finito dado que, esgotadas as possibilidades de aproveitamento, esgota-se a possibilidade de expansão. No caso brasileiro, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), há um aproveitamento de 60% do potencial hidrelétrico e, da parcela não explorada, 70% está localizado nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins-Araguaia (EPE, 2022a). O aproveitamento desse potencial depende de estudos de viabilidade econômica e ambiental. Diferentemente da geração termonuclear, que pode ser instalada nas proximidades dos centros consumidores, as hidrelétricas demandam, via de regra, longas linhas de transmissão entre os pontos de geração e os pontos de consumo.

15 Meta estabelecida durante a COP21 – Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em dez. 2015, em Paris (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

16 IEA, 2022b. Seção: *Nuclear power can play an important role in clean energy transitions*.

No que se refere à expansão das modalidades solar e eólica, por tratar-se de fontes dependentes de condições climáticas, tais fontes podem demandar a instalação de usinas térmicas nas proximidades, como forma de reduzir eventuais interrupções de fornecimento. A IEA avalia que, conforme a participação dessas fontes renováveis aumente, a necessidade de plantas termonucleares deverá crescer (IEA, 2022a). Nesse contexto, verifica-se um potencial para aumento da participação termonuclear na matriz elétrica a nível global.

Conforme a WNA, o número de reatores nucleares dedicados à geração de energia elétrica variou pouco nos últimos anos, saltando de 435 unidades em janeiro de 2007 – início da série histórica – para as 440 unidades atuais.¹⁷ A TAB. 2 apresenta o número de reatores instalados atualmente, agrupados por continente.

TABELA 2
Quantidade de usinas termonucleares por continente (junho de 2022).

CONTINENTE	REATORES EM OPERAÇÃO	REATORES EM CONSTRUÇÃO	REATORES PLANEJADOS
ÁFRICA	2	0	4
AMÉRICAS	118	4	4
ÁSIA	147	40	51
EUROPA	173	11	36
TOTAIS:	440	55	95

Fonte: World Nuclear Association (WNA, 2022d).

Nota: Totalização por continente feita pelo autor.

Apesar da aparente estagnação quanto ao número de usinas termonucleares instaladas, é importante observar que existem 55 unidades em construção e outras 95 em fase de planejamento. As principais variações positivas ocorridas nos últimos quinze anos se encontram na Ásia. A China variou de 11 para 54 unidades nesse período, tendo outras 18 em construção; a Índia, de 17 para 23 unidades, com 8 em construção. Na direção contrária, a Alemanha reduziu o número de usinas nucleares de 17 para 3 no mesmo período, com forte influência do acidente de Fukushima (2011), quando 8 unidades foram fechadas só naquele ano. De maneira semelhante, houve redução de 55 para 33 unidades no Japão que, no entanto, está construindo duas unidades. Alguns países apresentam redução na

¹⁷ No site da WNA é mantida série histórica, iniciada em janeiro de 2007, que informa, por país, o número de usinas termonucleares em operação, em construção, planejadas e propostas, além da quantidade de urânio requerido para a operação (WNA, 2022d).

quantidade de suas usinas termonucleares devido à idade das instalações, como é o caso dos Estados Unidos da América (EUA) e da Inglaterra, com redução de 104 para 93 e de 19 para 11, respectivamente. Esses dois países estão construindo, cada um, duas novas usinas.

A despeito do desligamento de algumas unidades, o número de usinas em construção e em fase de planejamento indica tendência de crescimento da participação termonuclear na matriz energética mundial, o que exigirá um incremento na demanda por combustível.

2.3 Combustível nuclear – demanda nacional e mundial

Poucos países detêm a produção comercial de combustível nuclear. O QUADRO 4 apresenta as empresas que operam no mercado internacional nas áreas de conversão e enriquecimento do urânio, que são as etapas de maior complexidade.

QUADRO 4 – Principais empresas que operam comercialmente etapas da indústria do combustível nuclear.

ETAPA	EMPRESAS COMERCIAIS
CONVERSÃO	Orano (França), CNNC (China), Cameco (Canadá) e Rosatom (Rússia).
ENRIQUECIMENTO	Orano (França), Urenco (Alemanha, Holanda, Reino Unido e EUA) e Tenex (Rússia).

Fonte: World Nuclear Association (WNA, 2020, 2022a).

Nota: Dados compilados pelo autor.

Outros países enriquecem urânio em pequenas quantidades para consumo interno (Japão, Brasil, Argentina, Índia, Paquistão e Irã). A China tem uma boa capacidade de processamento, direcionando sua produção, igualmente, para consumo interno (WNA, 2020).

Para o abastecimento das usinas termonucleares em operação, são necessárias 44.462 toneladas anuais de urânio, de acordo com dados da WNA.¹⁸ Considerando as reservas de urânio atualmente conhecidas (ver TAB. 1), as mesmas podem atender a demanda global para um período aproximado de 130 anos.¹⁹ Essa estimativa tende a

¹⁸ Somatório das quantidades de urânio requeridas por todos os países em 2021, de acordo com planilha da WNA (WNA, 2022d).

¹⁹ Resultado da razão direta entre a quantidade mundial confirmada de urânio (6.147.800 ton, TAB. 1) pela necessidade anual (44.462 ton/ano, de acordo com a WNA).

decrecer de acordo com a construção e operação de novos reatores nucleares. Entretanto, considerando que a exploração comercial do minério de urânio depende do custo de extração e do preço do minério no mercado, havendo elevação deste, passa a ser viável a exploração comercial de jazidas contendo minério com baixa proporção de urânio. Além disso, a prospecção de novas áreas tende a incrementar as reservas de urânio, visto tratar-se de um metal relativamente comum na crosta terrestre.

No caso do Brasil, considerando dados da INB (INB, 2022g) e a quantidade de urânio estimada para atender as usinas termonucleares de Angra 1, 2 e 3 (HEIDER, 2008, p. 82), tem-se, na FIG. 5, a estimativa de duração das reservas brasileiras de urânio para atender exclusivamente essa finalidade.

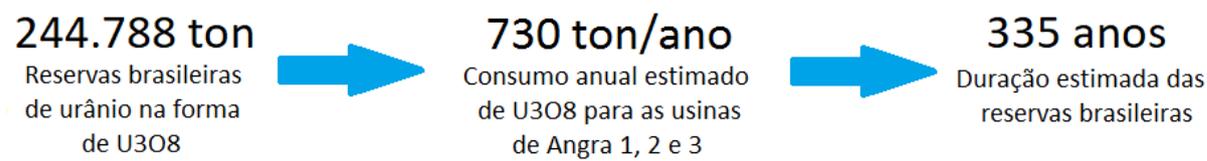


FIGURA 5 – Estimativa de duração das reservas brasileiras de urânio

Fonte: o autor

As necessidades da MB não foram computadas mas, por tratar-se de reator com potência reduzida em relação às usinas de Angra, haverá baixo impacto ao serem consideradas. Novamente, registra-se que essa estimativa deve decrescer de acordo com o número de reatores que venham a ser operados no Brasil. Por outro lado, a mesma estimativa deve crescer, à medida que novas jazidas venham a ser descobertas.

Mesmo que haja expansão da modalidade de geração termonuclear em território nacional, existe potencial para que o Brasil seja exportador de combustível nuclear, mostrando a atratividade que essa indústria pode representar para que maiores incentivos sejam dedicados à fabricação de combustível nuclear no Brasil.

Neste capítulo foram apresentados aspectos da energia nuclear que evidenciam que o mercado de combustível nuclear é promissor. Inicialmente, comentou-se sobre a descoberta dos fenômenos nucleares relativo ao urânio, sendo o seu principal uso comercial a geração de energia elétrica em usinas termonucleares. Tal aplicação demanda que elementos combustíveis sejam fabricados, implicando numa série de etapas químicas e

físicas que transformam o minério de urânio em elementos que abastecem os núcleos dos reatores. No que se refere ao minério de urânio, verifica-se que o Brasil ocupa posição de destaque entre as reservas mundiais, possuindo, ainda, a tecnologia para processar completamente o ciclo do combustível nuclear. Esses fatores, aliados a incentivos que promovam o efetivo crescimento dessa indústria, permitirão que o Brasil se torne autossuficiente quanto à sua necessidade de combustível nuclear, tornando-se, eventualmente, num exportador desse produto. Por fim, evidencia-se que a geração termonuclear apresenta uma série de vantagens em relação às fontes renováveis, pois, além de contribuírem para a transição energética, as usinas termonucleares podem ser instaladas próximas aos centros consumidores; não estão sujeitas a variações climáticas; e sua geração pode ser ajustada à demanda, entregando energia à medida que os utilizadores necessitem.

No capítulo seguinte são comentados o PNB e o PNM, cujas histórias são exemplos de sucesso, tanto de absorção quanto de desenvolvimento de tecnologia, demonstrando que não falta capacidade técnica ao Brasil para a condução de programas dessa complexidade.

3 DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL

O interesse brasileiro no desenvolvimento de tecnologia nuclear se inicia na década de 1930. Os fenômenos associados à radiação de elementos químicos e a descoberta da fissão nuclear abriram caminho para estudos na busca de identificar aplicações práticas para esse novo ramo da ciência.

No Brasil, o envolvimento do Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva foi fundamental para a formação do posicionamento nacional em busca do domínio da tecnologia nuclear (MB, 2022b). Ele foi pioneiro nas pesquisas sobre energia nuclear no Brasil e, entre outros feitos de grande importância, atuou de forma relevante para a criação do PNB, caracterizado pelas políticas adotadas pelo Brasil para o setor nuclear, incluindo os acordos firmados com diferentes nações detentoras de conhecimento na área (SANTOS, 2007).

Os dois países que mais se envolveram com o Brasil em matéria de tecnologia nuclear, nas décadas de 1950 a 1980, foram os EUA e a Alemanha (KURAMOTO e APPOLONI, 2002). Este último contribuiu de maneira relevante para o estabelecimento das primeiras instalações industriais voltadas às atividades nucleares no Brasil. No entanto, esses acordos não permitiam alcançar a autonomia que o País almejava para o setor (CABRAL, 2011).

Em meados da década de 1970, são iniciadas pesquisas, por parte das Forças Armadas, para o desenvolvimento de tecnologia própria na área nuclear (SILVA, 2014). Na MB, é estabelecido, em 1979, o PNM. Esse programa foi – e continua sendo – de importância estratégica para o PNB.

3.1 O Programa Nuclear Brasileiro e o Programa Nuclear da Marinha

O PNB diz respeito ao desenvolvimento da tecnologia nuclear e ao planejamento de sua utilização a nível nacional. Esse Programa tem suas diretrizes definidas pela Política Nuclear Brasileira – Decreto Nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018 – que disciplina as áreas de exploração de recursos minerais radioativos, pesquisa e desenvolvimento de tecnologia no

País, formação de recursos humanos e planejamento da expansão da parcela nuclear na matriz energética brasileira (BRASIL, 2022).

As pesquisas na área nuclear no Brasil datam de 1934, com a criação da Universidade de São Paulo e do seu Departamento de Física, onde se iniciaram investigações relativas a radiação cósmica, radioatividade e física teórica.²⁰

A partir da década de 1950, com a criação do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq)²¹, o desenvolvimento nuclear ganha impulso, dado que o CNPq, criado para fomentar o desenvolvimento da investigação científica em qualquer domínio do conhecimento, tinha especial interesse no campo da física nuclear (CNPq, 2022b). À época, o Brasil mantinha acordos com os Estados Unidos, exportando material radioativo de maneira pouco vantajosa para o País. O Almirante Álvaro Alberto era contrário a essa política de facilitação e, conforme registra Neto,

O Almirante [Álvaro Alberto] formulou o Princípio das Compensações específicas, que previa basicamente que o Brasil estaria disposto a fornecer matérias-primas nucleares aos países interessados, desde que a contrapartida fosse a troca por tecnologias e equipamentos para o desenvolvimento de uma indústria nuclear nacional (NETO, 2021, p. 20).

Essa visão foi fundamental para dar força à mentalidade de desenvolvimento de tecnologia própria. Contribuíram para esse esforço a criação de três instituições relacionadas à área nuclear: a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), o Instituto de Energia Atômica e a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN). Estas duas últimas viriam a ser denominadas IPEN e INB, respectivamente (CNEN, 2022b).

A CNEN, criada em 1956, é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações com a missão de desenvolver a política nacional de energia nuclear; regulamentar a atividade de radioproteção; e regular, licenciar e fiscalizar a produção e o uso da energia nuclear no Brasil (CNEN, 2022a). Com a criação, pela Lei 14.222, de 15 de outubro de 2021, da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), é esperada uma divisão de responsabilidades, ficando as atividades de pesquisa, fomento e desenvolvimento com a CNEN, e passando a ANSN a exercer as atividades

20 A CNEN mantém em sua página na internet, na Biblioteca Digital Memória da CNEN, os principais fatos que marcam a história do desenvolvimento nuclear brasileiro (CNEN, 2022b).

21 Posteriormente, pela Lei n. 6.129/1974, O Conselho Nacional de Pesquisa tem sua denominação alterada para Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, mantendo a sigla CNPq (CNPq, 2022c).

regulatórias – regulação, licenciamento e fiscalização (BRASIL, 2021). A CNEN, por ora, responde pela totalidade das atividades citadas até que se formalize a divisão de competências.

O IPEN, também criado em 1956, é uma autarquia vinculada ao Governo do Estado de São Paulo e recebeu, inicialmente, a denominação de Instituto de Energia Atômica. A gestão técnica e administrativa do IPEN é de competência da CNEN (IPEN, 2022a). Esse Instituto, localizado no campus Butantã da Universidade de São Paulo (USP), realiza pesquisas em diferentes setores da atividade nuclear, incluindo radioisótopos, reatores nucleares, ciclo do combustível nuclear, radioproteção, entre outros (IPEN, 2022a).

A CBTN, responsável pela pesquisa, lavra e tratamento de minério nuclear, foi criada em 1971, pela Lei Nº 5.740 de 1º de dezembro de 1971 (BRASIL, 1971). Em 1974, a CBTN é fortalecida e passa a se denominar Empresas Nucleares Brasileiras Sociedade Anônima – NUCLEBRÁS, que assume a execução das atividades do acordo Brasil-Alemanha para a construção de usinas nucleares e a implementação, no Brasil, de instalações responsáveis pela fabricação de combustível nuclear, incluindo o processo de enriquecimento de urânio (CNEN, 2022b).

Com base no acordo de cooperação Brasil-Alemanha, foram estabelecidos contratos entre a NUCLEBRÁS e empresas alemãs de tecnologia, culminando na criação de sete subsidiárias, cobrindo as áreas de engenharia (NUCLEN), mineração (NUCLAM), caldeiraria pesada (NUCLEP), pesquisa de materiais radioativos (NUCLEMON), desenvolvimento de sistema de separação isotópica (NUSTEP), enriquecimento de urânio (NUCLEI) e construções de centrais termonucleares (NUSCON) (CABRAL, 2011). Algumas dessas subsidiárias foram dissolvidas após anos de operação e outras foram incorporadas a novas empresas públicas que as sucederam. Apenas a NUCLEP – Nuclebrás Equipamentos Pesados S/A – permaneceu. Essa Empresa Estratégica de Defesa (EED) passou a contribuir, em meados da década de 1980, para a construção de cascos de submarinos. Foi criada, no entanto, para atender ao PNB, mantendo-se como única empresa qualificada na construção de equipamentos pesados para a área nuclear no Brasil (NUCLEP, 2022).

No ano de 1988, a NUCLEBRÁS passa a se denominar Indústrias Nucleares do Brasil – INB. O contrato com a Alemanha para transferência de conhecimento na área nuclear foi fundamental para o Brasil pois os EUA, responsáveis pela venda da usina de Angra 1, suspenderam, em 1974, a garantia de fornecimento de urânio enriquecido para o

Brasil, o que impôs sérios riscos à operação da usina, bem como a planos de expansão da geração term nuclear no Brasil com base nessa parceria (CABRAL, 2011). Nesse contexto, o acordo com a Alemanha capacitou a NUCLEBRÁS a fornecer o combustível para Angra 1, de tecnologia da americana Westinghouse; e para Angra 2, de tecnologia da alemã Siemens.

O acordo Brasil-Alemanha teria duração de quinze anos e, conforme observa Cabral (2011, p. 64), era a base para a autonomia nuclear brasileira almejada, que poderia romper o ciclo de dependência com os Estados Unidos com relação a tecnologia nuclear. Afetado por problemas financeiros vivenciados pelo Brasil na década de 1980, o acordo foi paralisado em 1983 (KURAMOTO e APPOLONI, 2002), tendo capacitado a indústria nacional em diferentes áreas da engenharia nuclear.

No que se refere ao enriquecimento de urânio, o acordo não foi efetivado com sucesso. A tecnologia oferecida pelos alemães para esse processo – “jet-nozzle” – era experimental e despertou a desconfiança de que não produziria resultados, como, de fato, veio a se confirmar (SILVA, 2014).

Durante a vigência do contrato entre Brasil e Alemanha, são conduzidas, pelas Forças Armadas, pesquisas para desenvolvimento de tecnologia nuclear no Brasil (KURAMOTO e APPOLONI, 2002). Em 1977, o então Tenente-Coronel José Alberto Albano de Amarante, Doutor em física, inicia pesquisas para desenvolvimento de um método para enriquecer urânio usando laser. Conforme relata o Almirante Othon Luiz Pinheiro da Silva,

[...] o comandante Amarante, da Força Aérea, havia convencido o general Geisel de que era necessário ter uma alternativa ao jet-nozzle. Foi tão convincente que conseguiu a permissão para começar um programa “paralelo” ao da Nuclebrás, única instituição que poderia trabalhar na área nuclear (SILVA, 2014, p. 158).

O PNM teve início em março de 1979 no contexto desse “programa paralelo”, quando o então Comandante Othon Luiz Pinheiro da Silva retorna de seu mestrado em engenharia nuclear, realizado no *Massachusetts Institute of Technology*, e se une ao grupo do Tenente-Coronel Amarante (SILVA, 2014). À época, a Aeronáutica mantinha um convênio com o IPEN para pesquisas na área nuclear, aproveitado pela MB. Convencido de que o enriquecimento por laser não traria resultados satisfatório, e já com a concepção das ultracentrífugas, o Comandante Othon se instala na área do IPEN, na USP, vindo a MB estabelecer um convênio direto com o IPEN (SILVA, 2014).

Em 1982, os primeiros resultados satisfatórios são obtidos com o uso de ultracentrífugas construídas totalmente no Brasil e, em 1987, o Presidente José Sarney divulga em rede nacional que cientistas brasileiros haviam obtido sucesso no processo de enriquecimento de urânio por ultracentrifugação, pondo fim ao “programa paralelo”, tornando públicas as conquistas que se seguiram no PNM (KURAMOTO e APPOLONI, 2022).

Desde sua concepção, o PNM apresenta dois objetivos bem definidos: o domínio do ciclo do combustível nuclear; e o projeto e a construção de um protótipo de reator nuclear a ser utilizado para a propulsão de submarinos (MB, 2022a). Tais objetivos são estratégicos para o Brasil, dado que a tecnologia nuclear é dominada por poucos países.

3.2 O Programa de Desenvolvimento de Submarinos – PROSUB

Em dezembro de 2008 foi assinado, entre o Brasil e a França, o contrato de parceria do PROSUB, cujos principais objetivos são a produção de quatro submarinos convencionais da Classe Riachuelo – de propulsão diesel-elétrica – e o projeto e a fabricação do primeiro submarino convencional brasileiro com propulsão nuclear (SN-BR), contemplando, ainda, a construção de um complexo com infraestrutura industrial e de apoio à operação dos submarinos, que engloba os estaleiros de construção e manutenção, a Base Naval e a Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM) no município de Itaguaí – RJ (MB, 2022c).

Ainda no escopo da citada parceria, foi estabelecido contrato de Transferência de Tecnologia (ToT) para a construção dos Submarinos Classe Riachuelo, do SN-BR e da infraestrutura industrial. Adicionalmente, no caso do SN-BR, o contrato inclui ToT para o seu projeto (MB, 2022d).

A UFEM e o Estaleiro de Construção estão em plena operação, tendo produzido as estruturas dos quatro submarinos convencionais da Classe Riachuelo. O primeiro deles, o S-40 Submarino Riachuelo, que dá nome à Classe, está em fase final de testes, com expectativa de ser incorporado ao serviço ativo no corrente ano.

Quanto ao SN-BR, o Projeto Preliminar foi concluído em 2017, estando em curso o projeto de detalhamento (FERREIRA, 2018), que possibilitará o início de sua construção.

De acordo com o contrato de ToT, há suporte por parte da França para todo o projeto do SN-BR, exceto para a parte nuclear. Note-se que o PROSUB é o Programa Estratégico brasileiro que dá sentido ao empreendimento iniciado no “programa paralelo”, visto que tanto o reator quanto o combustível nuclear são os produtos esperados do PNM. Conforme o Almirante Eduardo Bacellar Leal Ferreira, Comandante da Marinha nos anos de 2015 a 2019, o PROSUB e o PNM têm ligação estreita, visto que o SN-BR, principal objetivo do PROSUB, terá seu reator nuclear produzido no escopo do PNM, o que demonstra a necessidade de que esses programas caminhem em perfeita sintonia (FERREIRA, 2018).

3.3 Maturidade das etapas do ciclo

No Capítulo 2 foram comentadas as capacidades industriais da INB e da MB quanto ao ciclo do combustível nuclear. Observa-se que, apesar de possuir reservas de urânio que podem fazer do Brasil um exportador de combustível nuclear, existem lacunas a serem superadas para que se atinja a plena capacidade de processar todas as etapas do ciclo para as necessidades brasileiras e para eventual exportação.

Parte das instalações do CEA encontram-se em implantação, o que demanda, no presente, continuidade de investimentos de recursos financeiros e, em breve, aporte de recursos humanos para operação e manutenção das plantas industriais. É importante registrar que tais instalações foram projetadas para as necessidades da MB, podendo contribuir para outros projetos do PNB, mas com capacidade limitada para esse emprego.

As instalações da INB, por outro lado, são destinadas à produção de combustível nuclear para as usinas de Angra 1 e 2 e, futuramente, para Angra 3.

Nos próximos parágrafos, é apresentada uma avaliação quanto à maturidade da indústria brasileira para realizar as etapas do ciclo do combustível nuclear.

Mineração e beneficiamento

A INB é a empresa pública que realiza as etapas de mineração e beneficiamento do urânio no Brasil. Atualmente, apenas a mina de Caetité, na Bahia, está sendo explorada

para essa finalidade, com capacidade de produção anual de 400 ton. de urânio, podendo chegar a 800 ton. U/ano, considerando a possibilidade de mineração simultânea em outros pontos (INB, 2022e). Existem outras jazidas para mineração de urânio no Brasil, estando a principal delas localizada no município de Santa Quitéria, no Ceará. Essa jazida não está sendo explorada, mas estima-se uma produção de 2.300 ton. U/ano, quando em operação (INB, 2022e).

O processo de beneficiamento visa separar o urânio do minério. Para tal, a rocha é quebrada em pedaços pequenos e recebe uma solução ácida que promove a separação do U_3O_8 de outros materiais – processo de lixiviação, resultando no licor de urânio, que recebe tratamento químico para gerar o *Yellow Cake*, um concentrado de urânio que é o insumo para a etapa da conversão (INB, 2022d).

O Brasil, como já visto, possui reservas consideráveis de urânio (ver TAB. 1), podendo aumentar essas reservas, caso venham a ser descobertas novas jazidas. Tecnicamente, não há restrição quanto à capacidade de minerar e beneficiar esse recurso para atender as necessidades do País, podendo, potencialmente, explorar esse recurso para fins de exportação.

Conversão

A conversão do U_3O_8 em UF_6 é uma etapa tecnicamente dominada no Brasil. Conforme Durazzo [201-?], o IPEN realizou estudos que culminaram na criação do Projeto Conversão (PROCON), em 1980, tendo como uma de suas realizações a produção e a transferência para o PNM de 20 t de UF_6 . O PROCON foi encerrado em 1997 e a tecnologia de conversão foi transferida para a MB (DURAZZO, 201-?). Nesse período foi dado início ao projeto e à instalação, no CEA, de uma planta industrial para conversão de urânio, a Unidade Piloto de Produção de Hexafluoreto de Urânio (USEXA), em fase de implantação.²²

Atualmente, o Brasil não dispõe de instalação onde se possa realizar a etapa da conversão. Para o combustível das usinas termonucleares da CNAEA, o gás UF_6 é importado. A USEXA foi projetada para atender as necessidades da MB, mas, quando prontificada, poderá contribuir para reduzir a importação de UF_6 para as usinas de Angra. A prontificação

22 Conforme constatado em visita realizada ao CEA pela turma do C-PEM/2022, em 4 de maio de 2022.

da USEXA marcará um passo de grande importância para a indústria nacional, dado que a conversão é a única etapa do ciclo do combustível nuclear que não é realizada no Brasil.

Conforme divulgado em seu site na internet, a INB planeja implementar uma unidade de conversão na FCN, cujos estudos estão se iniciando (INB, 2022j). A tecnologia nacional desenvolvida pelo IPEN e transferida para a MB poderá contribuir para o planejamento da INB nesse sentido.

Enriquecimento

O enriquecimento de urânio pelo processo de ultracentrifugação está entre as grandes realizações tecnológicas brasileiras. Sendo a etapa de maior complexidade, os primeiros resultados foram alcançados em 1982 e, em 1988, foi inaugurado o LEI no CEA (KURAMOTO e APPOLONI, 2002). Desde então, máquinas de maior desempenho têm sido desenvolvidas, fruto das pesquisas conduzidas pela MB em parceria com o IPEN. O LEI não é propriamente uma instalação industrial capaz de processar grandes quantidades de UF₆. É, de fato, um laboratório para validação da tecnologia de enriquecimento isotópico.

Resultado de contrato entre a MB e a INB, uma série de cascatas de ultracentrífugas com capacidade industrial têm sido instaladas na FCN, em Resende-RJ, atendendo parcialmente a demanda de urânio enriquecido para as usinas term nucleares de Angra. A INB planeja dar continuidade à ampliação dessa capacidade, visando tornar o Brasil autossuficiente quanto ao enriquecimento de urânio para as CNAAs (INB, 2022k).

Verifica-se que o Brasil apresenta capacidade limitada para processar o enriquecimento de urânio para atender as necessidades internas do País, sendo dependente de importações de UF₆ enriquecido.

Reconversão e fabricação de pastilhas

A tecnologia de reconversão e fabricação de pastilhas cerâmicas de urânio enriquecido foi dominada pelo IPEN na década de 1960 (DURAZZO, [201-?]). A partir do convênio firmado em 1981, o IPEN e a MB passam a atuar de forma conjunta nos estudos de reconversão e produção de pastilhas. A partir de 1989, a MB instalada no CEA, com apoio

técnico do IPEN, o Laboratório de Materiais Nucleares (LABMAT) e em 1993 o IPEN encerra sua produção de pastilhas (DURAZZO, [201-?]).

O LABMAT realiza os processos de reconversão e fabricação de pastilhas cerâmicas de urânio a nível laboratorial. Por outro lado, a INB tem capacidade industrial para processar a reconversão e a fabricação de pastilhas de urânio enriquecido para atender as necessidades da CNAEA (INB, 2022I). Considerando que essa instalação é acionada nas ocasiões em que novos elementos combustíveis são fabricados para substituir os elementos das usinas term nucleares de Angra, existe um período em que essa parcela da FCN fica ociosa, podendo ser empregada para produzir pastilhas para outros clientes.

Percebe-se que não há limitação técnica ou industrial por parte do Brasil no que se refere às etapas de reconversão de urânio enriquecido e fabricação de pastilhas.

Fabricação de elementos combustíveis

A FCN apresenta entre suas instalações a unidade de fabricação de elementos combustíveis, que atende as usinas de Angra 1 e Angra 2 e, futuramente, Angra 3 (INB, 2022I).

A MB desenvolve sua unidade de fabricação de elementos combustíveis, não estando pronta para realizar essa atividade.²³

De modo semelhante às etapas de reconversão e fabricação de pastilhas, a FCN tem capacidade técnica e industrial para atender outros clientes, podendo ser uma alternativa para a MB.

Do exposto, verifica-se que a capacidade brasileira relativa às etapas do ciclo do combustível nuclear está dominada tecnologicamente. O QUADRO 5 apresenta um resumo da maturidade industrial brasileira para as etapas anteriormente comentadas.

23 Conforme constatado em visita realizada ao CEA pela turma do C-PEM/2022, em 4 de maio de 2022.

QUADRO 5
Maturidade das etapas do ciclo do combustível nuclear no Brasil

ETAPA	MATURIDADE	OBS.
Mineração & Beneficiamento	Capacidade nacional plenamente desenvolvida e em operação	xxx
Conversão	Aguarda prontificação da USEXA, no CEA; atualmente, esse serviço é realizado no exterior quando demandado pela INB	A INB planeja implantar uma unidade de conversão de urânio na FCN, em Resende.
Enriquecimento	Tecnologia nacional consagrada de ultracentrifugação. A MB possui capacidade limitada para enriquecimento; a INB processa parcialmente as necessidades da CNAAA, implicando dependência externa parcial	A INB está ampliando sua capacidade de enriquecimento, instalando sistemas desenvolvidos pela MB.
Reconversão e fabricação de pastilhas	A MB possui capacidade laboratorial, tendo recebido a tecnologia desenvolvida pelo IPEN; a INB possui capacidade industrial plena	xxx
Fabricação de elementos combustíveis	A unidade de fabricação de elementos combustíveis da MB está sendo implementada e a INB apresenta capacidade industrial plena	xxx

Fonte: o autor.

3.4 Autonomia brasileira na obtenção de combustível nuclear

De acordo com os parágrafos precedentes, deduz-se que o Brasil tem as condições para alcançar independência em matéria de obtenção de combustível nuclear. A capacidade produtiva, com base nas unidades atualmente construídas e em construção, deve ser avaliada, visto que as instalações a cargo da MB estão dimensionadas, a princípio, para atender aos programas estratégicos da Força.

Visando, num primeiro passo, obter material para consumo interno a partir da indústria nacional, verifica-se que o Brasil tem potencial para se tornar um exportador de combustível nuclear, seja na forma de UF6 natural ou enriquecido, ou mesmo na forma de pastilhas de urânio ou elementos combustíveis prontos.

Considerando as reservas de urânio e as capacidades tecnológica e industrial brasileira, Heider (2008, p. 81-82) vislumbra três cenários para o papel do Brasil com relação à indústria do combustível nuclear.

Num primeiro cenário, mantidas as limitações atuais, o Brasil apresenta dependência internacional para as etapas de conversão (dependência total) e enriquecimento (dependência parcial).

Num segundo cenário, empreendidos esforços para a conclusão da USEXA e para a ampliação do número de cascatas de enriquecimento de urânio na INB, o Brasil passa a ser autossuficiente quanto à obtenção de combustível nuclear para consumo interno, atendendo as necessidades da MB e das usinas term nucleares existentes.

Finalmente, no melhor dos cenários, processados os incrementos comentados no cenário acima, e aperfeiçoada a legislação que trata de materiais nucleares no Brasil, de forma a promover a participação de atores não estatais²⁴, o Brasil alcançaria não apenas independência em matéria de combustível nuclear, mas poderia se tornar um exportador desse produto que, a nível mundial, apresenta tendência de aumento de demanda.

Essa análise de possibilidades indica que, dependendo das capacidades futuras pretendidas, políticas específicas devem ser adotadas para aproveitar o potencial brasileiro quanto aos recursos naturais que possui e à tecnologia nuclear desenvolvida.

Com base no QUADRO 5, a FIG. 6 apresenta o nível de independência brasileira em relação à obtenção de combustível nuclear.

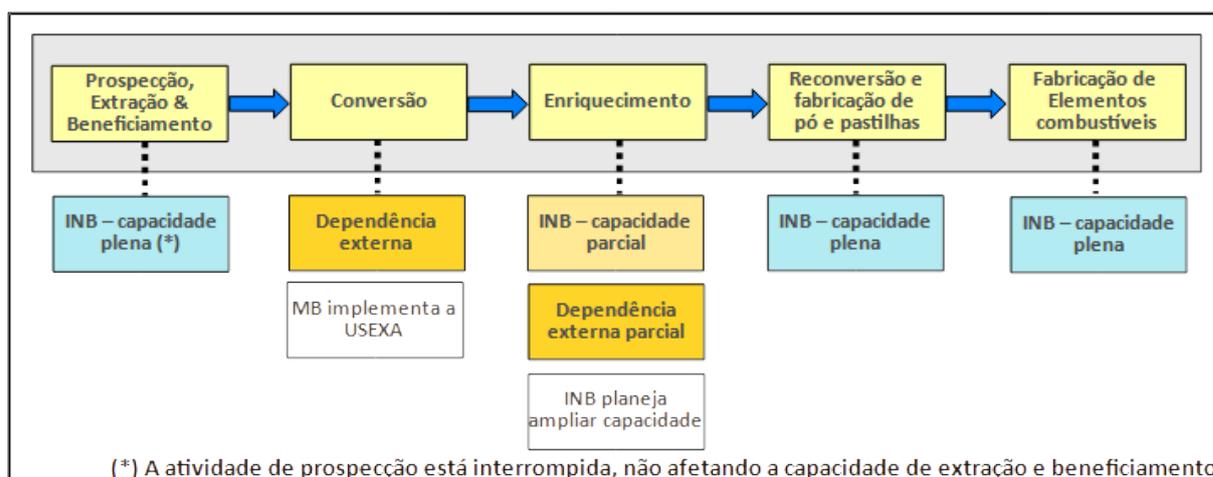


FIGURA 6 – Maturidade das etapas do ciclo do combustível nuclear no Brasil.

Fonte: o autor.

24 Conforme registra a Constituição Federal em seu Art. 177, “Constituem monopólio da União: [...] a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados, com exceção dos radioisótopos cuja produção, comercialização e utilização poderão ser autorizadas sob regime de permissão [...]” (BRASIL, 1988a).

No presente capítulo, foram apresentados aspectos relativos à indústria nuclear brasileira. Um breve histórico do PNB e do PNM foi apresentado, indicando a importância desses Programas para o fomento às pesquisas, formação de pessoal e desenvolvimento de tecnologia nacional. O PROSUB, também apresentado de forma breve, representa o atingimento da estratégia de defesa pensada para o Brasil na segunda metade do Séc. XX, visando à obtenção do primeiro submarino convencional brasileiro de propulsão nuclear, o SN-BR. Os objetivos do PNM vão ao encontro dessa estratégia. As participações do IPEN e da INB foram ressaltadas. A contribuição da MB foi – e continua sendo – fundamental para essa área da tecnologia, desenvolvendo, industrializando e instalando sistemas de enriquecimento com base no processo de ultracentrifugação, desenvolvido em parceria com o IPEN. As etapas do ciclo do combustível nuclear apresentam diferentes níveis de maturidade no Brasil. Enquanto que a maioria dessas etapas está plenamente desenvolvida e implementada no País, o processo de conversão não está estabelecido a nível industrial e o enriquecimento de urânio é realizado de forma parcial, implicando dependência externa para esses dois processos para atender às demandas internas por combustível nuclear. Diferentes cenários podem ser idealizados para guiar as políticas para o setor nuclear, podendo ser mantida a dependência atual ou buscada a autossuficiência em matéria de combustível nuclear, vindo a ser o Brasil, no melhor dos cenários, um exportador desse produto.

No capítulo seguinte são apresentados aspectos legais que condicionam o desenvolvimento nuclear brasileiro, sendo realizada uma avaliação da efetividade da Política Nuclear Brasileira.

4 DOCUMENTOS QUE CONDICIONAM O DESENVOLVIMENTO NUCLEAR NO BRASIL

No capítulo precedente foi apresentado um breve histórico do PNB e do PNM, descrevendo, ainda, os objetivos indissociáveis que unem esses programas estratégicos da MB. No presente capítulo será comentada a legislação relativa à atividade nuclear no Brasil. Como introdução para o tema, discorre-se sobre a intenção norte-americana de estabelecer, no cenário de pós-Guerra (1946), um controle internacional sobre o minério nuclear, incluindo aspectos das primeiras exportações brasileiras nesse contexto. Em seguida, o estabelecimento do regime de salvaguardas internacionais de materiais nucleares é examinado, bem como a entrada do Brasil nesse regime. Por fim, serão apreciados os documentos que condicionam a atividade nuclear no País, avaliando brevemente a efetividade da política brasileira estabelecida para esse fim.

4.1 O Plano Baruch e as Compensações Específicas

Desde a descoberta do processo de fissão e de outros fenômenos associados aos materiais radioativos, os minerais nucleares passaram a receber tratamento especial por parte dos países. Após o fim da Segunda Grande Guerra (1945), os EUA perceberam a vantagem relativa que o futuro reservava para as nações que pudessem explorar jazidas de urânio e de tório, empreendendo uma tentativa de monopolizar esses materiais, onde quer que se encontrassem (SANTOS, 2007).

Apresentando reservas significativas de muitos minerais, os EUA não possuem, no entanto, quantidades significativas de urânio, respondendo por menos de 0,8% das reservas mundial, conforme dados da WNA apresentados na TAB. 1.

Em junho de 1946, sendo o único país a dominar a tecnologia de armamento nuclear, os EUA propõem, na Assembleia Geral da ONU, um plano para o gerenciamento internacional dos materiais nucleares (SANTOS, 2007).

Apresentado por Bernard Baruch, representante americano na Assembleia, o Plano Baruch propunha a criação de uma Autoridade Internacional de Desenvolvimento Atômico, que teria controle sobre todos os materiais nucleares, incluindo as jazidas de material nuclear, as usinas de beneficiamento, os equipamentos de enriquecimento de urânio e os reatores (SANTOS, 2007, p. 17).

Conforme proposto, todos os países deveriam renunciar à posse de todos os materiais de interesse nuclear e se submeterem a um regime de inspeções internacionais abrangentes, visando garantir o cumprimento do acordo; em troca, após a efetivação das medidas propostas, os EUA destruiriam seu arsenal nuclear (SANTOS, 2007). Conforme observa Vieira de Jesus (2011, p. 834), o Plano Baruch, sob o rótulo de preocupação com a segurança mundial, representava, na verdade, a preocupação norte-americana com sua própria segurança.

A União Soviética, que à época desenvolvia sua tecnologia nuclear, não aceitou os termos do acordo, que representava sérias limitações à soberania da Rússia e dos países do bloco soviético. Após meses de negociação infrutífera, a tentativa americana fracassou e, em 1947, a União Soviética rejeita formalmente o plano Baruch (SANTOS, 2007), cessando temporariamente as discussões sobre um possível acordo para que os países renunciassem ao direito de desenvolver armas nucleares.

O Brasil, por outros motivos, rejeitou o Plano Baruch. A preocupação brasileira, protagonizada pelo Almirante Álvaro Alberto, era que o Brasil se tornasse um fornecedor de materiais nucleares sem receber o apoio necessário para o desenvolvimento de tecnologia própria, se mantendo numa posição de dependência tecnológica em relação aos EUA. Foi ele quem idealizou o Princípio das Compensações Específicas, pelo qual o fornecimento de material nuclear para nações desenvolvidas deveria ser feito não com pagamento em dinheiro, mas pela transferência de tecnologia que permitisse o desenvolvimento nacional na área nuclear (SANTOS, 2007).

A atuação do Almirante Álvaro Alberto foi importante para que a Lei N^o 1.310 fosse sancionada em 15 de janeiro de 1951, criando o CNPq e estabelecendo, conforme seus Art. 4^o e 5^o, o monopólio estatal sobre materiais nucleares e sobre “todas as atividades referentes ao aproveitamento da energia atômica, sem prejuízo da liberdade de pesquisas

científica e tecnológica” (BRASIL, 1951). Entretanto, conforme registram Kuramoto e Appoloni (2002, p. 380), a intenção do Almirante Álvaro Alberto “não trouxe resultados devido a um conflito entre os grupos pró-americanos e os nacionalistas, do qual fazia parte o almirante [Álvaro Alberto]”. Nesse contexto, a despeito da vigência da citada Lei, o Brasil veio a firmar acordos de exportação de material nuclear para os EUA, sem estabelecer as esperadas Compensações Específicas.²⁵ Como resultado dessa percepção de cooperação de mão única em favor dos EUA, o Brasil passou a buscar outros parceiros internacionais, vindo a firmar acordos com a França e com a Alemanha recebendo, em alguma medida, transferência de tecnologia (SANTOS, 2007).

Esses anos iniciais do desenvolvimento nuclear brasileiro, conquanto não tenha permitido um desenvolvimento nacional rápido, dada a dependência brasileira relativa ao tema, impulsionou diferentes pesquisas na busca de tecnologia própria na área nuclear.

4.2 O regime de salvaguardas internacionais dos materiais nucleares

A utilização da energia da fissão nuclear foi primeiramente demonstrada numa aplicação militar, encerrando a Segunda Grande Guerra (1945). Após esse evento, as atenções dos pesquisadores se voltaram às aplicações civis da energia e da radiação nuclear. Não obstante esse direcionamento científico, diferentes países investiram em pesquisas para a fabricação de armamento nuclear.

O Plano Baruch, conforme visto na seção anterior, representou uma tentativa de banir qualquer intenção nesse sentido, mas foi rejeitado por diferentes motivos. Alguns países, à época em que o Plano foi proposto, já haviam iniciado pesquisas para desenvolver armamento nuclear e outros, a exemplo do Brasil, não aceitaram submeter suas reservas de urânio a controle de um organismo internacional, conforme propunha o Plano (SANTOS, 2007).

As grandes potências econômicas e militares perceberam o desequilíbrio provocado pela realização estadunidense, e investiram no desenvolvimento de artefatos

²⁵ O primeiro acordo comercial de fornecimento de material nuclear para os Estados Unidos foi assinado em 1945; seguiram-se os acordos de 1952, envolvendo o fornecimento de terras raras; e 1954, com a troca de minério de tório brasileiro por trigo americano (VIEIRA DE JESUS, 2011, p. 834, 838 e 839).

nucleares. Até meados da década de 1960, cinco países haviam desenvolvido e testado armamentos nucleares: EUA, em 1945; Rússia, em 1949; Reino Unido, em 1952, França, em 1960; e China, em 1964 (KRISTENSEN, H. M. e KORDA, M., 2022).

A produção progressiva de armas nucleares levou as duas maiores potências militares da época, EUA e Rússia, a elevarem seus arsenais a níveis que se alinharam à doutrina da Capacidade de Destruição Assegurada (GRIER, 2001). Segundo essa doutrina, idealizada em 1962 por Robert McNamara, então Secretário de Defesa dos EUA, a supremacia militar de um país estaria relacionada à sua capacidade de provocar uma destruição completa do oponente que realizasse a primeira ofensiva nuclear em um conflito – *the first strike* (GRIER, 2001).

Donald Brennan criticou intensamente essa política, alertando para o fato de que o lado oponente, a União Soviética, se preparava na mesma medida, e um conflito envolvendo ataques nucleares massivos de ambos os lados resultaria na destruição das duas nações. Brennan cunhou o termo Destruição Mútua Assegurada (*Mutual Assured Destruction – MAD*), defendendo que a sigla em inglês refletia a “loucura” da doutrina McNamara (GRIER, 2001).

O entendimento da MAD pelas nações pode ter contribuído para que os arsenais nucleares, apesar de crescentes, se mantivessem apenas como instrumentos de dissuasão, o que, de fato, ocorre até os dias de hoje. Desde então, uma iniciativa do tipo *first strike* é impensável por qualquer potência global.

Esse aparente equilíbrio de forças, no entanto, nunca significou que a produção de armas nucleares por novos atores fosse tolerável. Estimou-se que, se não houvesse mecanismos internacionais para impedir o desenvolvimento dessas armas, entre 30 e 35 países poderiam desenvolver armas nucleares até o final do Séc. XX (WNA, 2021b).

O principal e mais efetivo instrumento no sentido de cessar o desenvolvimento nuclear para fins bélicos foi o TNP. Contando atualmente com 190 signatários, cabe à IAEA a verificação do cumprimento do TNP, efetivando o regime de salvaguardas internacionais de materiais nucleares.

Referente aos controles, inspeções e deveres, o TNP apresenta aplicação assimétrica entre os signatários, divididos em Estados nuclearmente armados e Estados não-

nuclearmente armados. No primeiro grupo figuram as cinco nações que desenvolveram e detonaram artefatos nucleares até 1967. Para tais países, não se aplicam os controles e inspeções que afetam os demais signatários e o desenvolvimento de armamento nuclear pode prosseguir nesses países sem controle.

O texto introdutório do TNP registra que as Partes do Tratado declaram

[...] their intention to achieve at the earliest possible date the cessation of the nuclear arms race and to undertake effective measures in the direction of nuclear disarmament²⁶ (IAEA, 1970, p.1).

Identificam-se duas partes nessa declaração. Primeiramente, é mencionada a intenção de cessar, o mais rapidamente possível, a corrida armamentista nuclear. A segunda parte registra que serão empreendidos esforços no sentido de que os países detentores de artefatos nucleares se desarmem.

Pode-se verificar que a primeira parte teve o alcance almejado. Apenas quatro países, não signatários do TNP, desenvolveram e testaram armamento nuclear desde então: Índia, em 1974; Paquistão, em 1998; Israel, em data desconhecida; e Coreia do Norte, em 2006 (KRISTENSEN, H. M. e KORDA, M., 2022). Esta última era signatária do Tratado, mas saiu do acordo para prosseguir com seu projeto de desenvolvimento nuclear para fins bélicos.

A segunda parte do texto citado, no entanto, não foi efetivada. Os Estados nuclearmente armados não dão mostras de “empreender medidas eficazes no sentido do desarmamento nuclear”. Segundo relatório da *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI), de janeiro de 2022, o inventário de ogivas nucleares soma 12.705 unidades, estando 5.977 ogivas (47%) em poder da Rússia e 5.428 ogivas (43%) em poder dos EUA, que se destacam pelo relativo poderio nuclear. As ogivas restantes estão em posse de: China (350), França (290), Reino Unido (225), Paquistão (165), Índia (160), Israel (90) e Coreia do Norte (20) (KRISTENSEN, H. M. e KORDA, M., 2022). De acordo com esse mesmo relatório, EUA, Reino Unido, China e Índia dão mostras de que planejam aumentar seus arsenais nucleares.

26 “[...] sua intenção de obter, o mais rapidamente possível, a cessação da corrida armamentista nuclear e empreender medidas eficazes no sentido do desarmamento nuclear.” (Tradução nossa).

O caminho para a adesão do Brasil ao TNP se iniciou com a criação da Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC), em 1991. Nesse mesmo ano foi assinado o Acordo Quadripartite, entre a Brasil, Argentina, ABACC e IAEA, que significou, na prática, a entrada dos programas nucleares brasileiro e argentino no regime de salvaguardas internacionais (ANDRADE, CARPES e LEITE, 2017).

É interessante registrar que, tendo em mente o desenvolvimento do PNM, o Brasil incluiu, como parte do Acordo Quadripartite o tópico “Procedimentos Especiais – ARTIGO 13”, com o seguinte texto:

Se um Estado-Parte decidir exercer sua faculdade de usar material nuclear que deva ser salvaguardado em virtude deste Acordo para propulsão nuclear ou operação de qualquer veículo, inclusive submarinos e protótipos, ou para qualquer outra atividade nuclear não-proscrita conforme acordado entre o Estado-Parte e a Agência, serão aplicados os seguintes procedimentos [...] (ABACC, 1991, p. 6).

A adesão formal do Brasil ao TNP se deu em 1998, pelo Decreto N° 2.864, de 07 de dezembro de 1998, e não implicou exigências maiores que aquelas já assumidas no Acordo Quadripartite.

Ao aderir ao TNP o Brasil renuncia à possibilidade de se nuclearizar, firmando uma posição clara quanto às suas intenções nessa área, com implicações de grande relevância para o PNM. A existência temporária de um “programa paralelo” (1977 – 1987) e sendo o PNM um programa de desenvolvimento nuclear conduzido por uma Força Armada, são aspectos que poderiam suscitar desconfiança da comunidade internacional.

Desde o Acordo Quadripartite, e mais formalmente após se tornar signatário do TNP, o Brasil está sujeito ao regime de salvaguardas internacionais, sendo submetido a inspeções regulares. A IAEA, representada por seus inspetores, testemunha que o Brasil desenvolve tecnologia nuclear para aplicações pacíficas, produzindo e aplicando material nuclear conforme condições e limites assumidos internacionalmente.

Conforme Guimarães (2014), tais inspeções podem ser:

- a) inspeções *ad hoc* – relacionadas a verificação de relatórios de declarações iniciais, alterações eventuais e transferências de materiais;

- b) inspeções de rotina – são as mais usuais; seguem um cronograma previamente estabelecido e são direcionados às instalações que contenham material nuclear;
- c) inspeções especiais – são realizadas em ocasiões especiais previstas no acordo de salvaguardas ou quando a IAEA julgar necessário para cumprimento de sua missão; e
- d) visitas de salvaguardas – realizadas para verificar as condições das instalações que contenham material nuclear, podem ocorrer desde sua construção, com o objetivo de constatar que o projeto impede desvios de materiais nucleares.

De acordo com Art. 3º do Tratado, o TNP tem o propósito exclusivo de verificar o cumprimento das obrigações assumidas pelas Partes com o objetivo de impedir o desvio de energia nuclear para fins bélicos (IAEA, 1970, p. 2).

É importante pontuar que o TNP não impede o desenvolvimento de tecnologia. Muito embora haja pouca cooperação internacional na área, o TNP traz, em seu Art. 3º, inciso 3, que o Tratado deve ser implementado de uma maneira tal que não dificulte o desenvolvimento econômico e tecnológico dos Estados-membros quanto ao uso pacífico da energia nuclear. A própria introdução do TNP registra que as Partes têm legitimidade de procurar, individualmente ou em cooperação internacional, o desenvolvimento de aplicações da energia nuclear para fins pacíficos e, conforme o Art. 4º, nada no Tratado deve ser interpretado no sentido de afetar o direito inalienável dos Estados-membros de realizar pesquisas, desenvolver tecnologia e utilizar a energia nuclear para propósitos pacíficos (IAEA, 1970, p. 3).

4.3 Atividades nucleares no Brasil – Documentos condicionantes

Atualmente, no que diz respeito a documentos condicionantes norteadores de políticas na área nuclear, tem-se, de um lado, a relativa rigidez imposta pela CF, que estabelece monopólio estatal para as atividades que envolvam materiais radioativos; e, de outro lado, documentos que estimulam o desenvolvimento da atividade nuclear brasileira de

forma mais efetiva, alinhados ao aproveitamento dos recursos minerais brasileiros e à tecnologia nacional desenvolvida.

A Lei Nº 1.310, de 15 de janeiro de 1951, representa um marco para o tratamento dado aos minerais nucleares brasileiros. Essa Lei criou o CNPq, idealizado pelo Almirante Álvaro Alberto, que foi o seu primeiro Presidente. De acordo com o seu Art. 1º, o CNPq foi criado com a “finalidade de promover e estimular o desenvolvimento da investigação científica e tecnológica em qualquer domínio do conhecimento” (BRASIL, 1950), incluindo o auxílio à formação e aperfeiçoamento de pessoal e cooperação com institutos de pesquisa. A matéria principal da Lei de criação do CNPq, no entanto, é o aproveitamento da energia atômica. Entre as partes dedicadas à questão nuclear, destacam-se:

- a) O Conselho incentivará a pesquisa e a prospecção das reservas de materiais apropriados ao aproveitamento da energia atômica (Art. 3º, § 3º);
- b) Serão considerados materiais apropriados ao aproveitamento da energia atômica os minérios de urânio, tório, cádmio, lítio, berílio como boro e os produtos resultantes de seu tratamento (Art. 3º, § 4º);
- c) É proibida a exportação, por qualquer forma, de urânio e tório e seus compostos e minérios, salvo de governo para governo, ouvidos os órgãos competentes (Art. 4º);
- d) Ficarão sob controle do Estado, por intermédio do CNPq ou, quando necessário, do Estado-Maior das Forças Armadas, ou de outro órgão que for designado pelo Presidente da República, todas as atividades referentes ao aproveitamento da energia atômica, sem prejuízo da liberdade de pesquisa científica e tecnológica (Art. 5º); e
- e) O Poder Executivo adotará as providências que julgar necessárias para promover e estimular a instalação no país das indústrias destinadas ao tratamento dos minérios referidos no § 4º do art. 3º e, em particular, à produção de urânio e tório e seus compostos, bem como de quaisquer materiais apropriadas ao aproveitamento da energia atômica (Art. 5º, § 3º).

Relativo aos minérios brasileiros e suas jazidas, houve uma evolução do tratamento dado pelas diferentes versões da CF brasileira.

A CF promulgada em 1891 foi a primeira constituição republicana e assegurava a inviolabilidade da propriedade, registrando que as minas pertenciam aos proprietários do solo e que as minas e jazidas minerais necessárias à segurança e à defesa nacionais não poderiam ser transferidas a estrangeiros (BRASIL, 1891).

A CF promulgada em 1934 apresenta uma preocupação maior com os recursos minerais brasileiros, fazendo separação entre a propriedade e as riquezas do subsolo. Registra ainda que o aproveitamento industrial das minas e das jazidas minerais, ainda que de propriedade privada, depende de autorização federal. É importante registrar que o texto constitucional traz que haverá a nacionalização progressiva das minas, jazidas minerais julgadas básicas ou essenciais à defesa econômica ou militar do Brasil (BRASIL, 1934).

A CF outorgada em 1937 e a CF promulgada em 1946, no que se refere a minas, e jazidas minerais, mantêm o texto da CF de 1934, conforme registram seus Art. 143 e 144 (BRASIL, 1937) e Art. 152 e 153 (BRASIL, 1946), respectivamente.

A CF outorgada em 1967 traz uma novidade quanto à proteção dos recursos brasileiros, dado que, mantidas as determinações das versões anteriores no se refere a minas e jazidas de minério, registra que a pesquisa e a lavra de petróleo em território nacional constituem monopólio da União (BRASIL, 1967).

A CF promulgada em 1988 é o primeiro texto constitucional que menciona diretamente materiais e atividades nucleares (BRASIL, 1988a). Os principais artigos de interesse para este trabalho são:

Art. 20, IX – os recursos minerais, inclusive os do subsolo, são bens da União;

Art.21, XXIII, a – compete à União explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, tendo como princípio que toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional;

Art. 22, XXVI – compete à União legislar sobre atividades nucleares de qualquer natureza; e

Art. 177, V – a produção, a comercialização e a utilização dos radioisótopos poderão ser autorizadas sob regime de permissão.

O Art. 177, na verdade, incorpora ao texto constitucional parte da Lei Nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, que dispõe sobre a política nacional de energia nuclear (BRASIL, 1962).

Analisando os trechos constitucionais selecionados²⁷, percebe-se uma preocupação gradual referente aos recursos minerais brasileiros.

Primeiramente, os proprietários da terra eram os donos das minas e jazidas encontradas em suas propriedades, havendo apenas o impedimento quanto à transferência para estrangeiros (CF de 1891).

Num segundo momento, os recursos minerais passam a ser propriedade distinta da terra onde se localizam, e seu aproveitamento, ainda que em propriedade privada, passa a depender de autorização federal (CF de 1934). Adicionalmente, o texto constitucional de 1934 apresenta uma preocupação quanto a nacionalizar, gradualmente, as minas e jazidas minerais que sejam essenciais à defesa econômica ou militar do País.

A próxima proteção dos recursos minerais brasileiros ocorre no texto constitucional de 1967, que passa a considerar monopólio estatal a pesquisa e a lavra de petróleo. Tal ordenamento durou até o ano de 1995 quando, por força da Emenda Constitucional (EC) Nº 9, de 09 de novembro de 1995 (BRASIL, 1995a), o monopólio estatal foi quebrado, passando o § 1º do Art. 177 a dispor que “A União poderá contratar com empresas estatais ou privadas a realização das atividades previstas nos incisos I a IV deste artigo, observadas as condições estabelecidas em lei”. As atividades dos incisos I a IV referem-se a pesquisa, lavra, refino, importação, exportação e transporte de gás natural e petróleo e seus derivados.

27 Para os interesses deste trabalho, foram analisados os textos das CF brasileiras desde 1891, não sendo analisadas outras Leis, Decretos ou outros atos normativos, exceto os atos normativos diretamente citados.

Esse aperfeiçoamento do texto constitucional abriu caminho para a iniciativa privada no setor de petróleo e gás natural no Brasil. Dois anos depois, pela Lei Nº 9.478, de 06 de agosto de 1997 (BRASIL, 1997), o governo federal emite a política energética nacional e institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Esse é um bom exemplo de quebra de monopólio estatal que, com as devidas proteções (criação da ANP) aperfeiçoou as atividades do setor de óleo e gás no Brasil.

Outro exemplo interessante é a quebra do monopólio estatal sobre as telecomunicações, que era parte do texto constitucional original da CF de 1988 e anteriores. A EC Nº 8, de 15 de agosto de 1995 abriu espaço para a entrada do setor privado (MOURA, 2014, p. 19).

Referente a materiais e atividades nucleares, o monopólio passa a ser considerado no texto constitucional de 1988, que incorporou aspectos da Lei 1.310, de 15 de janeiro de 1951; e da Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962. O Art. 5 da CF de 1988 materializa esse monopólio ao determinar que todas as atividades relacionadas à energia nuclear, sem prejuízo da liberdade de pesquisa científica e tecnológica, passam para o controle do Estado.

A exemplo do papel exercido pela Petrobrás relativo ao monopólio do petróleo, a União atribui à INB as atividades do ciclo do combustível nuclear (INB, 2022a). Deve-se considerar que a Petrobrás, à época do monopólio, contava com um orçamento que lhe permitia executar investimentos constantes em pesquisa e desenvolvimento, não ocorrendo o mesmo com a INB, que depende de repasse de recursos federais.²⁸ Mesmo considerando a relativa condição orçamentária favorável da Petrobrás, foi efetivada a quebra do monopólio na área do petróleo brasileiro.

O monopólio estatal sobre minérios e atividades nucleares foi necessário no contexto de proteção dos recursos naturais brasileiros e deve ser repensado. Nesse mesmo sentido, o Plano Nacional de Energia, PNE 2050, considera, entre os desafios principais para a expansão da geração nuclear no País, que se deve promover adequações legais e regulatórias, defendendo a flexibilização do monopólio da União e a definição de modelos de Parceria Público-Privada visando tornar os empreendimentos nucleares atrativos (BRASIL,

28 A INB indica que as restrições orçamentárias têm sido o principal entrave à ampliação da capacidade de enriquecimento de urânio no Brasil (INB, 2022f).

2020, p. 131). Ainda nesse sentido, Andrade *et al.*, ao comparar os resultados obtidos pelos programas nucleares do Brasil e da Índia, conclui que

haveria a necessidade de rever a legislação brasileira de modo que parcerias público-privadas na área nuclear de extração de urânio fossem possíveis, barateando o custo da exploração desse minério, e que a gestão das term nucleares também pudesse contar com tais parcerias (ANDRADE, CARPES e LEITE, 2017, p. 648).

Tem-se que não apenas as atividades de extração de urânio e gestão de usinas term nucleares deveriam ser objeto de flexibilização do monopólio estatal. De fato, todas as atividades relativas ao ciclo do combustível nuclear poderiam se beneficiar de uma maior abertura para a iniciativa privada, cuja regulamentação deverá levar em consideração (1) o valor estratégico dessas atividades; (2) a proteção que o Estado deve dar aos recursos minerais nucleares e ao conhecimento desenvolvido; e (3) a observação dos procedimentos de contabilidade e controle impostos pelos tratados internacionais dos quais o Brasil é parte.

É importante registrar uma pequena evolução nesse setor, promovida pela EC Nº 49, de 12 de fevereiro de 2006, que passou a autorizar a iniciativa privada a executar, sob regime de permissão, atividades de comercialização e a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos médicos, agrícolas e industriais; e produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida igual ou inferior a duas horas; conforme as novas redações dadas aos Art. 21 e Art. 177 da CF. Tratou-se de um ajuste com potencial de trazer benefícios para a sociedade pela maior oferta de radiofármacos.

Outros documentos mencionam a atividade nuclear no Brasil. O Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN) é, conforme apresentação contante da primeira edição, um “documento esclarecedor sobre as atividades de defesa do Brasil” (MB, 2012). A versão atual foi apresentada ao Congresso Nacional em 22 de julho de 2020 e registra que uma das mais importantes atribuições do Estado é prover a segurança para que a sociedade se desenvolva e alcance seus objetivos, livre de agressão externa, pressões políticas e imposições econômicas indesejáveis (MD, 2020a).

O LBDN discorre sobre diferentes assuntos relacionados à defesa do Brasil, incluindo o ambiente estratégico brasileiro; regimes, tratados e acordos internacionais ligados à defesa; os Objetivos Nacionais de Defesa; a organização do Ministério da Defesa

(MD); a missão e a organização da MB, do Exército Brasileiro (EB) e da Força Aérea Brasileira (FAB); e o alcance social de projetos desenvolvidos no âmbito do MD. O documento discorre sobre os três setores estratégicos de defesa, que são: o setor nuclear, sob responsabilidade da MB; o setor cibernético, a cargo do EB; e o setor espacial, a cargo da FAB.

O LBDN, em seu capítulo introdutório, ressalta que o Brasil aderiu a diferentes instrumentos internacionais que visam à redução e à eliminação de armamentos de diversos tipos. Na área nuclear, lembra que o País é signatário do TNP ressaltando, no entanto, que esse tratado apresenta uma assimetria significativa entre os Estados nuclearmente armados e os não nuclearmente armados, e esse fato “continua a ser fator crucial nas relações internacionais, com implicações diretas para a defesa e a segurança internacional” (MD, 2020a). Evidencia que o Brasil, por força do texto constitucional, veda a utilização da energia nuclear para fins não pacíficos, aplicando um arranjo exemplar em termos de salvaguardas internacionais, sendo submetido a inspeções por parte da ABACC e da IAEA.

O Objetivo Nacional de Defesa 3 estabelece que o Brasil buscará autonomia tecnológica e produtiva na área de defesa. Nesse sentido, o LBDN lembra que o Brasil domina a tecnologia nuclear, com conhecimento sobre todo o ciclo do combustível, possuindo jazidas de urânio em quantidade considerável. O principal objetivo, continua o documento, é promover a consolidação e a autonomia tecnológica da indústria nuclear no Brasil, que é voltada, exclusivamente, para aplicações pacíficas. Ao comentar o PNM, enfatiza que apenas a propulsão do SN-BR será nuclear²⁹, o que é permitido pelo acordo mantido junto à IAEA.

A PND “é o documento condicionante de mais alto nível para o planejamento de ações destinadas à defesa do País” (MD, 2020b). Sua primeira versão data de 1996, quando se denominava Política de Defesa Nacional. Foi atualizada em 2005 e 2012, quando passou a se denominar Política Nacional de Defesa. A versão atual foi encaminhada ao Congresso Nacional em 07 jul. 2020 (MD, 2020b).

29 No projeto do SN-BR, o reator nuclear é empregado para produzir eletricidade que, por sua vez, alimenta o motor elétrico da propulsão. Nesse arranjo, o reator nuclear do SN-BR equipara-se a uma central termonuclear de dimensões reduzidas. Submarinos nuclearmente armados, por outro lado, além de possuírem a propulsão fornecida por um reator nuclear, transportam mísseis equipados com ogivas nucleares.

Ao tratar do ambiente nacional, a PND registra que é vital que o País, entre outras iniciativas, diversifique sua matriz energética e adquira autonomia tecnológica para aproveitar plenamente o potencial nuclear que possui. Como parte da política internacional, a PND defende que o Brasil deve apoiar as iniciativas que busquem eliminar os arsenais nucleares. Ao comentar sobre a necessidade de reduzir a defasagem tecnológica das Forças Armadas, essa Política realça que o orçamento da Defesa deve estimular programas que fortaleçam a BID.

A END, por sua vez, representa “o vínculo entre o posicionamento do País nas questões de Defesa e as ações necessárias para efetivamente dotar o Estado da capacidade para atender seus interesses” (MD, 2020b, p. 31), norteando as ações da sociedade com vistas à defesa da pátria. Referente à questão nuclear, reforça o apoio às iniciativas para eliminações dos arsenais nucleares, defendendo o desenvolvimento e o uso da tecnologia nuclear para fins pacíficos.

A END cita os três setores estratégicos para a defesa nacional, trazendo, de forma mais enfática, que o setor nuclear deve buscar

- a) aprimorar o desenvolvimento da tecnologia nuclear para fins pacíficos;
- b) concluir, no que diz respeito ao programa do submarino convencional de propulsão nuclear, a completa nacionalização e o desenvolvimento em escala industrial do ciclo do combustível nuclear, inclusive a conversão e seu enriquecimento, e da tecnologia de construção de reatores nucleares;
- c) aprimorar as tecnologias e capacitações nacionais com vistas a qualificar o País a projetar e construir reatores de pesquisa, reatores de teste e termelétricas nucleares, ainda que desenvolvidas por meio de parcerias com outros países ou com empresas estrangeiras, com o propósito de garantir a segurança energética, por meio, inclusive, da diversificação da matriz energética nacional; e
- d) aumentar a capacidade de usar a energia nuclear em amplo espectro de atividades de uso pacífico, inclusive por meio de parcerias (MD, 2020b).

As Ações Estratégicas de Defesa (AED), apresentadas no capítulo 4 da END, reforçam o incentivo ao desenvolvimento de tecnologia nuclear própria. Nota-se que, para além dos objetivos próprios de defesa nacional, a Estratégia inclui aspectos de segurança energética e busca por capacitação industrial para o amplo emprego do uso pacífico da tecnologia nuclear, incluindo qualificação para projetar e construir centrais term nucleares. Aqui aparece um relativo desalinhamento entre o monopólio registrado no texto

constitucional e os objetivos da END, que demandam um maior dinamismo para a promoção do desenvolvimento nuclear brasileiro.

Com relação aos documentos condicionantes emitidos pela MB, a Política Naval (MB, 2020a) tem o propósito de estabelecer os Objetivos Navais, que orientam o planejamento estratégico da MB. Essa Política traz como um de seus pressupostos básicos que a MB deverá dar ampla divulgação dos propósitos do PNM e do PROSUB e dos benefícios trazidos para a sociedade pelo emprego dual da tecnologia desenvolvida no âmbito desses programas.

Entre os doze objetivos registrados na Política Naval, o Objetivo Naval 4 – Cooperar com o desenvolvimento nacional – lembra que a área de tecnologia de defesa é, normalmente, desenvolvida de forma autóctone, visto tratar-se de tecnologia sensível que os países dificilmente transferem. Adicionalmente, ressalta a contribuição da MB no domínio do ciclo do combustível nuclear, cujo “esforço tecnológico realizado tem enorme potencial de expansão para o setor industrial nacional” (MB, 2020a); e reafirma, a exemplo da PND, que os programas estratégicos da Marinha devem privilegiar o fortalecimento da BID, buscando regularidade na demanda de produtos e serviços. Por fim, ao registrar a visão de futuro, a Política Naval almeja que a MB – e o Brasil – tenha alto grau de independência tecnológica, que inclui a parcela do desenvolvimento nuclear sob responsabilidade da MB.

O PEM 2040 inclui o PNM entre os sete programas estratégicos da MB (MB, 2020b). O documento registra que o PNM é um programa de grande importância estratégica para a MB, visto que objetiva dotar a Força de um meio – o SN-BR – que dará nova dimensão à Defesa Nacional. Registra ainda que os ganhos obtidos com o domínio do ciclo do combustível nuclear têm caráter dual, cujos resultados podem ser aproveitados nas áreas do setor energético, saúde e agroindustrial.

Relativo às diretrizes que norteiam a política brasileira na área do desenvolvimento nuclear, tem-se que, desde o início das pesquisas científicas brasileiras, principalmente a partir da década de 1950, o governo brasileiro emite normas relativas ao tema, a exemplo das já citadas Leis:

- a) Nº 1.310, de 15 de janeiro de 1951, que criou o CNPq e instituiu o monopólio estatal sobre a comercialização de materiais nucleares e as atividades atreladas ao aproveitamento da energia nuclear (BRASIL, 1950);
- b) Nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, que criou o monopólio estatal sobre a pesquisa e a lavra de minérios nucleares; o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minerais e elementos nucleares, materiais físséis e férteis e substâncias radioativas (BRASIL, 1962); e
- c) Nº 5.740, de 1º de dezembro de 1971, que autorizou a criação da CBTN, com atribuições de explorar as jazidas de minério nuclear e promover o desenvolvimento da tecnologia nuclear, envolvendo o beneficiamento e o enriquecimento de urânio e a fabricação de elementos combustíveis (BRASIL, 1971).

Uma das principais atribuições da CBTN era, conforme seu Art. 3º, III, “Promover a gradual assimilação da tecnologia nuclear pela indústria privada nacional” (BRASIL, 1971). Depreende-se que, não obstante o monopólio estatal determinado em 1951, a Lei Nº 5.740 registra a intenção de que a tecnologia nuclear, totalmente a cargo da União e de empresas públicas, fosse transferida para a iniciativa privada.

Posteriormente, a Lei Nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, altera a denominação da CBTN, que passa a se denominar Empresas Nucleares Brasileira Sociedade Anônima – NUCLEBRÁS; e atribui à CNEN, conforme Art. 2º, IV, h, a atividade de “transferência de tecnologia nuclear a empresas industriais de capital nacional, mediante consórcio ou acordo comercial” (BRASIL, 1974). Mais uma vez, um ato normativo incentiva que a tecnologia nuclear seja transferida para empresas industriais brasileiras.

O Decreto-Lei Nº 2.464, de 31 de agosto de 1988, promove um novo ajuste de denominação, passando a NUCLEBRÁS a se denominar Industrias Nucleares do Brasil S/A – INB, que assume as atividades nucleares anteriormente atribuídas à NUCLEBRÁS (BRASIL, 1988b).

Finalmente, a Política Nuclear Brasileira tem suas diretrizes consolidadas no Decreto Nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018 (BRASIL, 2018). O referido Decreto apresenta definições importantes e apresenta princípios, diretrizes e objetivos para as atividades nucleares brasileiras, reforçando que o uso da tecnologia nuclear no Brasil só é admitido para fins pacíficos; que o Brasil tem o domínio da tecnologia relativa ao ciclo do combustível nuclear; e que o País deve buscar autonomia tecnológica na área nuclear.

A próxima seção apresenta os objetivos da Política Nuclear Brasileira. É realizada uma avaliação sobre a efetividade dessa Política, pela verificação do atendimento dos seus objetivos.

4.4 A efetividade da Política Nuclear Brasileira

A Política Nuclear Brasileira visa “orientar o planejamento, as ações e as atividades nucleares e radioativas no País, em observância à soberania nacional, com vistas ao desenvolvimento, à proteção da saúde humana e do meio ambiente” (BRASIL, 2018). Nesse sentido, estabelece 31 objetivos que podem ser avaliados quanto à sua efetividade, que se define como a capacidade de concretizar-se em efeitos reais.³⁰

Os efeitos reais produzidos pela Política Nuclear Brasileira são avaliados para cada um dos objetivos, que podem ser percebidos como:

- a) atendido – quando há evidências da efetivação do objetivo, ou, caso se refira a ação futura, quando há a percepção de que será atendido;
- b) atendido parcialmente – quando ações do Estado foram definidas no sentido de concretizar o objetivo; e
- c) não atendido – quando não há ações em andamento no sentido de concretizar o objetivo.

Com bases nesse entendimento, apresenta-se nos QUADROS 6, 7 e 8 a avaliação realizada sobre a efetividade da Política Nuclear Brasileira.

30 Dicionário Michaelis on-line, disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/efetividade>>. Acesso em: 02 ago.2022.

QUADRO 6
Objetivos da Política Nuclear Brasileira atendidos (continua)

OBJETIVO	AVALIAÇÃO
Art. 5º, I - preservar o domínio da tecnologia nuclear no País;	Considera-se que o domínio do ciclo do combustível nuclear, obtido pela MB e pelo IPEN, se mantém preservado enquanto são transmitidos, pelo menos, a nível laboratorial.
Art. 5º, III - garantir o uso seguro da tecnologia nuclear e fortalecer as atividades relacionadas com o planejamento, a resposta a situações de emergência e eventos relacionados com a segurança nuclear e a proteção física das instalações nucleares;	As instalações brasileiras atendem a requisitos internacionais de segurança nuclear; o Sistema de Proteção do Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON), instituído em 1997, e subordinado ao Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (GSI-PR) executa as atividades de proteção do conhecimento e das instalações e atendimento a emergências nucleares no Brasil (GSI-PR, 2022).
Art. 5º, V - ampliar o uso médico da tecnologia nuclear como ferramenta para a melhoria da saúde da população;	A tecnologia nuclear tem sido amplamente utilizada na área da medicina, seja pelo emprego dos radiofármacos, seja pela aplicação de aparelhos que utilizam tecnologia nuclear.
Art. 5º, VI - reforçar o posicionamento do País em favor do desarmamento e da não proliferação de artefatos nucleares;	O Brasil é signatário dos principais tratados internacionais relativos a não proliferação e banimento de artefatos nucleares; registra, no texto constitucional, seu posicionamento quanto à aplicação da tecnologia nuclear apenas para fins pacíficos.
Art. 5º, VII - atualizar e manter a estrutura do setor nuclear, observadas as áreas de atuação de seus órgãos componentes, com vistas a garantir a sua integração, eficácia e eficiência, além de evitar a sobreposição de competências e o acúmulo de atribuições conflitantes;	Considera-se que, no contexto do monopólio estatal na área nuclear, a estrutura do setor está bem estabelecida, havendo instituições dedicadas à normatização e fiscalização (ANSN), pesquisa e fomento (CNEN) e atividades industriais (INB), não se percebendo sobreposição de atribuições.
Art. 5º, VIII - fomentar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação da tecnologia nuclear;	A CNEN, pela atuação do IPEN, e a MB promovem pesquisa e desenvolvimento que contribuem para a inovação no setor.
Art. 5º, IX - promover a cooperação entre as instituições científicas, tecnológicas e de inovação da área nuclear e os usuários dessa tecnologia;	As poucas organizações públicas e científicas que tratam de assuntos relativos a tecnologia nuclear cooperam entre si, quando cabível.
Art. 5º, XI - incentivar a produção nacional de minérios nucleares e de seus subprodutos, inclusive nas ocorrências associadas a outros bens minerais, com vistas ao atendimento da demanda interna e das exportações;	A exploração de minério nuclear é monopólio da União, sendo a INB a empresa pública executora, que explora a mina de urânio localizada em Caetité-BA (INB, 2022d).

QUADRO 6
Objetivos da Política Nuclear Brasileira atendidos (conclusão)

OBJETIVO	AVALIAÇÃO
Art. 5º, XII - assegurar o recurso geológico estratégico de minério nuclear e o estoque estratégico de material nuclear;	considera-se que esse objetivo não encontra embaraços ao seu cumprimento.
Art. 5º, XV - incentivar a formação continuada de recursos humanos necessários ao desenvolvimento da tecnologia nuclear e a sua fixação nesse setor;	A despeito do comentário ao Art. 5º, XVIII, a formação de recursos humanos na área nuclear tem apresentado expansão no Brasil; a USP instituiu, em 2021, o curso de graduação em engenharia nuclear; diferentes universidades oferecem cursos de pós-graduação na área nuclear.
Art. 5º, XIX - garantir o gerenciamento seguro dos rejeitos radioativos;	Conforme configuração atual, cada organização e instituição que manipule material radioativo é responsável pela disposição dos rejeitos gerados; está sendo projetado o Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, que aperfeiçoará o gerenciamento de rejeitos radioativos no Brasil (CDTN, 2019).
Art. 6º, II - garantir o atendimento integral da demanda interna de minério nuclear;	Com base na demanda atual para as usinas de Angra 1 e 2, e tendo em vista a produção anual de minério de urânio pela INB, este objetivo está sendo atendido (INB, 2022e).
Art. 6º, III - estabelecer o recurso estratégico de minério nuclear;	Objetivo semelhante ao Art. 5º, XII, não se percebendo dificuldade de cumprimento.
Art. 6º, V - promover o desenvolvimento de rotas tecnológicas que aumentem a eficiência da lavra e do beneficiamento do minério nuclear;	Atividade que compete à INB; a mineração de urânio, que havia sido interrompida em 2015, foi retomada em dezembro de 2020 (EBC, 2020); o processo de lixiviação é consagrado; entende-se que a INB emprega a melhor tecnologia para essas atividades.
Art. 7º, III - determinar e manter atualizado o estoque estratégico de material nuclear; e	vide comentário ao Art. 6º, III.
Art. 7º, V - ampliar a interação da indústria nuclear brasileira com as instituições científicas, tecnológicas e de inovação nacionais e internacionais.	Como consequência do monopólio estatal no setor, a indústria nuclear brasileira conta com poucos atores, entre os quais ocorre interação conforme demanda das organizações.

Fonte: o autor.

QUADRO 7
Objetivos da Política Nuclear Brasileira parcialmente atendidos (continua)

OBJETIVO	AVALIAÇÃO
Art. 5º, II - atender às decisões futuras do setor energético quanto ao fornecimento de energia limpa e firme, por meio da geração nucleoe elétrica;	Decisões futuras que determinem ampliação da modalidade termonuclear na matriz elétrica brasileira, deverão contar com contratações internacionais, incluindo parcela das etapas de obtenção do combustível nuclear.
Art. 5º, IV - promover a conscientização da sociedade brasileira, de forma transparente, a respeito dos benefícios do uso da tecnologia nuclear e das medidas que permitam o seu emprego de forma segura;	Diferentes iniciativas, a exemplo da NUCLEOTIZA, da UFMG, colaboram com esse objetivo (TAKARASHI, 2021); considera-se, no entanto, que a comunicação efetiva sobre o papel da energia nuclear deve ser aprimorada.
Art. 5º, X - fomentar a pesquisa e a prospecção de minérios nucleares no País;	A prospecção de minérios nucleares no Brasil é monopólio da União, que atribui à INB essa atividade, interrompida na década de 1980 (ALVES, 2015).
Art. 5º, XIV - promover a autossuficiência nacional na produção e no fornecimento de radioisótopos e a sua exportação;	A EC Nº 49/2006 quebrou o monopólio da União relativo à produção de radiofármacos de meia-vida curta; alguns radiofármacos dependem de importação de insumos (CNEN, 2022e); o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), quando finalizado, suprirá essa demanda (CNEN, 2021).
Art. 5º, XVI - fomentar a formação inicial e continuada, a fixação e a otimização da gestão dos recursos humanos para o setor nuclear brasileiro, com vistas à preservação do conhecimento obtido e à manutenção da segurança e da capacidade operacional desse setor;	vide comentário ao Art. 5º, XVIII.
Art. 5º, XVII - estimular a capacitação técnico-científica e industrial compatível com as necessidades do setor nuclear;	Atualmente, diferentes universidades oferecem cursos de graduação e de pós-graduação na área nuclear; usualmente a MB e a CNEN capacitam seu pessoal internamente; a capacitação industrial deve ser aprimorada dado que, por falta de possuir uma indústria nuclear consolidada, o Brasil não é autossuficiente nessa área.
Art. 5º, XVIII - incentivar o planejamento e a execução de projetos destinados ao setor nuclear, com vistas a garantir a fixação e a otimização do capital intelectual formado no País;	Por força do monopólio estatal, poucas organizações, a exemplo da MB, INB e CNEN, desenvolvem projetos na área nuclear; uma maior abertura para a iniciativa privada pode contribuir para ampliar o número de projetos, com reflexos positivos para a qualificação e a fixação do pessoal formado no País.

QUADRO 7
Objetivos da Política Nuclear Brasileira parcialmente atendidos (conclusão)

OBJETIVO	AVALIAÇÃO
Art. 6º, I - estimular o levantamento geológico, no País, destinado à identificação e à determinação das ocorrências de minerais nucleares;	vide comentário ao Art. 5º, X.
Art. 6º, IV - incentivar o aproveitamento de resíduos gerados pela atividade de mineração que contenham elementos nucleares;	A INB formou, em parceria com o Grupo Galvani, o Consórcio Santa Quitéria, visando aproveitar o urânio atrelado ao fosfato, que ocorre na jazida de Itataia, em Santa Quitéria-CE; a produção não se iniciou (INB, 2022e).
Art. 7º, IV - promover o desenvolvimento da indústria nacional destinada à produção de radioisótopos e de radiofármacos; e	vide comentário ao Art. 5º, XIV.
Art. 7º, VI - fomentar a competitividade das indústrias do setor nos mercados interno e externo.	A constituição de um grupo de empresas brasileiras fornecedoras de itens para a indústria nuclear não está estabelecida; a MB e a INB demandam produtos e serviços para aplicação nuclear, não atingindo a regularidade requerida para fomentar o setor.

Fonte: o autor.

QUADRO 8
Objetivos da Política Nuclear Brasileira não atendidos

OBJETIVO	AVALIAÇÃO
Art. 5º, XIII - garantir a autonomia na produção do combustível nuclear, em escala industrial e em todas as etapas do seu ciclo, com vistas a assegurar o suprimento da demanda interna;	Conforme capítulos 2 e 3, o Brasil não implementa, em escala industrial, todas as etapas do ciclo do combustível nuclear; a etapa da conversão está sendo implementada no CEA para atender aos propósitos da MB; a capacidade de enriquecimento da INB atende parcialmente as necessidades internas.
Art. 7º, I - desenvolver e manter todas as etapas do ciclo do combustível nuclear em escala industrial;	vide comentário ao Art. 5º, XIII.
Art. 7º, II - atender, preferencialmente com a produção nacional, às demandas de material nuclear e de combustível do setor nuclear; e	vide comentário ao Art. 5º, XIII.
Art. 7º, VII - estimular a transferência da tecnologia criada nas instituições científicas, tecnológicas e de inovação para a indústria nacional.	a despeito do que registram as Leis Nº 5.740/1971 (Art. 3º, III) e Nº 6.189/1974 (Art. 2º, IV, h) no sentido de que se promova a gradual assimilação da tecnologia nuclear pela indústria privada, o monopólio estatal em matéria de atividades nucleares dificulta a efetivação desse objetivo.

Fonte: o autor.

Diferentes aspectos foram considerados na elaboração dos objetivos avaliados. Parte dos objetivos tem foco na qualificação e retenção de pessoal; outros objetivos se direcionam à prospecção e estabelecimento de estoque estratégico de recursos minerais. Os objetivos que foram avaliados como “não atendidos” relacionam-se a garantir autonomia nacional na produção do combustível nuclear e estimular a transferência da tecnologia nuclear para a indústria nacional. Esses dois aspectos têm relação direta com a restrição apresentada pelo texto da CF de 1988, que determina o monopólio estatal sobre o minério radioativo e as atividades industriais do ciclo do combustível nuclear.

Dada a importância do tema no contexto internacional, é apropriado que a União exerça controle sobre tais atividades, de forma a evitar uso em desacordo com os compromissos assumidos internacionalmente. Esse controle, no entanto, pode ocorrer num cenário onde se permita a entrada da iniciativa privada, que pode trazer investimentos para o setor nuclear brasileiro.

No presente capítulo foram analisados diferentes documentos que condicionam o desenvolvimento da tecnologia nuclear no Brasil. Quanto aos atos normativos brasileiros, os textos constitucionais, desde a CF de 1891, foram analisados em relação ao tratamento dado ao minério e às atividades nucleares. Percebeu-se uma progressiva proteção desse setor, culminando no monopólio estatal incorporado ao texto constitucional de 1988. Leis e Decretos relacionados a atividades nucleares foram examinadas e, por último, a Política Nuclear Brasileira, Decreto Nº 9.600/2018, foi avaliado quanto ao atingimento dos objetivos que norteiam o desenvolvimento nuclear brasileiro. Dois conjuntos de objetivos não são alcançados atualmente, que são: a autossuficiência na produção de combustível nuclear para atender as demandas internas e a transferência de tecnologia para o setor privado.

No próximo capítulo, são formuladas possibilidades para a gestão das atividades da indústria de combustível nuclear no Brasil.

5 MODELOS PARA A OBTENÇÃO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL

No capítulo 3 foram discriminadas as atividades que compõem o ciclo do combustível nuclear, composto por uma série de etapas encadeadas que, partindo da lavra do minério nuclear, produz elementos combustíveis para serem empregados nos reatores das usinas de geração termonuclear.

A aplicação da tecnologia nuclear, conforme visto, vai além da geração de energia elétrica. Esta é, no entanto, a principal aplicação sob o ponto de vista do volume de material empregado e dos impactos econômicos que produz.

De acordo com o capítulo 2, a geração termonuclear se mantém como uma alternativa interessante quando se consideram: a transição energética em execução; a instabilidade de outras fontes de energia; e o relativo domínio da tecnologia nuclear para esse fim. Na atualidade, o conflito Russo-Ucraniano, em andamento em agosto de 2022, acrescenta um novo fator para que os países considerem aumentar sua segurança energética, reduzindo a dependência de fontes externas.

Internamente, o Brasil tem o desafio de produzir combustível nuclear para atendimento às demandas internas que são constituídas, basicamente, pelas usinas termonucleares de Angra 1, 2 e 3; e pelos programas estratégicos da MB – PNM e PROSUB. Vencer esse desafio é atender a Política Nuclear Brasileira que tem, entre seus principais objetivos, garantir a autonomia na produção de combustível nuclear, em escala industrial.

Diferentes modelos podem ser formulados para estruturar a indústria de combustível nuclear no Brasil. Tais modelos são impactados, principalmente, pela flexibilização que seja dada ao monopólio estatal sobre os recursos e atividades nucleares.

De forma a realizar, ao final do capítulo, uma análise comparativa entre os modelos, são considerados, na exposição de cada modelo, os seguintes aspectos:

- a) complexidade para implementar;
- b) custo para implementar;
- c) alocação do orçamento público;
- d) desenvolvimento de tecnologia nacional;

- e) aproveitamento dos recursos minerais brasileiros;
- f) impactos na BID;
- g) atendimento dos objetivos da Política Nuclear Brasileira; e
- h) impactos para a MB.

5.1 Manutenção do monopólio estatal

Sendo mantido o monopólio estatal sobre o minério e as atividades nucleares, conforme determina Arts. 21 e 177 da CF de 1988, apenas a União, diretamente ou por meio de empresa pública, pode executar as atividades de que trata tal monopólio.

A maturidade do domínio industrial do ciclo do combustível nuclear no Brasil foi apresentada no QUADRO 5, indicando que as principais limitações se referem às etapas de:

- a) conversão, cuja única instalação está sendo implantada no CEA, para atender aos propósitos da MB; a INB divulga que planeja contratar projeto, objetivando construir uma unidade de conversão em Resende (INB, 2022j); e
- b) enriquecimento, cuja capacidade atualmente instalada na INB é insuficiente para atender a demanda de Angra 1, sendo planejada a ampliação da Usina de Enriquecimento de Urânio da INB (INB, 2022k).

Criação de uma nova Empresa Pública

Conforme consta no seu estatuto, a INB é uma empresa pública instituída para executar as atividades monopolizadas pela União conforme Art. 21 da CF (INB, 2022a). A criação de uma nova empresa pública deverá ser acompanhada da definição sobre quais etapas competiriam à ela, e quais etapas permaneceriam com a INB. Esse modelo poderia ser implementado para desafogar a INB de parcela de suas atribuições ou para encarregar-se do processo de conversão, etapa que a INB não desempenha atualmente.

Para um cenário em que o processo de conversão seja realizado para atender exclusivamente as demandas internas, avalia-se que a criação de uma nova empresa pública apresenta um baixo benefício para o custo que se seguiria, dado que seria necessário prover

espaço físico e alocar recursos humanos e um orçamento suportado pela União para efetivar esse modelo.

Na possibilidade de que tal empresa passasse a executar o processo de conversão para atender as demandas internas e, eventualmente, exportasse UF6, haveria um benefício adicional que poderia justificar a criação de uma nova empresa pública para encarregar-se desta ou de outras etapas específicas do ciclo do combustível nuclear. Em todo caso, seria necessário avaliar em que medida essa decisão é mais vantajosa que investir para que a INB execute essa etapa.

A FIG. 7 esquematiza a organização industrial para o modelo onde é criada uma nova empresa pública para assumir atividades da indústria nuclear brasileira.

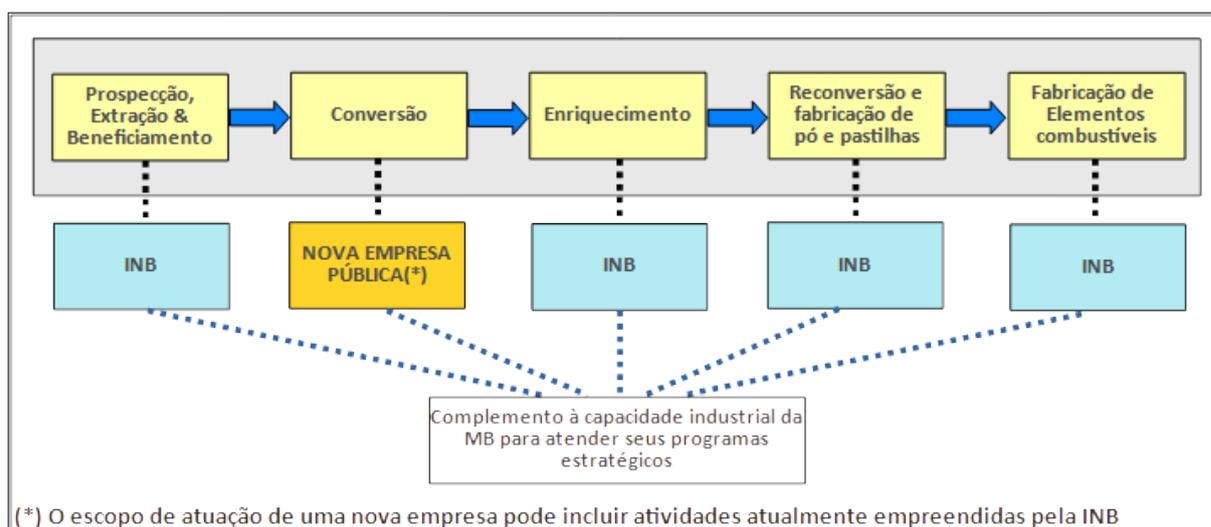


FIGURA 7 – Organização industrial das etapas do ciclo, considerando criação de uma nova empresa pública.

Fonte: o autor.

Esse modelo não representa grande complexidade para ser implementado. O maior desafio seria a alocação de recursos financeiros e de recursos humanos para a nova estatal. As novas instalações ficariam a cargo da União, conforme ocorre atualmente.

Em relação aos custos para implementar, essa alternativa é custosa, visto que, necessitando de instalações próprias, uma nova estatal demandaria investimentos na construção de facilidades industriais.

Essa é a alternativa que provoca o maior impacto sobre o orçamento público pois a União teria que arcar com todos os custos atrelados à implantação das novas instalações

industriais, devendo alocar parcela do orçamento para a nova estatal, além de realizar a alocação do pessoal necessário às operações.

O desenvolvimento de tecnologia nacional se daria nos moldes do que ocorre atualmente, dependendo fortemente das Organizações e Institutos historicamente envolvidos no setor nuclear brasileiro (MB, CNEN, IPEN, INB).

O mesmo se daria em relação ao aproveitamento dos recursos minerais brasileiros e ao fortalecimento da BID. As contribuições seriam de pouco impacto, dado que permaneceriam, a rigor, as condições de fomento atuais.

Quanto ao atendimento dos objetivos da Política Nuclear Brasileira, haveria um melhor direcionamento para que o Brasil atinja o domínio industrial de todas as etapas do ciclo. A transferência de tecnologia para a iniciativa privada, no entanto, não seria efetivada.

Essa organização industrial pode impactar positivamente a MB dado que a obtenção eventual de combustível – ou parte dos insumos – poderia se dar por meio da nova estatal.

Empresa Pública existente

Em uma organização industrial onde uma empresa pública existente assumisse etapas do ciclo do combustível nuclear, tem-se que a INB seria a escolha natural, dado que foi criada para essa finalidade. Conforme já discriminado, a INB é a entidade de execução das atividades monopolizadas pela União na área nuclear. Referente ao ciclo do combustível, seu Estatuto registra que a mesma tem por objeto a:

- a) prospecção, pesquisa e a lavra de jazidas de minérios nucleares;
- b) operação de instalações de tratamento e industrialização de minérios nucleares;
- c) operação de instalações destinadas ao enriquecimento de urânio; e
- d) produção de elementos combustíveis e outros materiais de interesse da indústria nuclear.

Relativo ao ciclo do combustível nuclear, todas as atividades desde a mineração até a fabricação dos elementos combustíveis são de interesse da INB, conforme cita seu Estatuto Social (INB, 2022a). Atualmente a INB não possui a capacidade de realizar a etapa da conversão (INB, 2022j). Caso sejam construídas as instalações para esse processo, todas as etapas passariam a ser executadas pela INB, cuja capacidade produtiva dependeria de investimentos por parte da União para que atendesse a demanda interna e, eventualmente, exportasse seus produtos.

A manutenção do monopólio estatal sobre as atividades nucleares limita as fontes de investimento para o crescimento da indústria nuclear brasileira. Diferentemente da Petrobrás, cujos produtos finais eram facilmente escoados nos mercados interno e externo, a INB atende a um único cliente – a Eletronuclear – e depende de repasses do Governo Federal para manter-se e realizar investimentos. Esse é um fator limitante para o estabelecimento de uma indústria nuclear brasileira de maior porte.

A FIG. 8 apresenta a organização industrial em que a INB se consolida como a única empresa pública encarregada das atividades da indústria nuclear brasileira.

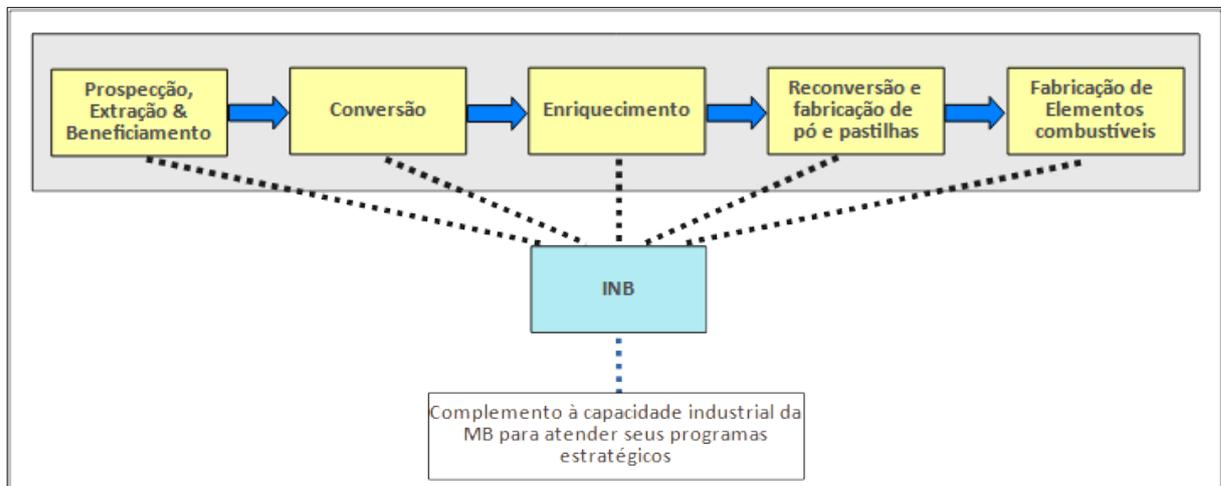


FIGURA 8 – Organização industrial das etapas do ciclo, considerando consolidação da INB para realização de todas as etapas.

Fonte: o autor.

Esse modelo é o que perpetua as condições atuais. Nesse sentido, representa a menor complexidade para implementar.

Quanto aos custos para implementar e à alocação de orçamento público, os investimentos na INB dependem do repasse da União. Apesar de representar uma vantagem em relação à criação de uma nova estatal, o fortalecimento da INB está limitado ao orçamento anual que pode ser alocado à Empresa. Nesse sentido, o ritmo de crescimento pode permanecer abaixo do almejado.

O desenvolvimento de tecnologia nacional, o aproveitamento dos recursos minerais brasileiros e os impactos na BID seriam os mesmos observados atualmente, dado que o modelo de gestão é, essencialmente, o que se encontra atualmente implementado.

Nesse modelo, seriam mantidas as condições atuais quanto à organização industrial nuclear brasileira, que limita o ritmo do desenvolvimento nuclear nacional na busca pelo domínio industrial das etapas do ciclo. A Política Nuclear Brasileira não seria atendida quanto à transferência de tecnologia para a iniciativa privada.

Apesar de não haver impactos para a MB com a manutenção do modelo atual, um contrato pode ser idealizado entre esta e a INB, de forma que a INB passe a fornecer combustível nuclear – ou parte dos insumos – para os propósitos da MB.

5.2 Abertura para a iniciativa privada

Com a flexibilização do monopólio estatal sobre os recursos minerais e as atividades nucleares, há a possibilidade de que o setor privado realize, parcial ou totalmente, etapas do ciclo. O envolvimento da iniciativa privada traria uma nova fonte de investimentos que contribuiria para o aproveitamento das reservas de minério nuclear e o desenvolvimento industrial brasileiro. Nesse contexto, o incentivo à ampliação da capacidade industrial partiria do governo, com o objetivo de alcançar, inicialmente, autonomia nacional para obtenção de combustível nuclear.

Consolidada essa indústria, a entrada do Brasil no mercado internacional poderia ser pensada, com indústrias brasileiras fornecendo produtos e serviços da área nuclear para outros países. Conforme já se efetiva hoje, o envolvimento do setor acadêmico poderia ser ampliado, dando maior oportunidade para que indústria e universidade trabalhem juntos

para promover inovação tecnológica na área nuclear. O IPEN mantém diferentes linhas de pesquisa na área nuclear³¹ e, com demandas vindas de empresas privadas, poderia ampliar sua contribuição para o desenvolvimento tecnológico brasileiro.

Esse arranjo configura o conceito da Hélice Tríplice, quando governo, indústria e universidade interagem num círculo virtuoso para gerar inovação, concretizando o conhecimento gerado na academia (ETZKOWITZ e ZHOU, 2017). Conforme os modelos apresentados por Etzkowitz e Zhou (2017, p. 34-40), o Brasil adota o modelo estadista para o desenvolvimento do setor nuclear.

Desde as primeiras pesquisas, conduzidas pelo Almirante Álvaro Alberto, passando pelo domínio do ciclo do combustível nuclear e pela capacidade industrial da INB, o governo teve papel central no fomento da área nuclear. E não poderia ser diferente.

Disciplinado por rígidos procedimentos de controle, a atividade industrial nuclear de qualquer país tem o governo como principal propulsor. Na hipótese de que empresas privadas participem dessa indústria, “espera-se que o governo assuma a liderança no desenvolvimento de projetos e forneça recursos para novas iniciativas” (Ibidem, p. 35).

Formulam-se dois modelos para o envolvimento da iniciativa privada na indústria nuclear brasileira: parcerias público-privadas (PPP) e iniciativa privada propriamente dita.

Parceria Público-Privada

No Brasil, as PPP são regidas pela Lei Nº 11.079, de 30 de dezembro de 2004, que define as possibilidades de aplicação de tais parcerias (BRASIL, 2004).

Primeiramente, deve-se observar que as PPP são um tipo especial de concessão, destinada a oferecer serviço de obrigação da administração pública.

Na conceituação de Hely Lopes de Meirelles, o serviço público é prestado pela Administração ou por seus delegados para satisfazer necessidades da coletividade ou por simples conveniências do Estado (MEIRELLES apud GROTTI, 2017).

Os serviços públicos essenciais relacionam-se a necessidades básicas da coletividade, como fornecimento de água, coleta de lixo, saúde pública e transporte público.

31 O site do IPEN apresenta os ramos de atuação do Instituto (IPEN, 2022c).

No caso da fabricação de combustível nuclear para atender demandas internas, esse serviço pode ser, apropriadamente, objeto de parceria, visto que tem relação com segurança energética, de responsabilidade da administração pública.

As concessões públicas podem ser de três tipos, conforme a Lei Nº 11.079/2004:

- a) comum, quando o prestador de serviço é remunerado diretamente pelos usuários, sem contraprestação pecuniária por parte do Estado;
- b) patrocinada, quando o prestador é remunerado tanto pelos usuários do serviço quanto pelo poder público, de acordo com as condições do contrato;
- e
- c) administrativa, quando o estado suporta inteiramente os custos do serviço prestado.

As PPP não se aplicam às concessões comuns, que são regidas pela Lei Nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995 (BRASIL, 1995b).

Das definições apresentadas, depreende-se que uma PPP para atividades relacionadas às etapas do ciclo se daria na modalidade concessão administrativa. O envolvimento de um ente privado nessa indústria apresenta as seguintes vantagens:

- preencher lacunas para o domínio industrial pleno do ciclo do combustível nuclear no Brasil;
- assumir tarefas que possam ser alocadas à iniciativa privada, desonerando a INB;
- efetivar a hélice tríplice, sob coordenação e incentivo da União; e
- atender a Política Nuclear Brasileira, com a transferência de tecnologia nuclear para a iniciativa privada;

Adicionalmente, a PPP mantém o controle do Estado sobre o serviço realizado, visto que se dá em regime de concessão.

A FIG. 9 apresenta a organização industrial que considera PPP para a concessão de serviços ligados à indústria nuclear brasileira.

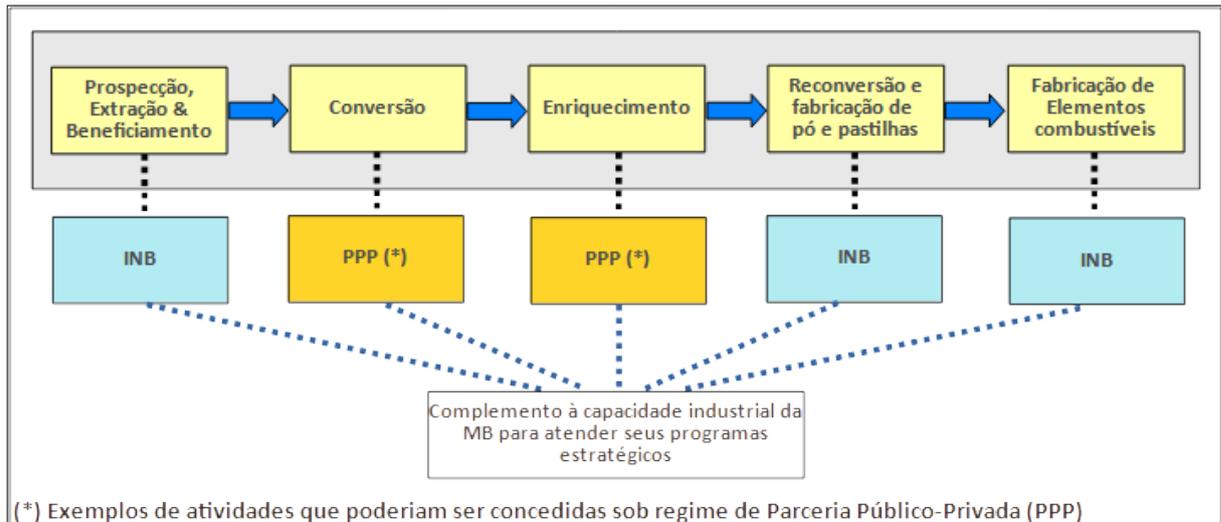


FIGURA 9 – Exemplo de organização industrial das etapas do ciclo, considerando concessão de atividades com Parceria Público-Privada.

Fonte: o autor.

Este modelo de gestão apresenta relativa complexidade para ser implementada.

Para que se efetive esse tipo de regime de concessão, alguns aspectos deverão ser considerados, como:

- ajuste no texto constitucional – a exemplo da flexibilização introduzida pela EC Nº 9/1995, que quebrou o monopólio estatal sobre a pesquisa e a exploração de petróleo e gás, ato semelhante deverá ser emitido quanto ao monopólio do minério e das atividades nucleares;
- estabelecimento de proteções quanto às tecnologias a serem transferidas – a tecnologia nuclear constitui conhecimento sensível e os processos, metodologias e sistemas desenvolvidos no Brasil devem contar com o adequado sigilo industrial; e
- inclusão de novo ator na indústria nuclear brasileira – os impactos da entrada de um ente privado deverão ser avaliados, visando ajustar acordos internacionais de salvaguardas dos quais o Brasil é parte.

Considerando que o setor representa um mercado atrativo para a iniciativa privada – conforme análise realizada no Capítulo 2 – os custos para implementar seriam assumidos, em grande medida, pelo setor privado.

A alocação de orçamento público fica atrelado às encomendas estatais dos produtos que passarem a ser produzidos pela indústria privada. Muito embora essa alocação tenha um aspecto de desoneração para a União, essa vantagem só se observa nos custos de implantação. As encomendas estatais continuadas seriam fundamentais para o sucesso desse modelo, garantindo o retorno sobre o investimento realizado. Num estágio posterior, com a possibilidade de exportação de combustível nuclear, as empresas privadas envolvidas dependeriam menos das encomendas estatais internas.

Nesse modelo, vislumbra-se um grande desenvolvimento de tecnologia nacional na área nuclear, para dar suporte à indústria que se formará.

O melhor aproveitamento dos recursos minerais brasileiros ocorrerá quando o Brasil passar a ser exportador de combustível nuclear em qualquer das etapas do ciclo (UF6 natural, UF6 enriquecido, pastilhas cerâmicas de urânio ou elementos combustíveis prontos). O atendimento às demandas internas representa baixo impacto quanto ao aproveitamento dos recursos minerais brasileiros.

Quanto à BID, a entrada da iniciativa privada representa uma oportunidade de fortalecimento, visto que novas demandas seriam geradas.

Esse modelo é completamente aderente aos objetivos da Política Nuclear Brasileira, por direcionar-se ao domínio industrial do ciclo com transferência da tecnologia desenvolvida para a iniciativa privada.

Quando aos programas estratégicos da MB, as necessidades de combustível nuclear poderiam ser atendidas por essa organização, na medida em que as encomendas estatais poderiam ser feitas para a MB.

Iniciativa privada

Esse modelo assume a entrada da iniciativa privada com o mínimo de controle estatal.

De maneira diferente do regime de PPP, considera-se pouco razoável que uma empresa assuma completamente etapas do ciclo do combustível nuclear. Por tratar-se de atividade que envolve conhecimento sensível e pelo valor estratégico que o setor nuclear

representa, defende-se que essas atividades sejam exercidas pela União, diretamente ou por regime de concessão.

Considerando partes menores das atividades, no entanto, é interessante que a iniciativa privada contribua para a produção de combustível nuclear, fortalecendo a BID. Nesse sentido, contratos de execução de serviços e de fornecimento de materiais e sistemas para instalações nucleares poderiam incluir participação crescente da iniciativa privada.

De forma a incentivar a indústria nacional, a União deve estabelecer um planejamento que garanta demanda continuada dos produtos e serviços, para que não haja risco de perda da capacidade desenvolvida. Para esse modelo de gestão, valem as vantagens e as observações registradas no tópico anterior.

De fato, tanto a INB quanto a MB contam com fornecedores que contribuem para o PNB e o PNM, a exemplo da empresa ATECH, que desenvolve sistemas de controle para o PNM (MB, 2020c). O atendimento dos objetivos da Política Nuclear Brasileira, no entanto, demanda que parte da tecnologia desenvolvida pelo Estado seja transferida para a iniciativa privada. Os incentivos e a legislação devem ser aprimorados para possibilitar o envolvimento privado almejado, com impactos positivos para o desenvolvimento da indústria nacional. A FIG. 10 apresenta uma organização industrial com envolvimento da iniciativa privada.

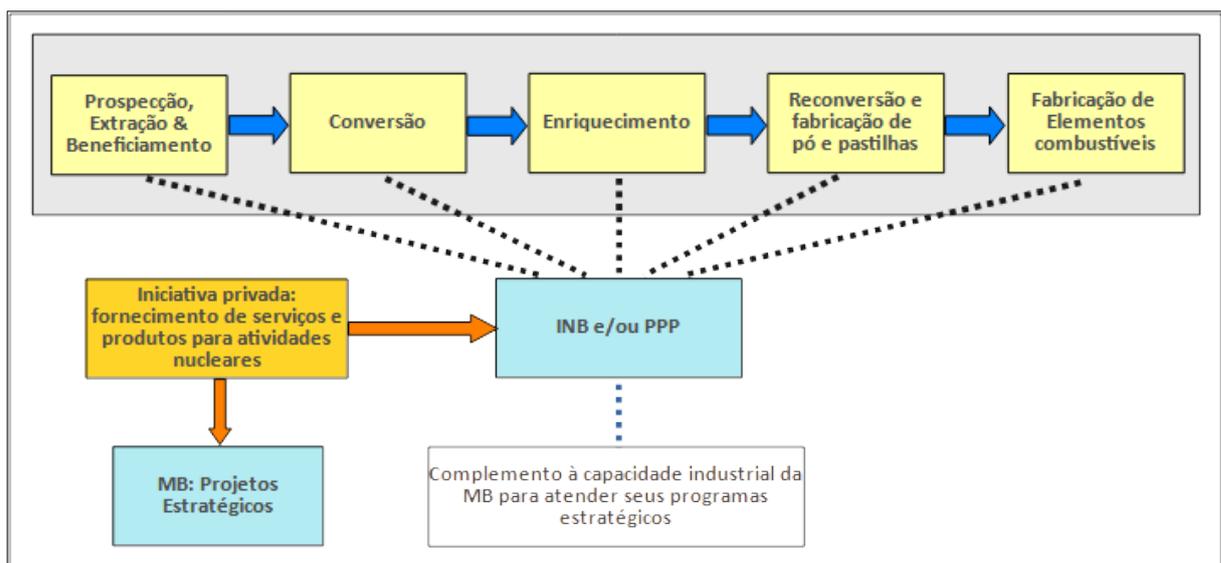


FIGURA 10 – Exemplo de organização industrial das etapas do ciclo, considerando participação da iniciativa privada no fornecimento de serviços e equipamentos.

Fonte: o autor.

Esse modelo de organização industrial implica uma maior liberdade para as empresas privadas envolvidas. Por esse motivo, proteções robustas deveriam ser adotadas para evitar vazamento de conhecimento ou de material sensível.

Os custos para implementar seriam suportados, em grande medida, pela iniciativa privada. Como no modelo de PPP, a União, a princípio, deverá manter encomendas constantes, para financiar o modelo. Com a entrada da indústria no mercado internacional, as encomendas estatais passariam a ter menor importância para a sobrevivência das empresas estatais envolvidas.

A alocação de orçamento público seria direcionada às encomendas feitas pela União. Outros custos ficam a cargo da iniciativa privada.

Haveria grande impulso para desenvolvimento de tecnologia nacional, que deve acompanhar as demandas da indústria que se formará.

Quanto aos recursos minerais brasileiros, estes seriam aproveitados de maneira mais efetiva caso o Brasil passe a ser exportador de combustível nuclear. As demandas internas não aproveitam plenamente esses recursos.

A BID, a exemplo do modelo da PPP, seria fortalecida por que se espera que a indústria que apoia o desenvolvimento nuclear receba novas demandas.

Como para a PPP, esse modelo atende os objetivos da Política Nuclear Brasileira, implicando domínio industrial do ciclo com transferência da tecnologia para a iniciativa privada.

Os programas estratégicos da MB podem se beneficiar desse modelo, na medida em que as encomendas estatais poderiam incluir as necessidades da MB.

Em qualquer dos modelos que envolvam maior participação da iniciativa privada, defende-se que o Estado, promovendo a flexibilização do monopólio sobre as atividades nucleares, mantenha o controle dessas atividades.

5.3 Comparação entre os modelos de gestão formulados

Quatro modelos de gestão foram idealizados para a organização industrial nuclear brasileira. Em dois deles considera-se a manutenção do monopólio estatal sobre as atividades que compõem o ciclo do combustível nuclear; em outros dois, considera-se a flexibilização desse monopólio, permitindo uma atuação mais efetiva da iniciativa privada nessa área.

Com base nos critérios definidos no início deste capítulo, e de acordo com os comentários feitos ao final das seções precedentes, o QUADRO 9 apresenta um resumo da análise realizada, em que é registrada a seguinte escala de pontuação:

- 2 – estima-se impacto positivo ou vantagem relevante;
- 1 – estima-se impacto positivo ou vantagem de menor relevância;
- 0 – sem impactos, vantagens ou desvantagens;
- 1 – estima-se impacto negativo ou desvantagem de menor relevância; e
- 2 – estima-se impacto negativo ou desvantagem relevante.

QUADRO 9
Comparação entre os modelos de gestão formulados

CRITÉRIO	PONTUAÇÃO DOS MODELO DE GESTÃO			
	Nova estatal	INB	PPP	Iniciativa privada
Complexidade para implementar	1	2	-1	-2
Custo para implementar	-2	-1	1	1
Alocação do orçamento público	-2	-1	-1	-1
Desenvolvimento de tecnologia nacional	0	0	1	1
Aproveitamento dos recursos minerais brasileiros	0	0	2	1
Impactos na BID	0	0	1	1
Atendimento dos objetivos da Política Nuclear Brasileira	1	1	2	2
Impactos para a MB	1	1	2	2
Somatório da pontuação atribuída:	-1	2	7	5

Fonte: o autor.

Com base na breve análise realizada, algumas conclusões são possíveis.

Mantida a exclusividade da União no setor nuclear, conclui-se que o melhor modelo é que a INB se mantenha como a empresa pública encarregada de todas as atividades relativas ao ciclo, ampliando sua capacidade de enriquecer urânio e implementando a unidade de conversão, ambos em fase de planejamento. Este modelo está apresentado na FIG. 8.

A criação de uma nova estatal traria o ônus dos custos associados à construção de novas instalações e alocação de orçamento e recursos humanos às custas da União.

Tanto a criação de uma nova empresa quanto o fortalecimento da INB seriam de pouco impacto sobre o aproveitamento dos recursos minerais brasileiros e sobre a ampliação da BID.

A Política Nuclear Brasileiro teria parte de seus objetivos melhor atendidos pela criação de uma nova estatal, que se encarregaria de preencher as lacunas que faltam para o domínio industrial brasileiro do ciclo do combustível nuclear.

A manutenção do monopólio implica vantagens para MB caso seja efetivado contrato para que esta se beneficie da capacidade instalada na INB ou na nova estatal.

As maiores pontuações são observadas no caso da quebra do monopólio estatal sobre os recursos e as atividades nucleares no Brasil.

Nos dois casos que envolvem a entrada da iniciativa privada são estimados avanços significativos em relação a (1) aproveitamento dos recursos minerais brasileiros; (2) ampliação da BID; e (3) atendimento dos objetivos da Política Nuclear Brasileira.

O modelo de gestão que mais se destaca, no entanto, é o regime de concessão com PPP, cuja organização industrial é apresentada na FIG. 9. A PPP apresenta vantagens em relação à abertura para a iniciativa privada fora do regime de parceria. A concessão administrativa mantém a União à frente da definição das áreas que devam receber investimentos, exercendo controle amplo sobre as atividades do ciclo.

Na busca por autonomia brasileira em relação ao ciclo do combustível nuclear, a adoção de qualquer um dos modelos formulados deve ser suportada por políticas

consistentes, que impeçam que os avanços obtidos sejam perdidos por falta de continuidade. A esse respeito, Cabral registra, acertadamente, que

Apesar dos ganhos conquistados rumo à autonomia, o Brasil terá que considerar uma estratégia de associações progressivas, de modo a ganhar espaço próprio no controle dos aspectos técnicos e na incorporação dos efeitos econômicos, para não tornar a entrar em um novo ciclo de dependência tecnológica. O interesse nacional deverá, em todo caso, prevalecer sobre os interesses privados (CABRAL, 2011, p. 68).

Neste capítulo foram formulados modelos para a organização da indústria nuclear brasileira, que se dividem em dois grupos. No primeiro caso, figuram os modelos que consideram a manutenção estatal sobre os minerais e atividades nucleares, conforme determina o Art. 177 da CF de 1988; no segundo caso, são formuladas possibilidades num cenário de flexibilização do monopólio. Uma escala de pontuação foi adotada e indicou que o regime de PPP apresenta vantagens significativas sobre os demais modelos.

O próximo capítulo apresenta a conclusão desta pesquisa.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa realiza uma análise sobre a indústria nuclear brasileira, sobretudo quanto à sua capacidade de produzir combustível nuclear para atender as demandas internas.

No âmbito do Programa Nuclear Brasileiro, combustível nuclear é demandado pelas usinas termonucleares da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Angra 1 e Angra 2. Esse combustível é produzido pela Indústrias Nucleares do Brasil.

No âmbito do Marinha do Brasil, o combustível nuclear será empregado no Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica – LABGENE – e no primeiro submarino convencional brasileiro de propulsão nuclear – o SN-BR, ligados, respectivamente, ao Programa Nuclear da Marinha – PNM – e ao Programa de Desenvolvimento de Submarinos – PROSUB. Para tanto, a Marinha do Brasil desenvolve instalações industriais dedicadas ao ciclo do combustível nuclear. Parte dessas instalações encontra-se em fase de implantação e são dimensionadas, a princípio, para atender aos programas estratégicos citados.

A obtenção do combustível nuclear é realizada por etapas encadeadas que, em conjunto, constituem o ciclo do combustível nuclear, envolvendo transformações químicas, processos físicos e atividades fabris que convertem o minério de urânio em combustível nuclear para ser empregado nos reatores termonucleares. As etapas são: prospecção e beneficiamento do urânio; conversão; enriquecimento; reconversão; fabricação de pó e pastilhas; fabricação de elementos combustíveis; utilização em reatores; e disposição final dos elementos utilizados. O foco da análise foram as etapas desde a prospecção até a fabricação dos elementos combustíveis.

Atualmente, o Brasil depende da contratação de serviços e da aquisição de insumos externos para produzir o combustível nuclear de que necessita. Essas importações representam um contrassenso quando se consideram as expressivas reservas de urânio que o País possui e a tecnologia própria desenvolvida na área nuclear, com domínio de todas as etapas do ciclo do combustível.

Os recursos minerais e as atividades nucleares são, conforme o texto constitucional, monopólio da União. Dessa forma, existe uma limitação dos investimentos feitos no setor da indústria nuclear brasileira, visto que dependem do orçamento da União.

Um dos objetivos deste trabalho é verificar se a indústria de combustível nuclear representa um mercado atrativo a nível mundial. A análise realizada permite concluir que essa indústria é atrativa, apresentando tendência de ampliação mundial para os próximos anos.

A matriz energética mundial é fortemente baseada no consumo de combustíveis fósseis, que emitem gases de efeito estufa e agravam as alterações climáticas, especialmente as ocorridas nos últimos anos. Procurando minimizar esses efeitos, a Organização das Nações Unidas lançou, em 2015, a ambiciosa meta de alcançar a neutralidade de carbono até o ano de 2050. Nesse sentido, os países iniciaram a transição energética, buscando diminuir a participação das fontes que queimam combustível fóssil – carvão mineral, gás natural e petróleo e seus derivados – substituindo-as por modalidade de geração de energia não poluentes. Entre essas fontes figuram as modalidades hidráulica, solar, eólica e nuclear.

Além do compromisso mundial pela redução das emissões de gases poluentes, dois fatos recentes despertaram a busca por fontes alternativas de energia.

O primeiro deles é o conflito Russo-Ucraniano, iniciado em 24 de fevereiro de 2022, que provoca risco de desabastecimento de gás em decorrência de retaliações da Rússia contra as sanções impostas àquele país após o início do conflito. Esse risco representa um alerta para os países europeus quanto à necessidade de reduzir sua dependência de fontes externas. A nova postura europeia em relação à energia nuclear pode influenciar o planejamento energético daqueles países no sentido de aumentar a participação da geração termonuclear.

O segundo fato ocorreu no dia 6 de julho de 2022, quando o Parlamento Europeu passou a classificar o gás natural e a energia nuclear como “investimentos verdes” e, portanto, sustentáveis. Tal decisão abre esses mercados para o investimento privado, evidenciando uma possibilidade de expansão dessas modalidades.

O crescimento da participação das energias renováveis – como a solar e a eólica – implica, segundo estimativas da WNA, na expansão da modalidade nuclear, visto que, para compensar possíveis interrupções de fornecimento decorrentes de condições climáticas

desfavoráveis, as usinas nucleares deverão desempenhar o papel de garantidor da oferta de energia. De acordo com dados da WNA de junho de 2022, existem no mundo 440 usinas termonucleares em operação, com 55 em construção e outras 95 em fase de planejamento.

As reservas mundiais de urânio indicam que os estoques desse minério atenderá o mercado de geração de energia por muitas décadas. O Brasil ocupa posição de destaque, possuindo 4,5% das reservas mundiais. Esse valor pode ser ampliado, considerando que menos de um terço do território nacional foi prospectado.

Outro objetivo específico é avaliar a maturidade da indústria nuclear brasileira voltada à produção de combustível nuclear. Conforme esta pesquisa, verifica-se que o domínio tecnológico foi obtido, existindo lacunas para alcançar o domínio industrial do ciclo do combustível nuclear no Brasil.

O Brasil reúne todas as condições para alcançar a autossuficiência na fabricação de combustível nuclear, podendo tornar-se, eventualmente, um exportador desse produto.

Nas décadas de 1970 e 1980, o Brasil adquiriu a capacidade industrial de executar as etapas de reconversão e de fabricação de pó, de pastilhas e de elementos combustíveis. Essa capacidade é resultado de acordo de transferência de tecnologia com a Alemanha. Essa competência foi adquirida pela NUCLEBRÁS, que em 1988 passou a denominar-se Indústrias Nucleares do Brasil – INB. As etapas de prospecção e de beneficiamento do urânio estão entre as atribuições da INB.

No campo do desenvolvimento científico e tecnológico, os maiores avanços se deram a partir de 1977, com o início do “programa paralelo”, que recebe essa denominação em virtude de ter sido implementado como uma via alternativa aos esforços comerciais brasileiros de adquirir capacidade plena na área nuclear. O programa paralelo foi gerido pelas Forças Armadas brasileiras.

Em 1979 foi instituído o Programa Nuclear da Marinha que, desde o início, conta com a parceria do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Em 1982 os primeiros testes positivos com as ultracentrífugas nacionais foram obtidos. Nesse período, o IPEN já havia dominado os processos de conversão e de fabricação de pastilhas cerâmicas de urânio enriquecido. Ao transferir essa tecnologia para a MB, o IPEN encerrou essas duas atividades. As instalações dedicadas às etapas de conversão e de fabricação de pastilhas

encontram-se em fase de construção no Centro Experimental Aramar, que é o complexo industrial do Programa Nuclear da Marinha, localizado no município de Iperó-SP.

No início da década de 2000, a MB e a INB assinaram contrato para fornecimento e instalação de conjuntos de ultracentrífugas, que enriquecem uma parcela do urânio necessário para as usinas de Angra 1 e Angra 2. A autonomia brasileira para a etapa de enriquecimento depende da ampliação da capacidade instalada, que deve considerar a entrada em operação de Angra 3, atualmente em construção, além de outras usinas termonucleares que venham a ser instaladas no Brasil.

Dessa forma, o Brasil não possui uma planta industrial para realizar a etapa de conversão do urânio e a capacidade atual de enriquecimento de urânio não atende à demanda interna; a maior parte do urânio enriquecido para as usinas termonucleares brasileiras depende de importação.

O terceiro objetivo específico é analisar a legislação que condiciona o desenvolvimento de tecnologia nuclear no Brasil. Considerando o progresso das atividades nucleares brasileiras nos últimos anos, a análise permite concluir que o Brasil poderia alcançar um desenvolvimento mais efetivo com a quebra do monopólio estatal sobre os recursos minerais e as atividades nucleares, implicando maior participação da iniciativa privada.

A Constituição Federal de 1988 incorporou parte da Lei N. 1.310/1951 e estabeleceu o monopólio da União sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados. São feitas exceções quanto à comercialização e à utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos médicos, agrícolas e industriais; e à produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida igual ou inferior a duas horas, que podem ser autorizados sob regime de permissão. Para a indústria de combustível nuclear vale o monopólio estatal.

Em sentido relativamente oposto, diferentes atos normativos e documentos condicionantes incentivam o desenvolvimento do setor nuclear brasileiro. A Lei Nº 5.740/1971 registra que a empresa estatal encarregada das atividades nucleares deve promover a assimilação gradual da tecnologia nuclear pela indústria privada nacional. O mesmo é registrado na Lei Nº 6.189/1974, que enuncia que se deve promover a transferência de tecnologia nuclear a empresas industriais de capital nacional.

A Política Nuclear Brasileira tem suas diretrizes consolidadas no Decreto Nº 9.600/2018. Ao todo, essa Política define 31 objetivos. Foi realizada uma avaliação sobre a efetividade desse ordenamento e constatou-se que 16 objetivos são atendidos, 11 são parcialmente atendidos e quatro não são atendidos. Estes últimos se relacionam a garantir autonomia nacional na produção do combustível nuclear e estimular a transferência da tecnologia nuclear para a indústria nacional. Constatou-se uma relação direta entre o monopólio estatal sobre as atividades nucleares brasileira e a dificuldade de atender a esses objetivos.

Existem exemplos de sucesso na quebra de monopólio estatal no Brasil. A CF outorgada em 1967 estabeleceu o monopólio estatal sobre a pesquisa e a lavra de petróleo em território nacional. Tal ordenamento foi quebrado em 1995, permitindo a entrada de empresas privadas no setor de óleo e gás no Brasil. Outro exemplo de sucesso é a quebra do monopólio estatal sobre as telecomunicações, que modernizou esse setor no País ao permitir a atuação de empresas privadas.

O objetivo principal desta pesquisa é formular e comparar modelos de gestão para a indústria nuclear brasileira voltada para a fabricação de combustível nuclear, visando contribuir para que o Brasil seja autônomo no atendimento de suas demandas. A comparação entre os modelos de gestão formulados para a indústria nuclear brasileira indica que as Parcerias Público-Privadas apresentam os melhores benefícios.

O monopólio estatal sobre as atividades nucleares constitui um fator limitante para o desenvolvimento industrial do setor, visto que condiciona os investimentos à disponibilidade e alocação do orçamento público. Dependendo da flexibilização que seja dada ao monopólio, a indústria nuclear brasileira pode ser organizada de diferentes formas, conforme seja permitida uma maior participação da iniciativa privada.

Mantido o monopólio estatal, pode ser criada uma nova empresa pública para realizar as atividades industriais que completam o domínio do ciclo do combustível ou a própria INB poderia ser fortalecida para completar esse domínio.

Com base em critérios que foram pontuados e comparados, a melhor organização industrial, no caso da manutenção do monopólio, se dá com investimentos na INB, de maneira que esta alcance capacidade plena, concretizando a autonomia brasileira

em relação às suas demandas de combustível nuclear. Esse arranjo, porém, contribui pouco para a transferência de tecnologia para a iniciativa privada além de manter a dependência do orçamento da União, o que pode limitar o ritmo de desenvolvimento.

Sendo efetivada a flexibilização do monopólio estatal sobre as atividades nucleares, pode-se permitir a entrada da iniciativa privada com pouco controle estatal ou podem ser realizadas Parcerias Público-Privadas (PPP), sob regime de concessões administrativas. Com base nos mesmos critérios adotados, o melhor modelo, considerando a flexibilização do monopólio estatal, se daria com o estabelecimento de PPP. Esse modelo de concessão transfere tecnologia para a iniciativa privada, contribui para preencher lacunas atuais do domínio industrial do ciclo do combustível nuclear e fortalece a Base Industrial de Defesa. Adicionalmente, as PPP mantêm as atividades sob controle da União, que é uma condição mandatória quando se trata de tecnologia nuclear, que é de desenvolvimento complexo e está sujeita a controles internacionais.

O Brasil tem capacidade de promover avanços internos na área nuclear, como ficou provado ao dominar todas as etapas do ciclo do combustível nuclear e ao implantar e operar a fábrica de elementos combustíveis no País.

Desenvolver tecnologia nuclear própria exige superação constante de desafios. Políticas consistentes, duradouras, apoiadas em planejamento de longo prazo são essenciais.

O fortalecimento da indústria nuclear brasileira traz benefício para os programas estratégicos da Marinha do Brasil na medida em que pode contribuir para desonerar a Força quanto à alocação de recursos humanos e financeiros. Esses recursos são limitados e podem ser direcionados, de forma mais efetiva, aos processos que levam à obtenção do primeiro submarino convencional brasileiro com propulsão nuclear, o SN-BR.

Conforme registrou Euclides da Cunha, “Estamos condenados à civilização. Ou progredimos ou desaparecemos.” (CUNHA, 1902, apud Mariz, 2021, p. 83). Progredir na área nuclear implica investir em pesquisa e desenvolvimento, com a consequente transferência do conhecimento obtido para a indústria nacional. Adotar um modelo de gestão que priorize a busca por autonomia na área nuclear contribui para confirmar a capacidade brasileira de desenvolver tecnologia própria.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRO-ARGENTINA DE CONTABILIDADE E CONTROLE DE MATERIAIS NUCLEARES – ABACC. **Acordo Quadripartite**. 1991. Disponível em: <<https://www.abacc.org.br/wp-content/uploads/2016/09/Acordo-Quadripartite-português.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

ALBUQUERQUE JUNIOR, Bento Costa Lima Leite de. **A propulsão nuclear de submarinos é uma tecnologia dominada por poucos**. Revista Brasil Nuclear. Informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear, Ano 25, n. 49, dez. 2018, p. 8-11. Disponível em: <<https://aben.com.br/download/brasil-nuclear-n-o-49/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

ALVES, Rex Nazaré. **A Política Nuclear Brasileira: Política de Estado à luz da experiência internacional de sucesso**. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 2015, São Paulo. Disponível em: <<https://www.aben.com.br/Arquivos/391/391.pdf>>. Acesso em: 4 jul. 2022.

ANDRADE, I. O., CARPES, M. M. e LEITE, A. W. **O desenvolvimento nuclear no Brasil e na Índia: uma comparação dos programas nacionais desses países**. Revista da Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, v. 23 n. 3, p. 618-656. set./dez. 2017. Disponível em: <<https://revista.egn.mar.mil.br/index.php/revistadaegn/article/view/596>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES – ABDAN. **Definição do Programa Nuclear Brasileiro – Uma Necessidade para o Desenvolvimento do País**. 2014. Disponível em: <<https://www.aben.com.br/Arquivos/291/291.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BARROS, Pedro Silva e PEREIRA, Antonio Philipe de Moura. **O Programa Nuclear Brasileiro**. Boletim de Economia e Política Internacional, Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas – IPEA, n. 3, jul. 2010, p. 71-78. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/4092>>. Acesso em: 22 maio 2022.

BRASIL. Constituição (1891). **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL, 1891**. Rio de Janeiro, 24 fev. 1891. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao91.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL. Constituição (1934). **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL, 1934**. Rio de Janeiro, 16 jul. 1934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao34.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL. Constituição (1937). **CONSTITUIÇÃO DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL, 1937**. Rio de Janeiro, 11 nov. 1937. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao37.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL. Constituição (1946). **CONSTITUIÇÃO DOS ESTADOS UNIDOS DO BRASIL, 1946**. Rio de Janeiro, 19 set. 1946. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao46.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 1.310 de 15 de janeiro de 1951. Cria o Conselho Nacional de Pesquisas, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 29 dez. 1950. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l1310.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 4.118 de 27 de agosto de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 set. 1962. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4118.htm>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (1967). **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1967**. Brasília, 24 jan. 1967. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao67.htm>. Acesso em: 25 jul. 2022.

BRASIL, Congresso Nacional. EMENDA CONSTITUCIONAL Nº 1, DE 17 DE OUTUBRO DE 1969. Edita o novo texto da Constituição Federal de 24 de janeiro de 1967. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 20 nov. 1969. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc_anterior1988/emc01-69.htm>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 5.740, de 1º de dezembro de 1971. Autoriza a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) a constituir a sociedade por ações Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear - C.B.T.N, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 dez. 1971. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1970-1979/lei-5740-1-dezembro-1971-357759-norma-pl.html>>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 6.189 de 16 de dezembro de 1974. Altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, e a Lei nº 5.740, de 1 de dezembro de 1971, que criaram, respectivamente, a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN e a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear – CBTN, que passa a denominar-se Empresas Nucleares Brasileiras Sociedade Anônima – NUCLEBRÁS, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 dez. 1974. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6189.htm>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BRASIL. Constituição (1988). **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 1988**. Brasília, 5 out. 1988(a). Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em 19 fev. 2022.

BRASIL. Presidência da República. Decreto-Lei n. 2.464 de 31 de agosto de 1988. Altera a denominação da Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRÁS, transfere bens de sua propriedade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1º set. 1988(b). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De12464.htm>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 7.781 de 27 de junho de 1989. Dá nova redação aos artigos 2º, 10 e 19 da Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 jun. 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7781.htm>. Acesso em: 11 jun. 2022.

BRASIL, Congresso Nacional. EMENDA CONSTITUCIONAL Nº 9, DE 09 DE NOVEMBRO DE 1995. Dá nova redação ao art. 177 da Constituição Federal, alterando e inserindo parágrafos. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 nov. 1995(a). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc09.htm>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 8.987 de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 fev. 1995(b). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8987compilada.htm>. Acesso em: 11 jun. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 9.478 de 6 ago. 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 ago. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 11.079 de 30 de dezembro de 2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 dez. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l11079.htm>. Acesso em: 19 fev. 2022.

BRASIL. Presidência da República. Decreto-Lei n. 9.600 de 5 de dezembro de 2018. Consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 6 dez. 2018. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9600.htm>. Acesso em: 11 fev. 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio_Final_do_PNE_2050.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 14.222 de 15 de outubro de 2021. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN); altera as Leis n os 4.118, de 27 de agosto de 1962, 6.189, de 16 de dezembro de 1974, 6.453, de 17 de outubro de 1977, 9.765, de 17 de dezembro de 1998, 8.691, de 28 de julho de 1993, e 10.308, de 20 de novembro de 2001; e revoga a Lei nº 13.976, de 7 de janeiro de 2020. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 out. 2021. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.222-de-15-de-outubro-de-2021-352709951>>. Acesso em: 8 jun. 2022.

CABRAL, Anya. **História das usinas nucleoeletricas no Brasil**. UNIFACS – Universidade Salvador. Revista Eletrônica de Energia, v. 1, n.1, p. 58-71, jul./dez. 2011. Disponível em: <<https://revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/view/1639/1440>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

CAUTI, Carlo. **Preço do gás na Europa dispara após redução dos fluxos da Rússia**. Revista Exame Invest. [online], 2022. Disponível em: <<https://exame.com/invest/mercados/preco-gas-europa-dispara-fluxos-russia/>>. Acesso em: 3 ago. 2022.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR – CDTN. **O Projeto RBMN e a sustentabilidade do setor nuclear nacional.** [online]. 2019. Disponível em: <<https://antigo.cdtm.br/ultimas-noticias/121/newsletter/375-o-projeto-rbmn-e-a-sustentabilidade-do-setor-nuclear-nacional3>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **O Que é o RMB – Reator Multipropósito Brasileiro.** [online]. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/rmb/o-que-e-o-rmb-reator-multiproposito-brasileiro>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Quem Somos.** [online], [2022?a]. Disponível em: <<http://antigo.cnen.gov.br/quem-somos>>. Acesso em: 22 maio 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Cronologia da Energia Nuclear no Brasil.** Biblioteca Digital Memória da CNEN. [2022?b]. Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Brasil>>. Acesso em: 22 maio 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Cronologia da Energia Nuclear no Mundo.** Biblioteca Digital Memória da CNEN. [2022?c]. Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Mundo>>. Acesso em: 22 maio 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. Resolução Nº 290, de 3 de março 2022. Renovação da Autorização para Operação Inicial (AOI) do Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI) da Unidade de Enriquecimento de Urânio Almirante Álvaro Alberto (UEAAA), do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), da Marinha do Brasil. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, sec. 1, p. 12, 4 mar. 2022(d). Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/atos-normativos-cnen/comissao_deliberativa/resolucoes/2022/Res_CD_290BS.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. **Produção de Radiofármacos.** Biblioteca Digital Memória da CNEN. 2022e. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/producao-de-radiofarmacos>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO – CNPq. **A Criação.** [online]. [2022?a]. Disponível em: <<https://memoria.cnpq.br/a-criacao>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO – CNPq. **Questão Nuclear.** [online]. [2022?b]. Disponível em: <<https://memoria.cnpq.br/questao-nuclear>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO – CNPq. **Anos 70.** [online]. [2022?c]. Disponível em: <<https://memoria.cnpq.br/anos-70>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

DANTAS, Vera. **Setor vive situação complexa e difícil.** Revista Brasil Nuclear. Informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear, ano 23, n. 48, p. 6-11, 2018. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/589/589.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

DEUTSCHE WELLE BRASIL. **Alemanha debate estender funcionamento de usinas nucleares**. [online], 2022a. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/alemanha-debate-estender-funcionamento-de-usinas-nucleares/a-62675603>>. Acesso em: 23 ago. 2022.

DEUTSCHE WELLE BRASIL. **Parlamento Europeu apoia gás e energia nuclear como "verdes"**. [online], 2022b. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/parlamento-europeu-apoia-classificar-gas-e-energia-nuclear-como-verdes/a-62384903>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

DURAZZO, Michelangelo. **História do Combustível Nuclear no IPEN**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. [201-?]. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=549>. Acesso em: 31 maio 2022.

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO – EBC, Agência Brasil. **Brasil retoma produção de urânio na Bahia**. [online]. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-12/brasil-retoma-da-producao-de-uranio-na-bahia>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Expansão da Geração – Fontes**. [online]. [2022?a]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Fontes de Energia**. [online]. [2022?b]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 11 jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. [online]. [2022?c]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Mudanças climáticas e Transição energética**. [online]. [2022?d]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>>. Acesso em: 11 jul. 2022.

ETZKOWITZ, Henry, ZHOU, Chunyan. **Hélice Tríplice: inovação e empreendedorismo universidade-indústria-governo**. Universidade de São Paulo. Revista Estudos Avançados v. 31 n. 90, p. 23-48, 2017. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/137883>>. Acesso em: 4 ago. 2022.

FERREIRA, Eduardo Bacellar Leal. **A capacitação adquirida com o SN-BR será uma vitória que vai além do setor militar**. REVISTA BRASIL NUCLEAR. Informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear, Ano 25, n. 49, dez. 2018, p. 4-7. Disponível em: <<https://aben.com.br/download/brasil-nuclear-n-o-49/>>. Acesso em: 24 maio 2022.

GABINETE DE SEGURANÇA INSTITUCIONAL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – GSI-PR. **Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro – SIPRON**. [online]. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/gsi/pt-br/assuntos/sipron>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

GONÇALVES, Odair Dias. **Programa Nuclear Brasileiro: Passado, Presente e Futuro**. [online]. 2008. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/475>>. Acesso em: 22 maio 2022.

GRIER, Peter. **In the Shadow of MAD**. US Air Force Magazine, [online], v. 84, n. 11, 2001. Disponível em: <<https://www.airforcemag.com/article/1101mad/>>. Acesso em: 30 jul. 2022.

GROTTI, Dinorá Adelaide Musetti. **Evolução da teoria do serviço público**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Enciclopédia Jurídica da PUCSP. Tomo: Direito Administrativo e Constitucional. 1. ed. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://enciclopediajuridica.pucsp.br/verbete/40/edicao-1/evolucao-da-teoria-do-servico-publico>>. Acesso em: 4 ago. 2022.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. **O programa nuclear brasileiro: uma história oral**. FGV CPDOC. Editora Fundação Getúlio Vargas, 2014a, p. 118-126. Entrevista concedida a Marly Motta, Tatiana Coutto e Lucas Nascimento em sessão realizada no Rio de Janeiro no dia 08 de fevereiro de 2010. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/13733>>. Acesso em 22 maio 2022.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. **Regime internacional de não-proliferação nuclear: o caso especial do Brasil e Argentina**. [2014b]. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/271/271.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. **Lições aprendidas para a retomada do Programa Nuclear Brasileiro**. Marinha do Brasil. Revista Marítima Brasileira, v. 138, n. 07/09, jul./set. 2018. Disponível em: <<http://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/revistamaritima/article/view/229>>. Acesso em: 06 jul. 2022.

HEIDER, Mathias. **Urânio**. In: Departamento Nacional de Produção Mineral. Economia mineral do Brasil. Brasília-DF: DNPM, 2009. p. 70-91. Disponível em: <http://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-3-uranio>. Acesso em: 17 fev. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Estatuto Social Consolidado – 42ª Assembleia Geral Extraordinária – 27/04/2022**. [Rio de Janeiro]. 2022a. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Portals/0/DocumentosOficiais/estatuto_social.pdf>. Acesso em: 2 jun.2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Nossa História – Linha do Tempo**. [online]. [2022?b]. Disponível em: <<http://memoria.inb.gov.br/Nossa-Historia/Linha-do-Tempo>>. Acesso em 1 jul. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Nossas Atividades**. [online]. [2022?c]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Mineração**. [online]. [2022?d]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Mineracao>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Produção**. [online]. [2022?e]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Urânio/Produção>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Quais são os entraves ao enriquecimento do urânio no país?**. [online]. [2022?f]. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/quais-sao-os-entraves-ao-enriquecimento-do-uranio-no-pais?Origem=1102>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Recursos**. [online]. [2022?g]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Urânio/Recursos>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Reconversão**. [online]. [2022?h]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Reconversao>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Montagem do Elemento Combustível**. [online]. [2022?i]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Montagem-do-Elemento-Combustivel>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Conversão**. [online]. [2022?j]. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Conversao>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Enriquecimento**. [online]. [2022?k]. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Enriquecimento>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. **Ciclo do combustível nuclear**. [online]. [2022?l]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>>. Acesso em: 28 mar. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN. **Organização do IPEN**. [online]. [2022?a]. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=6>. Acesso em: 12 ago. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN. **Produção de Radiofármacos**. [online]. [2022?b]. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/producao-de-radiofarmacos>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN. **Áreas de pesquisa**. [online]. [2022?c]. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/portal/produtos_home.php?secao_id=748>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons - INFCIRC/140**. 1970. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/treaty-non-proliferation-nuclear-weapons>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Nuclear – Fuels & Technologies**. [online]. 2022a. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Nuclear Power in a Clean Energy System**. [online]. 2022b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

KRISTENSEN, Hans M., e KORDA, Matt. **World nuclear forces**. SIPRI Yearbook 2022: Armaments, Disarmament and International Security. Solna, Suécia, Cap. 10, p. 342-423, 2022. Disponível em: <https://sipri.org/sites/default/files/YB22_10_World_Nuclear_Forces.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2022..

KURAMOTO, Renato Yoichi Ribeiro e APPOLONI, Carlos Roberto. **Uma breve história da política nuclear brasileira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Caderno Brasileiro de

Ensino de Física, v. 19, n.3: p.379-392, dez. 2002. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6612>>. Acesso em: 22 maio 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Política Naval**. Brasília: Estado-Maior da Armada, 2020a. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sites/all/modules/politica_naval/book.html>. Acesso em 22 fev. 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Plano Estratégico da Marinha (PEM 2040)**. Brasília, 2020b. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/pem2040>>. Acesso em 19 fev. 2022.

MARINHA DO BRASIL. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. **Termo Aditivo ao Contrato 42000/2012-063/00**. São Paulo, 2020c. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ctmsp/sites/www.marinha.mil.br.ctmsp/files/contratos/42000-2012-063-08_atech.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2022.

MARINHA DO BRASIL. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. **Programa Nuclear da Marinha**. [online]. [2022?a]. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ctmsp/programa-nuclear-da-marinha>>. Acesso em: 24 maio 2022.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha. **Nosso Patrono**. [online]. [2022?b]. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dgdntm/node/71>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB)**. [online]. [2022?c]. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub>>. Acesso em: 24 maio 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Programa de Submarinos – Transferência de Tecnologia**. [online]. [2022?d]. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/prosub/transferencia-nuclear>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

MARIZ, Carlos Henrique. **A Retomada da expansão nuclear: uma grande oportunidade para o desenvolvimento do Brasil**. In: ENERGIA NORDESTE, 2. ed., 2021. [online]. Disponível em: <<https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/05/ENERGIA-NUCLEAR-CARLOS-MARIZ.pdf>>. Acesso em: 4 jul. 2022.

MIELNIK, Otavio. **Modelos de Negócio para um novo Programa Nuclear**. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 2015, São Paulo. Disponível em: <<https://www.aben.com.br/Arquivos/383/383.pdf>>. Acesso em: 5 jul. 2022.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN) – 2012**. Brasília: Ministério da Defesa, 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/2012/mes07/lbdn.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN) – 2020**. Brasília: Ministério da Defesa, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado_e_defesa/livro_branco/Versaodolivroemporgues2020.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2022.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Política Nacional de Defesa e Estratégia Nacional de Defesa – 2020**. Brasília: Ministério da Defesa, 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br>>

br /assuntos/copy_of_estado-e-defesa/estrategia-nacional-de-defesa>. Acesso em: 19 fev. 2022.

MOTTER, Andressa. **11 utilidades da energia nuclear**. Revista Arco – Jornalismo Científico e Cultural. 2018. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/midias/arco/11-utilidades-da-energia-nuclear/>>. Acesso em: 02 ago. 2022.

MOURA, Jorge Costa. **Conflito entre normas constitucionais: monopólio do minério nuclear e a função social da propriedade no Brasil**. 2014. TCC (Bacharelado em Direito). Universidade Santa Úrsula – Escola de Direito, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/062/46062689.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

NAÇÕES UNIDAS. **COP21 – perguntas frequentes**. [online]. [2015?]. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2015/10/COP21-FAQ-Portuguese.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

NAÇÕES UNIDAS. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. [online]. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

NETO, Jose Giron Sobrinho. **Estudo sobre o alcance social do Programa Nuclear da Marinha (PNM)**. Tese (TCC) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2021.

NUCLEBRÁS EQUIPAMENTOS PESADOS – NUCLEP. **Sobre a NUCLEP**. [online]. [2022?]. Disponível em: <<https://www.nuclep.gov.br/pt-br/institucional/sobre-a-nuclep>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

SANTOS, Tomé Sudário Gomes Ferraz. **A política nuclear brasileira até 1964**. 2007. Dissertação (Mestrado em história da Ciência). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <[https://sapientia.pucsp.br/bitstream/handle/13371/1/Tome Sudario Gomes Ferraz dos Santos.pdf](https://sapientia.pucsp.br/bitstream/handle/13371/1/Tome%20Sudario%20Gomes%20Ferraz%20dos%20Santos.pdf)>. Acesso em: 23 jul. 2022.

SILVA, Othon Luiz Pinheiro. **O programa nuclear brasileiro: uma história oral**. FGV CPDOC. Editora Fundação Getúlio Vargas, 2014, p. 154-171. Entrevista concedida a Marly Motta, Matias Spektor, Tatiana Coutto e Lucas Nascimento em duas sessões realizadas no Rio de Janeiro nos dias 13 de outubro e 15 de dezembro de 2010. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/13733>>. Acesso em 22 maio 2022.

TAKAHASHI, L. C., TAVEIRA, N. F. e CORREA, B. B. G. **Divulgação de tecnologias nucleares para a sociedade**. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e19010414000, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14000>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

TAVARES, Odilon A. P. **Fissão nuclear: energia farta disponível para a humanidade**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI. Revista Ciência e Sociedade v. 3, n. 2, p. 1-34, 2015. Disponível em: <<http://revistas.cbpf.br/index.php/CS/article/view/122/94>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

VIEIRA DE JESUS, Diego Santos. **Autonomia Pela Contradição: as políticas externa e nuclear de Vargas e JK**. Revista Política Hoje, v. 20, n. 2, p. 829-853, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3805/3109>>. Acesso em: 23 jul. 2022.

WEILAND, Cristhofer. **As consequências da busca norte-americana pela primazia nuclear**. Universidade Federal do Paraná. Revista Conjuntura Global, v. 3, n. 3, jul./set. 2014, p. 125-131. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/conjglobal/article/view/39693/24389>>. Acesso em: 30 jul. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Uranium Enrichment**. [online]. Reino Unido, 2020. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Nuclear Fuel Cycle Overview**. [online]. Reino Unido, 2021a. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Nuclear Proliferation Safeguards**. [online]. Reino Unido, 2021b. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/non-proliferation/safeguards-to-prevent-nuclear-proliferation.aspx>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **World Energy Needs and Nuclear Power**. [online]. Reino Unido, 2021c. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/world-energy-needs-and-nuclear-power.aspx>>. Acesso em 16 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Conversion and Deconversion**. [online]. Reino Unido, 2022a. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion.aspx>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Supply of Uranium**. [online]. Reino Unido, 2022b. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Uranium Production Figures, 2011-2020**. [online]. Reino Unido, 2022c. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements**. [online] Reino Unido, 2022d. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA. **Who we are**. [online]. Reino Unido, 2022e. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/our-association/who-we-are.aspx>>. Acesso em: 28 abr. 2022.