

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC VITOR ROMERO TEIXEIRA DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO DA MARINHA DO BRASIL PARA O
DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO NA ÁREA
NUCLEAR: Uma abordagem de Hélice Tríplice**

Rio de Janeiro

2024

CC VITOR ROMERO TEIXEIRA DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO DA MARINHA DO BRASIL PARA O
DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO NA ÁREA
NUCLEAR: Uma abordagem de Hélice Tríplice**

Dissertação apresentada à Escola de Guerra Naval, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Estado-Maior para Oficiais Superiores.

Orientador: CMG (RM1-FN) Henrique Santos

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2024

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa Caroline e à minha filha Isabela, que têm suportado minha ausência com paciência e compreensão. Seu amor e apoio foram essenciais para que eu pudesse concluir esta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Caroline e à minha filha Isabela, por sua paciência e compreensão durante os momentos em que estive ausente, mesmo quando estava próximo. Suas palavras de encorajamento foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente.

Aos meus amigos e colegas da Turma C-EMOS 2024, pelo companheirismo, apoio mútuo e pelas valiosas trocas de conhecimento e experiências que enriqueceram esta trajetória.

Ao CMG (RM1-FN) Henrique Santos, pela compreensão e pela orientação prestada.

Aos instrutores da Escola de Guerra Naval, pela dedicação e pelos ensinamentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho, mesmo quando muitos poderiam estar desfrutando do merecido descanso em seus lares.

O grande problema da humanidade não está no domínio da Ciência, mas no domínio dos corações e das mentes humanas.

(Albert Einstein)

RESUMO

O objeto de pesquisa desta dissertação é a contribuição da Marinha do Brasil para o desenvolvimento científico e tecnológico na área nuclear, utilizando a Teoria da Hélice Tríplice como base teórica. Partindo da hipótese de que as pesquisas científicas nucleares realizadas pela MB e suas parcerias com instituições nacionais têm um impacto significativo no progresso tecnológico do Brasil no século 21, traçou-se como objetivo principal a análise dessa contribuição. Como objetivos específicos, buscou-se: explorar as diretrizes legais e estratégicas que orientam o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil; examinar as diversas aplicações benéficas da energia nuclear; e investigar a origem e evolução do Programa Nuclear da Marinha, destacando suas parcerias estratégicas e apoio à pesquisa. A pesquisa demonstrou que a MB tem sido fundamental no avanço das tecnologias nucleares, trabalhando em estreita colaboração com universidades e indústrias para alcançar avanços significativos. Essas parcerias não só fortalecem a capacidade de defesa nacional, mas também promovem inovações que beneficiam a sociedade civil. A análise evidenciou a importância da sinergia entre governo, academia e indústria, conforme proposto pela Teoria da Hélice Tríplice, para alcançar autonomia tecnológica e progresso sustentável. A conclusão reafirma o papel crucial da MB no desenvolvimento nacional, demonstrando que, ao alavancar suas capacidades institucionais e fomentar a cooperação trilateral, é possível alcançar resultados transformadores que impulsionam o progresso e a inovação.

Palavras-chave: Marinha do Brasil. Programa Nuclear da Marinha. Hélice Tríplice. Energia Nuclear.

ABSTRACT

Contribution of the Brazilian Navy to Scientific and Technological Development in the Nuclear Area: A Triple Helix Approach

The research object of this dissertation is the contribution of the Brazilian Navy to scientific and technological development in the nuclear area, using the Triple Helix Theory as a theoretical basis. Starting from the hypothesis that the nuclear scientific research conducted by the MB and its partnerships with national institutions have a significant impact on Brazil's technological progress in the 21st century, the main objective was to analyze this contribution. The specific objectives were to explore the legal and strategic guidelines that direct the development of nuclear energy in Brazil; examine the various benign applications of nuclear energy; and investigate the origin and evolution of the Brazilian Navy's Nuclear Program, highlighting its strategic partnerships and research support. The research demonstrated that the MB has been fundamental in advancing nuclear technologies, working closely with universities and industries to achieve significant advancements. These partnerships not only strengthen national defense capabilities but also promote innovations that benefit civil society. The analysis highlighted the importance of synergy between government, academia, and industry, as proposed by the Triple Helix Theory, to achieve technological autonomy and sustainable progress. The conclusion reaffirms the crucial role of the MB in national development, demonstrating that by leveraging its institutional capabilities and fostering trilateral cooperation, it is possible to achieve transformative results that drive progress and innovation.

Keywords: Brazilian Navy. Brazilian Navy's Nuclear Program. Triple Helix. Nuclear Energy.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AED	-	Ações Estratégicas de Defesa
AIEA	-	Agência Internacional de Energia Atômica
AMAZUL	-	Amazônia Azul Tecnologia de Defesa S.A.
ANM	-	Associação Nuclear Mundial
Anvisa	-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BID	-	Base Industrial de Defesa
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEA	-	Centro Experimental de Aramar
CIANA	-	Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar
CIESP	-	Centro das Indústrias do Estado de São Paulo
CNEN	-	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	-	Conselho Nacional de Pesquisa
CNPEM	-	Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
COGESN	-	Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento do Submarino com Propulsão Nuclear
COPESP	-	Coordenadoria para Projetos Especiais
CT&I	-	Ciência, Tecnologia e Inovação
CTMSP	-	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
DDNM	-	Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha
DGDNTM	-	Diretoria-Geral de desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha
ED	-	Estratégia de Defesa
EDM	-	Estratégia de Defesa Marítima
END	-	Estratégia Nacional de Defesa
EUA	-	Estados Unidos da América
FAO	-	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
Fiocruz	-	Fundação Oswaldo Cruz
FCN	-	Fábrica de Combustível Nuclear
FDM	-	Fundamentos Doutrinários da Marinha
FPN	-	Frente Parlamentar Mista da Tecnologia e Atividades Nucleares
IMT	-	Instituto Mauá de Tecnologia
INB	-	Indústrias Nucleares do Brasil

IPEN	-	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LABGENE	-	Laboratório de Geração Nucleoelétrica
MB	-	Marinha do Brasil
NUCLEN	-	Nuclebrás Engenharia
NUCLEP	-	Nuclebrás Equipamentos Pesados
OBE	-	Objetivos Estratégicos da Marinha
ODS	-	Órgão de Direção Setorial
OMS	-	Organização Mundial de Saúde
OND	-	Objetivos Nacionais de Defesa
ONU	-	Organização das Nações Unidas
P&D	-	Pesquisa e Desenvolvimento
PDN	-	Política de Defesa Nacional
PET	-	Tomografia por Emissão de Pósitrons
PN	-	Política Naval
PNB	-	Programa Nuclear Brasileiro
PND	-	Política Nacional de Defesa
PNM	-	Programa Nuclear da Marinha
PROSUB	-	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
RMB	-	Reator Multipropósito Brasileiro
SecCTM	-	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha
SPECT	-	Tomografia Computadorizada por Emissão de Fóton Único
TC	-	Tomografia Computadorizada
UFRJ	-	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Unicamp	-	Universidade Estadual de Campinas
UnB	-	Universidade de Brasília
USP	-	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	FUNDAMENTOS LEGAIS E TEÓRICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL.....	13
2.1	DIRETRIZES LEGAIS E ESTRATÉGICAS.....	13
2.2	TEORIA DA HÉLICE TRÍPLICE.....	19
3	APLICAÇÕES BENIGNAS DA ENERGIA NUCLEAR.....	24
3.1	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	24
3.2	APLICAÇÃO NA MEDICINA.....	27
3.3	APLICAÇÃO NA AGRICULTURA E NO CONTROLE DE ALIMENTOS..	29
3.4	APLICAÇÕES INDUSTRIAIS.....	31
3.5	OUTRAS APLICAÇÕES.....	33
4	PROGRAMA NUCLEAR DA MARINHA: ORIGEM, PARCERIAS E APOIO À PESQUISA.....	35
4.1	ORIGEM E EVOLUÇÃO DO PNM.....	36
4.2	PARCERIAS E APOIO À PESQUISA.....	41
5	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, marcado por desafios globais complexos, a Marinha do Brasil destaca-se não apenas pelas suas funções tradicionais de defesa e proteção da soberania nacional, mas também como uma entidade proeminente no avanço do desenvolvimento científico e tecnológico do país. Transcendendo as expectativas convencionais de uma força militar, a Marinha tem se engajado em uma série de atividades que incluem a ciência e tecnologia, visando contribuir para o progresso tecnológico e inovação no Brasil.

Este estudo se concentra no impacto das atividades da Marinha do Brasil no desenvolvimento científico e tecnológico do país, com especial atenção ao setor de energia nuclear. A energia nuclear, com seu vasto potencial transformador, desempenha um papel crucial em diversos setores, desde a geração de energia elétrica até aplicações médicas e agrícolas. Discutir as capacidades da Marinha, especialmente através do Programa Nuclear da Marinha (PNM) e suas parcerias com a indústria e a academia, permite demonstrar como iniciativas militares podem catalisar inovações tecnológicas e avanços científicos que beneficiam a sociedade como um todo.

O objeto desta pesquisa é explicar a contribuição da Marinha do Brasil no desenvolvimento científico e tecnológico do país, com um enfoque especial no Programa Nuclear, suas parcerias estratégicas e seus impactos no século 21. A hipótese a ser testada é que as pesquisas científicas na área nuclear, realizadas pela Marinha do Brasil e suas parcerias com instituições nacionais, têm contribuído de forma significativa para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil. Este estudo busca entender a extensão e o impacto das pesquisas em energia nuclear, das colaborações com instituições científicas e do fortalecimento da infraestrutura científica e tecnológica do Brasil, considerando a Teoria da Hélice Tríplice. Esta teoria, desenvolvida por Henry Etzkowitz e Loet Leydesdorff, enfatiza a colaboração interdependente entre a academia, o governo e a indústria para promover a inovação tecnológica e o desenvolvimento econômico sustentável.

Neste contexto, o estudo explora as diretrizes legais e estratégicas que orientam o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil, examina as diversas aplicações benignas da energia nuclear, tais como na produção de energia elétrica, na medicina, na agricultura e na indústria, e investiga a origem e evolução do

Programa Nuclear da Marinha, destacando suas parcerias estratégicas e apoio à pesquisa. A relevância deste estudo reside na necessidade de destacar o papel da Marinha como facilitadora da colaboração interinstitucional e promotora da integração entre os setores de defesa e civil. O desenvolvimento de tecnologias de uso dual, que beneficiam tanto a segurança nacional quanto o progresso econômico e social, é uma das grandes contribuições da Marinha ao país.

Este trabalho adota uma metodologia de estudo de caso, concentrando-se especificamente nas contribuições das atividades nucleares da Marinha do Brasil ao desenvolvimento científico e tecnológico do país no século 21.

A pesquisa está estruturada em uma introdução, três capítulos de análise e uma conclusão. No capítulo 2, serão examinados os fundamentos teóricos que permitirão a compreensão da pesquisa, incluindo as diretrizes legais e estratégicas para o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil e a Teoria da Hélice Tríplice.

No capítulo 3, serão exploradas as aplicações benignas da energia nuclear, destacando sua utilização na produção de energia elétrica, na medicina, na agricultura, na indústria e em outras áreas.

No capítulo 4, analisar-se-á a origem, as parcerias e o apoio à pesquisa do Programa Nuclear da Marinha, detalhando as contribuições científicas e tecnológicas alcançadas e a capacidade dual do programa.

Dessa forma, na próxima seção serão examinados os fundamentos teóricos sobre o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil.

2 FUNDAMENTOS LEGAIS E TEÓRICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

O presente capítulo versará sobre as bases legais e teóricas que fundamentam a participação da Marinha do Brasil (MB) no desenvolvimento nuclear do país. Em seguida, será explorada a teoria da Hélice Tríplice, desenvolvida por Henry Etzkowitz e Loet Leydesdorff, que enfatiza a interação entre governo, academia e indústria como motor de inovação e desenvolvimento tecnológico.

2.1 DIRETRIZES LEGAIS E ESTRATÉGICAS

Inicialmente, é fundamental posicionar o Poder Naval dentro das capacidades da Nação.

O Poder Nacional é a capacidade da Nação para alcançar e manter os Objetivos Nacionais, manifestando-se em cinco expressões: política, econômica, psicossocial, militar e científico-tecnológica. Esses Objetivos Nacionais decorrem da identificação de necessidades, interesses e aspirações ao longo da evolução histórico-cultural. Os Poderes Marítimo, Terrestre e Aeroespacial são projeções do Poder Nacional (Brasil, 2023a).

A expressão militar do Poder Nacional é a manifestação, de natureza predominantemente militar, do conjunto das pessoas e dos meios de que a Nação dispõe, atuando conforme a vontade nacional e sob a direção do Estado. Os componentes dessa expressão militar são o Poder Naval, o Poder Militar Terrestre e o Poder Militar Aeroespacial (Brasil, 2023a).

O Poder Marítimo representa a manifestação do Poder Nacional através da utilização integrada dos recursos do país para explorar o mar e as águas interiores. Essa utilização pode servir tanto como uma ferramenta de ação política e militar quanto como um meio para o desenvolvimento econômico e social, com o objetivo de atingir e sustentar os Objetivos Nacionais. Os elementos que constituem o Poder Marítimo incluem componentes das diversas expressões do Poder Nacional que se relacionam com a capacidade de aproveitamento do mar e das águas interiores. (Brasil, 2023a).

O Poder Naval, por sua vez, é um componente da expressão militar do Poder Nacional e integrante do Poder Marítimo. Seu objetivo é contribuir para a conquista e manutenção dos Objetivos Militares e Setoriais de Defesa, conforme os Objetivos Nacionais de Defesa (OND) estabelecidos na Política Nacional de Defesa (PND) e nas diretrizes da Estratégia Nacional de Defesa (END) (Brasil, 2023a). Países com longas costas marítimas, redes fluviais significativas e concentração demográfica e econômica próxima às regiões costeiras dependem da navegação marítima e fluvial como elementos essenciais para o desenvolvimento econômico (Brasil, 2023a).

Para estabelecer a relação entre o esperado do Poder Naval no desenvolvimento científico-tecnológico e as orientações políticas, serão analisadas as diretrizes legais e estratégicas. Começando pela Lei Complementar nº 97, seguida pela PND e END. Ao final será possível observar como a Política Naval (PN) e a Estratégia de Defesa Marítima (EDM) orientam o Poder Naval em função das aspirações nacionais. Essas diretrizes delineiam os objetivos e estratégias que visam garantir a soberania e a autonomia tecnológica do Brasil, especialmente na promoção da inovação e na capacitação da Base Industrial de Defesa¹ (BID).

A Lei Complementar nº 97, de 9 de junho de 1999, estabelece em seu artigo 14 que o preparo das Forças Armadas é orientado pela “procura da autonomia nacional crescente, mediante contínua nacionalização de seus meios, nela incluídas pesquisa e desenvolvimento e o fortalecimento da indústria nacional” (Brasil, 1999). Essa orientação legal foi fundamental para integrar a pesquisa e o desenvolvimento (P&D) como elementos centrais na estratégia de defesa do Brasil, reconhecendo a necessidade de uma base tecnológica autônoma e robusta.

O Brasil prioriza a paz e promover o diálogo e as negociações como meio de resolver controvérsias entre os Estados. Essa postura é evidenciada por eventos históricos que sustentam o posicionamento do país nas relações internacionais (Brasil, 2020a). Como ocorreu nas tratativas com a Bolívia, pelo território do Acre, que

¹ Denomina-se Base Industrial de Defesa (BID) o conjunto das empresas estatais ou privadas que participam de uma ou mais etapas de pesquisa, desenvolvimento, produção, distribuição e manutenção de produtos estratégicos de defesa – bens e serviços que, por suas peculiaridades, possam contribuir para a consecução de objetivos relacionados à segurança ou à defesa do país (Brasil, 2014).

culminaram no Tratado de Petrópolis² e na disputa pelo território de Palmas³, com a Argentina, que também foi encerrada de forma pacífica, por meio de soluções diplomáticas.

No entanto, é crucial que o Brasil mantenha constante atenção à sua defesa, devido à instabilidade persistente nas relações internacionais e ao surgimento de novas ameaças globais (Brasil, 2020a).

Com esse objetivo, foi aprovada, em 1996⁴, a Política de Defesa Nacional (PDN), que se configurou como a “primeira iniciativa para orientar os esforços de toda a sociedade brasileira no sentido de reunir capacidades em nível nacional, a fim de desenvolver as condições para garantir a soberania do país, sua integridade e a consecução dos objetivos nacionais” (Brasil, 2020^a, p. 7). A PND (nome PDN alterado após a revisão ocorrida em 2012) estabelece os pressupostos básicos do país em relação à sua defesa e define os OND. Entre esses objetivos, destaca-se a “promoção da autonomia tecnológica e produtiva na área de defesa, o que significa manter e estimular a pesquisa e buscar o desenvolvimento de tecnologias autóctones, sobretudo as mais críticas”, assim como a troca de conhecimentos com outras nações que possuem expertise relevante para o Brasil. Além disso, a PND destaca a importância da capacitação de recursos humanos, o fortalecimento da BID e o desenvolvimento de produtos com dupla finalidade (civil e militar), bem como a criação de empregos e renda. (Brasil, 2020a).

Além disso, ao analisar o ambiente internacional, a PND conclui que:

Os países que investem em inovação e produzem tecnologias disruptivas **aumentarão o seu nível de desenvolvimento e bem-estar da população**, enquanto aqueles que absorvem tecnologias sem investir em seu próprio processo de conhecimento e na modernização autóctone de suas capacidades produtivas seguirão exercendo papel secundário no cenário mundial, sem agregar benefícios às suas populações (Brasil, 2020a, p. 18, grifo nosso).

² Tratado firmado entre a Bolívia e o Brasil, em 17 de novembro de 1903, onde se tornou oficial a anexação do atual estado do Acre ao território brasileiro. Promulgado pelo Decreto nº 5.161, de 10 de março de 1904 (Brasil, 1904).

³ A Questão de Palmas foi um contencioso fronteiriço entre Brasil e Argentina, ocorrido no final do século 19. Estava em disputa um território envolvendo, do lado brasileiro, a região Oeste dos estados de Santa Catarina e do Paraná e do lado argentino, a Província de Misiones. A Questão de Palmas só veio a ser resolvida através do arbitramento internacional conduzido pelo Presidente dos Estados Unidos, Grover Cleveland, em 1895 (Heinsfeld, 2007).

⁴ Por meio da Lei complementar nº 97, de 9 de junho de 1999, estabeleceu-se a atualização a cada 4 anos (Brasil, 1999).

Assim, a defesa do país está intrinsecamente ligada ao seu desenvolvimento, pois se baseia nas capacidades existentes e, simultaneamente, promove o uso e a conservação dos potenciais nacionais, além de melhorar todos os recursos disponíveis para o Estado brasileiro (Brasil, 2020a).

Com base na análise das condições que impactam a defesa nacional, a PND procura alinhar as iniciativas de todas as expressões do poder nacional envolvidas no tema, com o objetivo de maximizar suas potencialidades e capacidades. Dentre os princípios da defesa nacional, destaca-se a ênfase nos investimentos em saúde, educação, ciência, tecnologia e inovação, direcionados a produtos de defesa de uso militar e dual, com o intuito de fortalecer a BID e garantir a autonomia tecnológica do país (Brasil, 2020a).

Estabelecidos os OND por meio da PND, depara-se com a END que, por sua vez, “orienta os segmentos do Estado brasileiro quanto às medidas que devem ser implementadas para que esses objetivos sejam alcançados” (Brasil, 2020b, p. 31)). Fundamentada na PND, a END estabelece de maneira clara e objetiva as estratégias que orientarão a sociedade brasileira nas ações de defesa nacional. Ela aborda os fundamentos que devem sustentar a defesa do país e detalha as articulações a serem realizadas entre todas as instâncias dos três poderes, além da interação entre os diferentes níveis de comando e os setores não governamentais do país (Brasil, 2020b).

Ao tratar das concepções estratégicas, a END estabelece que:

Os setores governamental e industrial e o meio acadêmico, voltados para a ciência, tecnologia e inovação (CT&I), devem ser priorizados e integrados de modo a contribuir para assegurar que o atendimento às necessidades de produtos de defesa seja apoiado em **tecnologias críticas** sob domínio nacional (Brasil, 2020b, p. 34, grifo nosso).

Essas tecnologias, que são essenciais para atingir objetivos estratégicos, requerem um elevado nível de conhecimento científico e raramente são compartilhadas por outros países. Elas são desenvolvidas através do incentivo e apoio ao setor industrial e ao meio acadêmico, de maneira integrada. A capacitação da BID, especialmente no domínio de tecnologias de uso dual, é crucial para garantir o fornecimento de produtos de defesa e alcançar a independência tecnológica nacional. O avanço tecnológico da BID estará intimamente ligado ao aumento da colaboração

com instituições de CT&I e à incorporação de conhecimentos de países com reconhecida expertise tecnológica (Brasil, 2020b).

Em se tratando dos setores estratégicos, a END destaca que o Brasil é um dos países mais participativo nas discussões sobre a não proliferação de armas atômicas. “Sem renunciar ao domínio da tecnologia nuclear, optou por empregá-la para fins pacíficos, decisão consubstanciada no texto constitucional⁵ e referendada pela adesão do país ao Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares⁶”. Dessa forma, o objetivo é melhorar o desenvolvimento da tecnologia nuclear, além de avançar nas tecnologias e capacitações nacionais para habilitar o país a projetar e construir reatores de pesquisa, reatores de teste e usinas termelétricas nucleares. Isso pode ser realizado através de parcerias com outros países ou empresas estrangeiras, visando assegurar a segurança energética e diversificar a matriz energética nacional. Além disso, busca-se ampliar a capacidade de utilização da energia nuclear em um amplo espectro de atividades pacíficas, também por meio de parcerias (Brasil, 2020b).

Alinhada aos objetivos e diretrizes da PND e da END, a PN direciona o planejamento estratégico da MB. Essa política impõe a disponibilidade de forças navais aptas a atuar conforme a importância política, estratégica e econômica do Brasil no cenário internacional. Entre os Objetivos Navais, destaca-se a cooperação com o desenvolvimento nacional, onde a MB tem um papel crucial na promoção do desenvolvimento tecnológico tão importante à indústria brasileira (Brasil, 2019). A Marinha dedica-se a investir e promover o desenvolvimento de tecnologias de uso dual, desempenhando um papel crucial no progresso nacional. Ao dominar tecnologias essenciais do ciclo do combustível e na construção de reatores nucleares, a Marinha assegura que essas instalações atendam rigorosos critérios de qualidade para garantir a segurança nuclear. Este esforço tecnológico não apenas fortalece a segurança do país, mas também possui um imenso potencial para impulsionar o setor industrial nacional. (Brasil, 2019).

Ao integrar as análises estratégicas dos desafios (ameaças e oportunidades) tem-se o conceito estratégico, que é a essência da EDM. Esse conceito facilita a criação de diretrizes estratégicas específicas para a preparação e emprego do Poder

⁵ Alínea a), do Inciso XXIII, do Art. 21 da Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988.

⁶ Promulgado pelo Decreto nº 2.864, de 7 de Dezembro de 1998.

Naval. Com isso, é possível definir os recursos necessários para alcançar os objetivos estratégicos, superando os desafios identificados. Com base nessas diretrizes, serão determinados os objetivos e as diretrizes de gestão que guiarão as ações necessárias para a concepção da Força (Brasil, 2023b).

Os Objetivos Estratégicos da Marinha (OBE) são amplos direcionamentos que guiam a MB no cumprimento de sua missão. Eles resultam de uma análise profunda dos documentos condicionantes do mais alto nível político-estratégico, e abrangem todos os campos de atuação do Poder Naval: Defesa Naval, Segurança Marítima, Diplomacia Naval e Apoio às Ações do Estado (Brasil, 2023b). Tendo em vista o que interessa para essa análise, cabe destacar o OBE 8, que é desenvolver o setor estratégico nuclear de defesa:

De acordo com a Estratégia Nacional de Defesa (END), a **MB é responsável pelo desenvolvimento da tecnologia nuclear para fins pacíficos**, no âmbito da Defesa. Assim, este OBE privilegia os projetos e investimentos para o desenvolvimento e operação do submarino convencionalmente armado com propulsão nuclear (SCPN) e das **tecnologias e capacitações nacionais que qualifiquem o País para a utilização da energia nuclear para fins pacíficos** (Brasil, 2023b, p. 59, grifo nosso).

O Brasil orienta e prioriza suas iniciativas na área de defesa no seu nível mais amplo, segundo as Estratégias de Defesa (ED), em consonância com os OND estabelecidos na PND. Complementarmente, a cada ED são estabelecidas Ações Estratégicas de Defesa (AED), que visam orientar as medidas que deverão ser implementadas no sentido da consecução dos OND (Brasil, 2020b). Entre as diversas ED, destaca-se a "ED-9 Fortalecimento da Área de Ciência e Tecnologia de Defesa", que, por meio da "AED-50", orienta que se deve "aprimorar o modelo de integração da tríade Governo / Academia / Empresa" (Brasil, 2020b).

Conclui-se que as diretrizes legais e estratégicas estabelecidas pelo Brasil são fundamentais para posicionar o Poder Naval dentro das capacidades nacionais e promover a autonomia tecnológica do país. As PND delineiam claramente os objetivos de soberania e inovação tecnológica, enfatizando a integração entre governo, academia e indústria. Essas diretrizes não apenas orientam a defesa do país, mas também incentivam o desenvolvimento econômico e social através da promoção de tecnologias autóctones e da capacitação da BID. A Lei Complementar nº 97 e as estratégias contidas na END reforçam a importância da pesquisa e desenvolvimento

contínuos, visando fortalecer a indústria nacional e garantir a independência tecnológica em setores críticos. Dessa forma, o Brasil se posiciona estrategicamente no cenário global, ao mesmo tempo em que assegura o desenvolvimento sustentável e a defesa de seus interesses nacionais.

Tais orientações serão o ponto de partida para que se possa identificar a teoria que aponta as possibilidades sinérgicas dessa citada integração. O próximo subcapítulo tratará da Hélice Tríplice, um modelo de inovação que destaca a interação entre governo, academia e indústria, particularmente relevante neste contexto, pois proporciona uma estrutura teórica para entender o desenvolvimento científico e tecnológico no Brasil, especialmente no campo da energia nuclear.

2.2 TEORIA DA HÉLICE TRÍPLICE

A teoria da Hélice Tríplice, desenvolvida por Henry Etzkowitz e Loet Leydesdorff, na década de 1990, destaca a importância da interação entre governo, academia e indústria para o avanço tecnológico e a inovação. A abordagem integrada proposta por essa estrutura é particularmente relevante para o PNM, onde a colaboração entre essas esferas é fundamental para o sucesso dos projetos.

Essa teoria sugere que o avanço tecnológico e a inovação dependem da sinergia e cooperação entre três esferas principais: o governo, que formula políticas e fornece financiamento; a academia, que gera conhecimento e realiza pesquisas; e a indústria, que aplica esse conhecimento em produtos e serviços. Esta abordagem integrada promove um ambiente onde a inovação pode florescer através da interação contínua e dinâmica entre esses atores (Etzkowitz; Leydesdorff, 1997).

A metodologia da Hélice Tríplice permite analisar as forças e fraquezas locais, além de identificar e preencher lacunas nas relações entre universidades, indústrias e governos. O objetivo é desenvolver uma estratégia de inovação eficaz, centrada na identificação das fontes geradoras de desenvolvimento socioeconômico baseado no conhecimento (Etzkowitz; Zhou, 2017).

Desde o século 16, as parcerias entre o setor público, o governo e a indústria são vistas como esferas cruciais da sociedade. Segundo a teoria da Hélice Tríplice, as universidades estão gradualmente deixando de ocupar um papel secundário,

embora importante, de fornecer ensino superior e pesquisa, para assumir um papel central, semelhante ao da indústria e do governo, como criadoras de novas empresas e indústrias. O conceito de Universidade Empreendedora, exemplificado por instituições como o Instituto de Tecnologia de Massachusetts e Stanford, está substituindo o antigo modelo acadêmico e se tornando cada vez mais relevante. Com a transição da sociedade industrial para uma era baseada no conhecimento, o saber avançado é cada vez mais rapidamente aplicado a usos práticos, refletindo sua natureza tanto teórica quanto prática (Etzkowitz; Zhou, 2017).

Segundo a teoria em questão, “as interações universidade-indústria-governo, que formam uma hélice tríplice de inovação e empreendedorismo, são a chave para o crescimento econômico e o desenvolvimento social baseados no conhecimento” (Etzkowitz; Zhou, 2017, p. 24). Diferentemente das teorias que destacam o papel central do governo ou das empresas na inovação, essa abordagem coloca a universidade no centro, como a principal fonte de empreendedorismo, desenvolvimento tecnológico e inovação. Além disso, a universidade é vista como um pilar essencial para a pesquisa crítica, a educação, e a preservação e renovação do patrimônio cultural (Etzkowitz; Zhou, 2017).

É a introdução desse terceiro elemento, a universidade/academia, dedicada à produção e disseminação criativas de novo conhecimento **sob a forma de ideias e tecnologias**, que constitui a “grande transformação” da era atual – após a grande transformação do século XVIII, que criou a dupla hélice do governo-indústria (Etzkowitz; Zhou, 2017, p. 25, grifo nosso).

O modelo da Hélice Tríplice ilustra a interação entre governo, empresas e universidades, onde cada vez mais assumem responsabilidades que tradicionalmente pertencem às outras esferas, ainda que cada entidade preserve suas funções principais e identidades únicas.

As universidades prosseguem com a função fundamental de disseminação do conhecimento, ainda que assumam alguns papéis e funções de empresas ou governo; as empresas continuam a produzir bens e serviços, mas também fazem pesquisas e fornecem treinamento de alto nível e com experiência em seu campo; e por fim, o governo permanece como garantidor final das funções econômicas e sociais, além de fomentar a criação de novas empresas (Etzkowitz; Zhou, 2017, p. 25).

A implementação da Hélice Tríplice nos Estados Unidos pode ser exemplificada pelo desenvolvimento do Vale do Silício⁷, no final do século 19 e início do século 20, que ilustra o efeito de uma dinâmica interativa entre universidade, indústria e governo. Originalmente, o Vale do Silício se desenvolveu a partir da influência do Instituto de Tecnologia de Massachusetts e da estratégia de desenvolvimento baseada no conhecimento na Nova Inglaterra⁸. Os governadores dessa região incluíram, desde o começo, os três principais atores na criação e execução de uma estratégia regional de inovação. Essa abordagem colaborativa resultou na criação do modelo de capital de risco⁹ e no desenvolvimento de uma nova estrutura industrial (Etzkowitz, 2002).

No final do século 19, os líderes pioneiros incentivaram os graduados a criarem empresas de tecnologia para eletrificar a região com as tecnologias disponíveis na época. Posteriormente, uma nova geração de professores, representada por Frederick Terman, colaborou estreitamente com seus alunos e a próxima geração de empresas para buscar inovações incrementais. Segundo Etzkowitz (2017) “foi uma dinâmica de interações universidade-indústria-governo que impulsionou o desenvolvimento do Vale do Silício”. Um processo dinâmico foi implementado, gerando demanda tecnológica para a universidade e promovendo a disseminação dos resultados das pesquisas através de parcerias com empresas. Os professores não apenas tinham permissão, mas eram incentivados a assumir papéis significativos tanto nas empresas quanto no campus. A colaboração entre a indústria técnica e a universidade era intensa, evidenciada pela elevada proporção de professores envolvidos que eram recrutados por seu impacto e motivados a continuar atividades além do ambiente acadêmico — um arranjo que ainda se mantém atualmente (Etzkowitz; Zhou, 2017).

Trazendo para o contexto brasileiro, em 2015, a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), em parceria com a empresa de biotecnologia GlaxoSmithKline e o governo, iniciou o desenvolvimento de uma vacina contra a dengue, que foi aprovada pela

⁷ Região do estado da Califórnia (EUA) conhecida por concentrar grandes empresas do ramo da eletrônica e da informática.

⁸ Região no nordeste dos Estados Unidos que abrange os estados de Maine, Vermont, Nova Hampshire, Massachusetts, Connecticut e Rhode Island.

⁹ A ideia da firma de capital de risco foi inventada na década de 1930 nos Estados Unidos mediante discussões entre atores da universidade, da indústria e do governo, que focaram a necessidade de criar uma entidade que oferecesse capital-semente e assessoria empresarial a possíveis empreendedores científicos. A função de capital-semente de risco foi reforçada por meios públicos, à medida que o setor privado se movia para os níveis seguintes do financiamento (Etzkowitz; Zhou, 2017).

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) em 2016. A pesquisa conduzida pela Fiocruz contou com o apoio técnico e financeiro da GlaxoSmithKline, que investiu US\$ 300 milhões, enquanto o governo brasileiro destinou mais de R\$ 200 milhões para a produção e distribuição da vacina. Essa colaboração tripartite trouxe um avanço significativo para a saúde pública, demonstrando a eficácia do modelo em resolver desafios complexos (Flores, 2023).

Em 2017, a Universidade de São Paulo (USP) colaborou com a IBM e a prefeitura de São Paulo para iniciar um projeto que tem como objetivo transformar a cidade em um exemplo de cidade inteligente. Esse projeto incluiu a instalação de sensores em locais estratégicos para monitorar o tráfego, a qualidade do ar, a iluminação pública e outros aspectos importantes para a administração urbana. Os dados coletados foram analisados por sistemas de inteligência artificial desenvolvidos pela IBM, gerando soluções inovadoras para os desafios urbanos. (Flores, 2023).

No ano de 2019, a Universidade de Brasília (UnB), em colaboração com a empresa de energia renovável Enel e o governo do Distrito Federal, iniciou o projeto "Ecoera". O objetivo deste projeto era promover práticas sustentáveis no setor empresarial. A UnB realizou pesquisas para identificar as melhores práticas sustentáveis, que foram implementadas pela Enel em suas operações. O governo do Distrito Federal incentivou a adoção dessas práticas oferecendo incentivos fiscais às empresas participantes. Essa iniciativa destacou a importância da colaboração entre governo, academia e indústria para promover a sustentabilidade e trazer benefícios ambientais significativos (Flores, 2023).

Esses exemplos demonstram claramente como a colaboração entre universidades, empresas e governos, dentro do modelo Hélice Tríplice, pode gerar resultados notáveis para a sociedade. Seja na tecnologia, saúde ou meio ambiente, essas parcerias impulsionam inovações que melhoram a qualidade de vida, promovem o desenvolvimento sustentável e fortalecem a economia. Para que tais colaborações sejam possíveis, é essencial a existência de um ambiente favorável, que inclui políticas públicas adequadas, recursos financeiros e humanos disponíveis, e um compromisso contínuo com a inovação.

Conclui-se a teoria da Hélice Tríplice mostrou-se eficaz ao promover o avanço tecnológico e a inovação. A interação dinâmica entre os elementos da hélice permite

não só a geração de conhecimento e desenvolvimento de novas tecnologias, mas também a sua aplicação prática em produtos e serviços que beneficiam a sociedade.

A Marinha do Brasil, ao adotar os princípios dessa teoria em seu programa nuclear, exemplifica um esforço estratégico para alinhar as capacidades institucionais e fomentar a inovação. A sinergia entre governo, academia e indústria tem se mostrado vital para a consecução dos objetivos de desenvolvimento tecnológico e científico, demonstrando que a cooperação trilateral pode ser adaptada e aplicada com sucesso no contexto brasileiro.

3 APLICAÇÕES BENIGNAS DA ENERGIA NUCLEAR

Neste capítulo, será explorado o papel da energia nuclear e suas amplas aplicações no contexto societal, com foco na pesquisa científica, no desenvolvimento econômico e no bem-estar da população. A energia nuclear, além de ser uma fonte limpa e eficiente de energia, possui diversas utilidades que beneficiam múltiplos setores da sociedade. Com a apresentação de tais utilidades pretende-se que todos que tenham acesso a este trabalho compreendam a relevância e o potencial transformador da energia nuclear. Por meio do capítulo 4 será possível definir a participação da MB na busca e desenvolvimento de tais conhecimentos.

As descobertas científicas no final do século 19 e início do século 20 sobre a estrutura atômica abriram novas perspectivas para o uso da energia nuclear em diversas áreas. Embora muitas vezes associada a conflitos bélicos, a energia nuclear tem aplicações pacíficas que podem melhorar significativamente o bem-estar e a qualidade de vida da humanidade (AIEA, 2024).

A energia nuclear é produzida por reações no núcleo dos átomos, como a fissão e a fusão nuclear, e uma de suas principais aplicações é na geração de eletricidade. As primeiras aplicações pacíficas surgiram logo após a Segunda Guerra Mundial, mesmo após o impacto devastador das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki, em 1945. Desde então, as radiações ionizantes, geradas por radioisótopos ou aceleradores de partículas, têm sido utilizadas em diversos setores, como saúde e agricultura (CNEN, 2024).

Em seguida, serão detalhadas as principais aplicações benignas da energia nuclear, explorando sua utilização na medicina, na agricultura, na indústria e em outras áreas.

3.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia nuclear, baseada na transformação de massa em energia, é uma das alternativas com maior potencial para a geração de eletricidade. Esse princípio, demonstrado por Albert Einstein, se aplica a certos elementos químicos que podem transformar massa em energia por meio de reações nucleares. Essas reações

ocorrem de maneira espontânea em alguns casos, enquanto em outros são necessárias técnicas específicas para que aconteçam (Eletronuclear, 2024).

Existem duas formas principais de aproveitar essa energia: a fissão e a fusão nucleares. Na fissão, o núcleo do átomo se divide em duas ou mais partículas menores, liberando uma quantidade significativa de energia. Já na fusão, dois ou mais núcleos se unem, formando um novo elemento e liberando energia. Atualmente, a fissão do átomo de urânio é a técnica mais empregada nas usinas nucleares para a geração de eletricidade. Nesse processo, os átomos de urânio são divididos dentro das varetas do elemento combustível, aquecendo a água do reator a cerca de 320 graus Celsius. Para evitar que a água entre em ebulição, ela é mantida sob uma pressão extremamente alta, cerca de 157 vezes maior que a pressão atmosférica (Eletronuclear, 2024).

O calor gerado é transferido através de um sistema que inclui três circuitos independentes. No primeiro circuito, a água aquecida transfere calor para o segundo circuito através de um gerador de vapor. Isso transforma a água do segundo circuito em vapor, que então movimentar uma turbina conectada a um gerador elétrico, produzindo eletricidade. Após movimentar a turbina, o vapor é resfriado em um condensador utilizando água do mar trazida pelo terceiro circuito, garantindo que a água do reator não entre em contato com as demais (Eletronuclear, 2024).

As usinas nucleares são reconhecidas por seus elevados padrões de segurança, operando com múltiplos sistemas de proteção redundantes. Esse modelo de geração de energia está presente em mais de 400 centrais nucleares ao redor do mundo, em países como França, Japão, Estados Unidos, Alemanha, e muitos outros. De acordo com a Associação Nuclear Mundial (ANM), cerca de 14% da eletricidade global é proveniente de fontes nucleares, e esse percentual tende a aumentar com a construção de novas usinas, especialmente em nações em desenvolvimento (Eletronuclear, 2024).

Um dos grandes benefícios da geração de eletricidade através de usinas nucleares é a não emissão de gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para a redução do aquecimento global. Além disso, as usinas nucleares ocupam áreas relativamente pequenas e podem ser localizadas próximas aos centros consumidores,

sem depender de fatores climáticos, como chuvas ou ventos, para operar (IPEN, 2015).

O combustível utilizado, o urânio, é abundante e possui um baixo custo, minimizando o risco de escassez no médio prazo. Pesquisas indicam que há uma crescente aceitação pública para a construção de novas usinas nucleares e a substituição de instalações antigas. Ambientalistas de renome, como James Lovelock e Patrick Moore, defendem a energia nuclear como essencial para combater as mudanças climáticas (IPEN, 2015).

No contexto brasileiro, onde a matriz energética é predominantemente hídrica, a energia nuclear se apresenta como uma importante alternativa para diversificação. O Brasil possui grandes reservas de urânio e domina o ciclo completo de fabricação do combustível nuclear, o que representa uma vantagem estratégica significativa (IPEN, 2015).

Cabe destacar que, para um sistema hídrico possa se autorregular em anos de seca severa, é necessário que haja um armazenamento de energia hídrica suficiente para pelo menos cinco meses. Contudo, as novas usinas hidrelétricas tendem a ter uma capacidade de armazenamento que só cobre cerca de dois meses de produção. Além disso, a criação de grandes reservatórios na Amazônia, onde se encontra grande parte do potencial hidrelétrico brasileiro, enfrenta desafios sociais e ambientais significativos (Eletronuclear, 2024).

Assim, a utilização de centrais térmicas no Brasil, a médio prazo, não se deve à falta de potencial hidrelétrico, mas sim à necessidade de mitigar os riscos associados à variabilidade hídrica. As usinas termoelétricas se tornam essenciais para a regulação do sistema energético. Embora seja importante maximizar a contribuição de fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, essas alternativas não eliminam a necessidade de complementação térmica. Isso ocorre porque todas essas fontes dependem de ciclos naturais e não estão sempre disponíveis (Eletronuclear, 2024).

O Brasil está, portanto, em um ponto de transição. O predomínio da hidroeletricidade no Sistema Integrado Nacional tende a evoluir para uma configuração onde as usinas hidrelétricas continuam importantes, mas com uma crescente participação das usinas termoelétricas para assegurar a segurança operacional do sistema (EBC, 2016).

Conclui-se que a energia nuclear não apenas contribui para a diversificação da matriz energética, mas também proporciona uma fonte confiável e limpa de eletricidade. A opção nuclear permite a geração de energia que não contribui para o efeito estufa e é imune às variações climáticas, oferecendo uma solução estável para a crescente demanda por energia, especialmente em países em desenvolvimento. Além disso, o uso de urânio de origem nacional minimiza vulnerabilidades no abastecimento e protege contra a volatilidade dos preços no mercado internacional. Usinas nucleares ocupam áreas menores em comparação a outras formas de geração, permitindo que sejam instaladas próximas aos grandes centros consumidores, o que elimina a necessidade de longas linhas de transmissão. A continuidade de pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias poderão expandir ainda mais o uso da energia nuclear, solidificando seu papel crucial na matriz energética global.

3.2 APLICAÇÃO NA MEDICINA

A medicina nuclear utiliza materiais radioativos para diagnóstico e tratamento. Isótopos radioativos são empregados como traçadores de atividades metabólicas em exames como a cintilografia, permitindo a visualização de órgãos e ajudando no diagnóstico de doenças em ossos, tireoide e sistemas respiratório e urinário. Nesta técnica, um elemento radioativo é administrado no corpo, emitindo radiações preferencialmente em certos órgãos, como o iodo na glândula tireoide. O paciente é então mapeado por um detector que identifica a absorção do radioisótopo, auxiliando no diagnóstico (AIEA, 2024).

O uso extensivo da radioatividade na medicina levou ao desenvolvimento de novas especialidades, como a Física Médica, que dá suporte ao corpo médico em aspectos físicos das técnicas utilizadas. As técnicas nucleares são essenciais na prevenção, diagnóstico e tratamento de condições de saúde, especialmente doenças não transmissíveis como câncer e doenças cardiovasculares, além de monitorar e tratar desnutrição e obesidade. Nos hospitais, exames com radiação ionizante (raios X ou gama) fornecem imagens anatômicas cruciais para diagnósticos e decisões de tratamento (UFSM, 2018).

O câncer é uma das principais causas de morte no mundo e está em ascensão devido ao aumento da expectativa de vida e mudanças no estilo de vida. Diagnosticar câncer frequentemente envolve exames de imagem que usam pequenas quantidades de radiação, como raios-X, tomografia computadorizada (TC), ressonância magnética (RM), tomografia por emissão de pósitrons (PET) e tomografia computadorizada por emissão de fóton único (SPECT). Esses procedimentos são fundamentais na decisão clínica, terapia e acompanhamento. A combinação de técnicas de imagem anatômica (TC e RM) e funcional ou molecular (PET e SPECT) permite uma abordagem integrada, essencial para caracterizar tumores em todos os estágios (AIEA, 2024).

A radioterapia, uma das terapias mais comuns contra o câncer, utiliza radiação em diversas formas (raios X, gama, partículas) para destruir tumores. Técnicas como a radioterapia conformada 3D, de intensidade modulada e guiada por imagem oferecem modelagem precisa do alvo, reduzindo a radiação em tecidos saudáveis e aumentando-a no tumor (AIEA, 2024).

A terapia de medicina nuclear utiliza radiofármacos direcionados a tumores específicos, como tireoide, linfomas ou metástases ósseas, proporcionando radiação seletiva para lesões tumorais. Radiofármacos terapêuticos transportam radiação diretamente para os tumores, poupando tecidos saudáveis e oferecendo tratamentos eficazes. Os avanços tecnológicos ampliaram os tratamentos contra o câncer, incluindo quimioterapia, cirurgia, radioterapia e terapias-alvo como a radionuclídica (AIEA, 2024).

Radiofármacos são radioisótopos ligados a moléculas que atingem órgãos ou células específicas, usados tanto para diagnóstico quanto para terapia de doenças. Técnicas de diagnóstico por imagem, utilizando raios gama e gama-câmeras, geram imagens não invasivas refletindo a função de órgãos ou tecidos, essenciais no manejo de doenças cardiovasculares e câncer (AIEA, 2024).

Técnicas nucleares também são usadas na detecção, controle e prevenção de doenças como malária, Ebola e Zika. A técnica de insetos estéreis, desenvolvida pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e Organização Mundial da Saúde (OMS), usa radiação para esterilizar insetos, controlando pragas sem resíduos químicos. Esta técnica é aplicada no combate ao vírus Zika e outras doenças transmitidas por mosquitos (AIEA, 2024).

Conclui-se que a energia nuclear na medicina demonstra um vasto potencial para melhorar diagnósticos, tratamentos e a prevenção de doenças, destacando a importância de pesquisas contínuas e desenvolvimento tecnológico para avanços futuros na saúde global.

3.3 APLICAÇÃO NA AGRICULTURA E NO CONTROLE DE ALIMENTOS

As tecnologias nucleares oferecem soluções únicas e competitivas para combater a fome e a desnutrição, melhorar a sustentabilidade ambiental, garantindo assim, a segurança dos alimentos. A AIEA e a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) colaboram para ajudar os Estados-Membros a utilizar essas tecnologias de forma segura e eficaz. A segurança e qualidade dos alimentos são essenciais, especialmente para países em desenvolvimento que exportam alimentos para grandes mercados internacionais (AIEA, 2024).

Modernas técnicas analíticas nucleares utilizam isótopos estáveis em análises quantitativas e baixos níveis de reagentes radioativos em ensaios de rádio para detectar contaminação de alimentos. As medições de razão isotópica permitem rastrear produtos até sua origem, garantindo a autenticidade dos ingredientes. A irradiação de alimentos com raios X, feixes de elétrons ou raios gama previne o brotamento, amadurecimento prematuro e atua como tratamento fitossanitário para controle de pragas em frutas e hortaliças. Além disso, é um método eficaz para reduzir a contaminação bacteriana e prolongar a vida útil dos alimentos (AIEA, 2024). Para o Brasil, como grande exportador de alimentos, a irradiação representa um benefício significativo ao garantir a qualidade e segurança dos produtos exportados, facilitando o comércio internacional.

A capacidade de rastrear a origem dos alimentos através de técnicas isotópicas robustas é fundamental para a segurança alimentar, ajudando a identificar a autenticidade dos produtos, combater fraudes e reforçar a confiança nas cadeias de abastecimento. Desde os anos 2000, a análise de isótopos estáveis tem sido usada para verificar a origem geográfica dos alimentos. A composição de isótopos funciona como um registro das condições ambientais no ponto de origem, bem como das práticas agrícolas utilizadas (AIEA, 2024).

A técnica do inseto estéril é um método ambientalmente amigável para controlar pragas agrícolas, envolvendo a criação em massa e esterilização de insetos com radiação. Estes insetos são liberados em áreas específicas, onde acasalam com fêmeas selvagens, resultando na redução da população de pragas. Esta técnica tem sido eficaz no controle de pragas como moscas-das-frutas e mariposas, proporcionando benefícios econômicos significativos ao reduzir perdas na produção agrícola, proteger indústrias hortícolas e pecuárias, e diminuir o uso de inseticidas (AIEA, 2024).

No melhoramento de plantas, técnicas nucleares têm sido amplamente utilizadas para induzir mutações genéticas que resultam em variedades mais resistentes e produtivas. A radiação, como raios gama, é usada para aumentar a taxa de mutação natural em até um milhão de vezes, permitindo a criação de novas variedades de culturas alimentares com características desejáveis. Sementes e outros propágulos de plantas são tratados com radiação para induzir mutações hereditárias que melhoram a produção e a resistência a pragas e doenças (AIEA, 2024).

As técnicas nucleares também desempenham um papel crucial no melhoramento de raças animais. O radioimunoensaio de hormônios em fluidos corporais é usado para melhorar os serviços de inseminação artificial, enquanto a irradiação com cobalto-60¹⁰ ajuda no mapeamento de genomas de gado, identificando características genéticas vantajosas. A detecção de biomarcadores baseada em radioisótopos é utilizada para diagnóstico precoce de prenhez e otimização de programas de reprodução animal (AIEA, 2024).

Além disso, técnicas nucleares e isotópicas são eficientes na gestão da água agrícola, rastreamento da movimentação de fertilizantes e aumento da eficiência de uso da água e nutrientes nas culturas. As assinaturas isotópicas de carbono, nitrogênio e fósforo ajudam a quantificar a fixação biológica de nitrogênio e a dinâmica do fósforo, essenciais para o manejo sustentável do solo e aumento da produção agrícola (AIEA, 2024).

Conclui-se que as técnicas nucleares oferecem avanços significativos no manejo da agricultura e na produção de alimentos, contribuindo para a segurança

¹⁰ O Cobalto-60 é um radioisótopo, isto é, uma substância radioativa que emite raios gama (CNEN, 2020).

alimentar, sustentabilidade ambiental e melhoria das raças animais. Ao integrar essas tecnologias inovadoras, é possível enfrentar os desafios globais de forma mais eficaz, garantindo um futuro mais seguro e sustentável para a agricultura e a produção de alimentos.

3.4 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

A ciência e a tecnologia nucleares desempenham um papel fundamental na inovação, segurança e eficiência dos processos industriais. Técnicas nucleares são amplamente utilizadas para identificar e avaliar propriedades de materiais, medir níveis de poluição, esterilizar componentes, monitorar e otimizar processos industriais, e modificar propriedades químicas, físicas e biológicas para produzir novos materiais. A radiação é aplicada na análise e processamento de diversas substâncias, tornando-se uma ferramenta essencial na indústria moderna (AIEA, 2024).

A radiografia industrial para ensaios não destrutivos, por exemplo, é utilizada para inspecionar concreto e soldas em tubulações de gás e água, tanques de armazenamento e elementos estruturais. Ela permite identificar rachaduras ou falhas invisíveis, garantindo a qualidade e a segurança dos materiais. Além disso, os manômetros nucleônicos, que exploram a interação entre radiação ionizante e matéria, são utilizados globalmente para controlar e melhorar a qualidade dos produtos, otimizando processos e economizando energia e materiais (AIEA, 2024).

Sistemas de controle nucleônico estão em operação em diversas indústrias ao redor do mundo. Esses sistemas, que não requerem contato direto com o material, são ideais para linhas de produção de alta velocidade ou sistemas operando em temperaturas extremas. Eles permitem medições estáticas ou contínuas e são usados para visualizar estruturas internas de objetos e fluxos por meio de tecnologias como a TC (AIEA, 2024).

A maioria dos sistemas de controle nucleônico tem um volume de amostragem maior do que o de outras técnicas físicas, que geralmente também é muito maior do que os ensaios normalmente coletados para análise laboratorial. Os sistemas são robustos e versáteis, aplicando-se a diversos setores, incluindo mineração, processamento de minério, monitoramento ambiental, indústrias de papel e plásticos,

cimento, engenharia civil, e petróleo e gás. As vantagens dessa tecnologia sobre métodos convencionais são significativas, estimulando o desenvolvimento de novas aplicações e técnicas de controle de qualidade (AIEA, 2024).

A radiação também desempenha um papel crucial na esterilização de dispositivos médicos de uso único, como seringas e luvas cirúrgicas, garantindo produtos seguros e confiáveis. A esterilização com radiação ionizante inativa microrganismos de forma eficiente e permite que produtos já embalados sejam esterilizados. Globalmente, mais de 160 usinas de irradiação gama esterilizam cerca de 12 milhões de metros cúbicos de dispositivos médicos anualmente, representando mais de 40% de todos os dispositivos médicos de uso único produzidos no mundo (AIEA, 2024).

Além de esterilizar, a radiação é usada para modificar materiais, alterando suas propriedades para diversas aplicações comerciais. Fontes de radioisótopos, aceleradores de elétrons e raios-X são utilizados para reticulação de polímeros, produção de isolamentos de fios e cabos, pneus de carros e itens médicos como luvas de látex. Esta técnica, realizada à temperatura ambiente, melhora a durabilidade dos materiais e elimina resíduos químicos tóxicos (AIEA, 2024).

Traçadores radioativos desempenham um papel crescente na indústria, diagnosticando ineficiências em operações de plantas e investigando processos industriais. Traçadores são compostos químicos onde átomos foram substituídos por radioisótopos, permitindo o monitoramento de reações químicas e fluxos através de tecnologias como SPECT e PET (AIEA, 2024).

A radiação de alta energia tem a capacidade de induzir efeitos químicos e biológicos profundos em materiais, muitas vezes sem a necessidade de aditivos químicos. Esta característica é usada comercialmente para tratar poluentes em sólidos, líquidos ou gases, tornando-os menos nocivos e passíveis de tratamento convencional (AIEA, 2024).

Técnicas nucleares são usadas para tratar óxidos de nitrogênio (NOx) e enxofre (SOx) em gases de combustão, e efluentes da indústria têxtil. O processo de higienização torna o lodo de esgoto adequado para uso agrícola, utilizando instalações de feixe de elétrons em escala industrial para tratar águas residuais e purificar gases de combustão (AIEA, 2024).

Conclui-se que, em um mundo cada vez mais preocupado com a produção sustentável e a redução da poluição, as aplicações nucleares na indústria são de suma importância. Elas proporcionam avanços significativos em segurança, eficiência e inovação, promovendo uma produção mais limpa, em um planeta cada vez mais preocupado com a utilização consciente dos recursos naturais.

3.5 OUTRAS APLICAÇÕES

Preservar a arte e o patrimônio cultural é uma ambição compartilhada globalmente, a ciência e tecnologia nucleares podem caracterizar e conservar artefatos, protegendo assim uma parte crucial da herança cultural de cada país. A preservação desses artefatos é desafiadora, pois muitos fatores, incluindo armazenamento inadequado, mudanças climáticas e desastres naturais, podem levar à sua deterioração ou perda completa (AIEA, 2024).

Métodos químicos e físicos tradicionais foram desenvolvidos para tratar e restaurar artefatos culturais, mas os químicos podem deixar resíduos indesejáveis e os físicos podem ser muito agressivos para certos materiais. As tecnologias de radiação, por outro lado, não causam danos aos artefatos e são eficazes para eliminar parasitas que ameaçam as obras de arte e avaliar danos internos causados a elas. Por muitos anos, técnicas de radiação têm sido usadas para tratar uma ampla gama de artefatos culturais, e pesquisas internacionais têm trabalhado para desenvolver metodologias harmonizadas, tornando a radiação uma técnica amplamente aceita para esse propósito (AIEA, 2024).

Gerenciar de forma sustentável os recursos hídricos, tanto superficiais quanto subterrâneos, requer um conhecimento científico sólido sobre disponibilidade e qualidade da água. Métodos isotópicos fornecem ferramentas precisas e econômicas para identificar ligações hidrológicas e interações entre rios e aquíferos. Essas informações são vitais para a formulação de políticas de gestão de recursos hídricos, especialmente em contextos transfronteiriços. Traçadores de isótopos estáveis e radioativos, aliados a métodos hidrológicos tradicionais, informam decisões de longo prazo para a gestão desses recursos (AIEA, 2024).

As técnicas nucleares também são aplicadas na análise forense de provas relacionadas a crimes, desde tráfico de drogas a falsificações de arte. Técnicas como raios X, análise por ativação neutrônica, análise por feixe de íons e datação por radiocarbono complementam métodos tradicionais em investigações criminais. Elas permitem analisar propriedades químicas e físicas de materiais, ajudando a vincular evidências a perpetradores. Técnicas de raios X, por exemplo, são sensíveis, confiáveis e não destrutivas, permitindo análises rápidas e precisas de pequenas amostras (AIEA, 2024).

A análise por ativação de nêutrons determina a "impressão digital elementar" de uma amostra, revelando sua composição isotópica, idade e origem. Essa técnica é usada para analisar materiais de balas, determinar a presença de substâncias tóxicas em corpos e verificar a autenticidade de alimentos premium. A análise por feixe de íons acelera íons ou elétrons para produzir um feixe de partículas carregadas, permitindo a análise detalhada de drogas, explosivos, artefatos históricos falsificados e outros materiais forenses (AIEA, 2024).

Conclui-se que as aplicações das tecnologias nucleares vão além da geração de energia, abrangendo áreas vitais como a preservação do patrimônio cultural, a gestão sustentável dos recursos hídricos e a análise forense. Dessa forma, revelam-se indispensáveis para diversas aplicações científicas e sociais, contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável e a segurança em múltiplas frentes.

4 PROGRAMA NUCLEAR DA MARINHA: ORIGEM, PARCERIAS E APOIO À PESQUISA

Este capítulo explorará a origem e a evolução do PNM, suas parcerias e apoio à pesquisa, as contribuições científicas e tecnológicas alcançadas, e a capacidade dual do programa, que oferece perspectivas futuras promissoras. As possibilidades da energia nuclear apresentadas no capítulo anterior servirão para que se discuta o alcance do PNM, entendendo assim, sua real potencialidade e participação no Programa Nuclear Brasileiro (PNB).

O PNM representa um marco significativo no desenvolvimento científico e tecnológico do país. Sua origem e evolução são testemunhos da capacidade da Marinha de se adaptar e inovar em resposta a desafios internos e externos. Como argumenta Geoffrey Till¹¹ (2018), muitos dos principais estímulos à inovação nas marinhas são intrínsecos, resultando de suas próprias necessidades e objetivos estratégicos. A manutenção de laços estreitos e produtivos com a indústria, bem como a integração de cientistas em suas deliberações, são elementos cruciais para uma estratégia eficaz de inovação tecnológica. Segundo Till (2018), este relacionamento foi crucial, por exemplo, no sucesso da campanha britânica contra os submarinos na Segunda Guerra Mundial, e a perda desse contato mostrou o impacto negativo da desconexão, como no caso da aviação naval britânica entre guerras.

No contexto do século 21, as marinhas enfrentam o desafio contínuo de uma revolução tecnológica cujas dinâmicas raramente estão sob seu controle. No entanto, a necessidade de desenvolver uma abordagem estratégica para navegar por essas incertezas é vital, pois impacta diretamente sua capacidade de executar suas tarefas (Till, 2018). A MB, através de seu programa nuclear, demonstra essa abordagem estratégica ao fomentar parcerias com universidades e indústrias, promovendo avanços tecnológicos que não só fortalecem a defesa nacional, mas também geram benefícios para a sociedade em geral.

¹¹ Geoffrey Till é uma autoridade reconhecida em estratégia marítima do passado e do presente. Ex-decano de Estudos Acadêmicos do Joint Services Command and Staff College do Reino Unido, atualmente é professor emérito de Estudos Marítimos no Departamento de Estudos de Defesa e Presidente do Corbett Centre for Maritime Policy, King's College London.

4.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO DO PNM

Grande parte do desenvolvimento da tecnologia nuclear no Brasil está ligada à Marinha, com o Almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva sendo um pioneiro na defesa da pesquisa nuclear para a produção de energia no país. Após a Segunda Guerra Mundial, sabendo que o acesso às mais recentes tecnologias era essencial, ele argumentou que os países com matérias-primas nucleares não deveriam apenas vendê-las em troca de dinheiro, mas também exigir reatores e tecnologia nuclear. Tal proposta ficou conhecida como a tese das "compensações específicas" e orientou a política nuclear brasileira (Lana, 2014).

Álvaro Alberto representou o Brasil na Comissão de Energia Atômica da Organização das Nações Unidas (ONU) e foi presidente da comissão em 1946 e 1947, quando o Brasil rejeitou o Plano Baruch, que visava manter o monopólio americano sobre matérias-primas nucleares. Ele via o plano como uma tentativa de desapropriação (Lana, 2014).

Em 1951, o Presidente Dutra criou o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), idealizado por Álvaro Alberto, que se tornou presidente do órgão. Ele propôs uma política nacional de energia nuclear focada no enriquecimento de urânio, desenvolvimento de reatores e diversificação de parceiros internacionais, visando reduzir a dependência dos Estados Unidos da América (EUA). Sob sua liderança, o CNPq começou a controlar as reservas de urânio e tório do país (Lana, 2014).

Em 1953, Vargas aprovou a implantação da indústria nuclear no Brasil. Álvaro Alberto buscou colaboração na França e na Alemanha para extrair urânio e comprar ultracentrífugas para enriquecimento de urânio. Embora os americanos tenham bloqueado a transação, o esforço destacou a necessidade de independência tecnológica. Durante o governo Café Filho, o Brasil assinou o programa americano "Átomos para a Paz" e acordos de cooperação para desenvolvimento de energia nuclear com fins pacíficos, aceitando reatores de pesquisa dos EUA sob inspeção internacional. No governo de Juscelino Kubitschek, a prioridade foi o desenvolvimento de usinas nucleares para aumentar a geração de energia elétrica. A comissão especial formada em seu governo resultou na criação da Comissão Nacional de Energia

Nuclear (CNEN) em 1956, que estabeleceu estreita colaboração com os EUA (Lana, 2014).

O governo militar, a partir de 1964, optou por reatores movidos a urânio enriquecido e, em 1967, transferiu a CNEN para o Ministério das Minas e Energia. Foi nessa época que o Brasil assinou o Tratado de Tlatelolco¹², comprometendo-se a não usar o poder nuclear para fins militares. Em 1975, sob a presidência de Ernesto Geisel, o Brasil assinou um acordo nuclear com a Alemanha, que previa a construção de reatores e transferência de tecnologia de enriquecimento de urânio. A criação da Nuclebrás em 1974 consolidou as atividades nucleares do país, mas pressões americanas limitaram o repasse de tecnologia. Com as restrições internacionais, Geisel mobilizou as Forças Armadas para dominar a tecnologia nuclear de forma autônoma, resultando no Programa Nuclear Paralelo. A Marinha, sob a liderança do Comandante Othon Luiz Pinheiro da Silva, focou no enriquecimento de urânio via ultracentrifugação, que se mostrou viável e eficaz (Lana, 2014).

Em 1979, o PNM foi oficialmente iniciado, com foco no desenvolvimento de submarinos nucleares. Durante a década de 1980, o Brasil enfrentou uma crise financeira grave que afetou significativamente o financiamento de ciência e tecnologia. Apesar disso, os programas nucleares, considerados cruciais pelos militares para a soberania nacional, conseguiram obter certo apoio do Presidente João Baptista Figueiredo. A Usina Angra I foi finalmente inaugurada, embora com cinco anos de atraso e operando com 1/3 de sua capacidade. Outras centrais previstas nos acordos com a Alemanha foram canceladas por falta de recursos, mas os contratos para Angra II e III foram mantidos. O PNM também recebeu investimentos do governo federal e contou com o apoio essencial do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), que acolheu o programa em suas instalações na Universidade de São Paulo (USP). (Lana, 2014).

A parceria da Marinha com a USP datava de 1956, quando foi criado o primeiro curso de engenharia naval no país, com o Comandante Othon sendo um dos graduados pela Escola Politécnica da USP. O IPEN, não vinculado à Nuclebrás, não estava sujeito às salvaguardas internacionais previstas no Acordo de 1975, permitindo uma maior liberdade para o desenvolvimento de tecnologias nucleares. Em fevereiro

¹² Promulgado pelo Decreto nº 1.246, de 16 de setembro de 1994.

de 1980, os trabalhos começaram e, em dezembro de 1981, foi concluída a primeira ultracentrífuga brasileira. O programa também recebeu aportes da Secretaria de Assuntos Estratégicos, além do orçamento da Marinha (Lana, 2014).

O Presidente Figueiredo inicialmente via os programas nucleares como resposta à demanda crescente por energia, mas a Guerra das Malvinas o fez perceber a importância estratégica de um submarino nuclear. Ao longo dos anos 1980, o PNM avançou significativamente, com a primeira operação de enriquecimento isotópico de urânio ocorrendo em 1982. Dois anos depois, ocorreu a primeira operação de enriquecimento pelo sistema de cascata, levando à ideia de construir uma usina de enriquecimento (Lana, 2014).

Em 1985, a Marinha adquiriu um terreno de 900 hectares em Iperó, São Paulo, para abrigar a usina de enriquecimento e a planta de propulsão nuclear, estabelecendo o Centro Experimental de Aramar (CEA). Em 1986, as atividades em parceria com o IPEN foram consolidadas na Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP), que, em 1995, passou a se chamar Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). O CTMSP se tornou a base do PNM, focando no ciclo do combustível nuclear e na construção do protótipo do reator para o futuro submarino nuclear brasileiro. O ciclo do combustível nuclear envolve várias etapas, desde a mineração do urânio até sua utilização em reatores nucleares. Em 1987, o Presidente José Sarney anunciou que o Brasil havia dominado a tecnologia de enriquecimento de urânio por ultracentrifugação (Lana, 2014).

Em 1992, o Brasil assinou o Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares. A Nuclebrás foi desmantelada, restando apenas a Nuclebrás Engenharia (NUCLEN) e a Fábrica de Equipamentos Pesados (NUCLEP). As obras de Angra II, que na década de 80 praticamente não aconteceram, foram retomadas, e o PNM começou a fornecer tecnologia para a produção de combustível nuclear em Resende, Rio de Janeiro, e para Angra I e II (Lana, 2014).

Em 2007, o governo federal entendeu a importância estratégica do submarino nuclear para o Brasil, sendo liberados mais de R\$ 1 bilhão para a Marinha, distribuídos ao longo de oito anos. O novo financiamento ajudou no desenvolvimento de uma planta nuclear de geração de energia elétrica com tecnologia própria, incluindo um reator nuclear. Com a participação das Forças Armadas e novos ministros da Defesa

e de Assuntos Estratégicos, foi criado um grupo de estudos que resultou na END, apresentada em dezembro de 2008 (Lana, 2014).

A END estabelecia como prioridade a independência nacional pela capacitação tecnológica autônoma, especialmente no setor nuclear. Em relação à Marinha, o documento destacava a necessidade de projetar e fabricar submarinos convencionais e de propulsão nuclear, através de investimentos e parcerias. Antecipando-se às determinações da END, a Marinha criou a Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento do Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN) (Lana, 2014).

Em 2008, o Ministro da Defesa, iniciou negociações com vários países para buscar parcerias estratégicas para a construção do submarino nuclear. As conversações avançaram com a França, que concordou em transferir a tecnologia necessária ao Brasil, excetuando a tecnologia relacionada a propulsão nuclear. Os franceses já possuíam experiência na exportação de submarinos convencionais e no desenvolvimento de submarinos nucleares com tecnologia própria. Em janeiro de 2008, o Ministro da Defesa e o Comandante da Marinha, viajaram a Paris para formalizar o acordo. Este foi consolidado no Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB), gerido pela COGESN (Lana, 2014).

O PROSUB, baseado em transferência de tecnologia, nacionalização e capacitação profissional, vem promovendo grandes avanços na área do conhecimento, essencial para a soberania das nações. A parceria com a França permite ao Brasil economizar anos de pesquisa e desenvolvimento, facilitando a construção de submarinos e infraestrutura associada. A absorção e aplicação dos conhecimentos adquiridos são descentralizadas, com engenheiros e projetistas do CTMSP documentando e replicando as informações obtidas na França. O Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar (CIANA) foi inaugurado em Iperó para formar operadores do Laboratório de Geração Núcleoelétrica (LABGENE), uma planta nuclear de geração de energia elétrica (Lana, 2014).

Para aprimorar o Sistema de Ciência e Tecnologia da Marinha, foi criada em 31 de março de 2008, através da Portaria nº 115/MB, a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (SecCTM). Inicialmente subordinada ao Estado-Maior da Armada e chefiada por um Vice-Almirante, a SecCTM centralizou o gerenciamento

das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) das Instituições de CT&I da Marinha (Brasil, 2016a).

Posteriormente, o Decreto nº 7.809, de 20 de setembro de 2012, elevou a SecCTM ao nível de Órgão de Direção Setorial (ODS). Essa elevação trouxe maior visibilidade e atuação para a Secretaria, tanto nacional quanto internacionalmente, além de aprimorar o controle de seus Programas e Projetos. Nessa fase, foram implementadas melhores práticas gerenciais, registro de patentes e propriedades intelectuais, e fortalecimento de parcerias, incluindo a ampliação dos Escritórios da MB em várias Universidades (Brasil, 2016a).

O terceiro ciclo de evolução do Setor começou com o Decreto nº 8.900, de 10 de novembro de 2016, que alterou a denominação da SecCTM para Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM). Essa mudança incorporou as atividades do PROSUB e do PNM, além de integrar as Estruturas Organizacionais de Gestão de CT&I da Marinha e de gestão do PROSUB e do PNM (Brasil, 2016a).

Para suportar a vasta gama de atividades e o alto grau de especialização e conteúdo tecnológico do PROSUB, foi criada a Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL), uma empresa pública responsável por agregar os recursos humanos do programa. Esta empresa não apenas apoia o desenvolvimento tecnológico, mas também facilita a integração de conhecimentos e experiências, impulsionando o desenvolvimento nacional em diversas áreas (Lana, 2014).

Criada pela Lei 12.706, de 8 de agosto de 2012, cabe destacar algumas competências da AMAZUL:

- I - promover, desenvolver, absorver, transferir e manter tecnologias necessárias às atividades nucleares **da Marinha do Brasil e do Programa Nuclear Brasileiro - PNB**;
- II - promover, desenvolver, absorver, transferir e manter as tecnologias necessárias à elaboração de projetos, acompanhamento e fiscalização da construção de submarinos para a Marinha do Brasil; e
- III - gerenciar ou cooperar para o desenvolvimento de projetos integrantes de programas aprovados pelo Comandante da Marinha, especialmente os que se refiram à construção e manutenção de submarinos, promovendo o desenvolvimento da indústria militar naval brasileira e atividades correlatas (Brasil, 2012, art. 5, grifo nosso).

Desde sua criação, a AMAZUL absorve, promove, desenvolve, transfere e mantém atividades sensíveis às atividades do PNM, do PROSUB e do PNB. A

empresa define que seu compromisso “é usar a tecnologia nuclear para salvar vidas, melhorar a qualidade de vida das pessoas, garantir a segurança energética com energia limpa e defender a soberania do País” (AMAZUL, 2013).

Ao entendermos tais objetivos, é possível depreender que a AMAZUL realiza a conexão entre as pás da Hélice Tríplice, gerindo recursos públicos, conhecimento científico e desenvolvendo diversos ramos da indústria nacional, relacionados ao desenvolvimento da exploração da energia nuclear.

Conclui-se que a origem e evolução do PNM são marcadas por um esforço contínuo de independência tecnológica e inovação estratégica. Desde as primeiras iniciativas lideradas pelo Almirante Álvaro Alberto, passando pela criação de instituições como o CNPq e a CNEN, até os acordos de cooperação internacional e a criação de infraestruturas como o Centro Experimental de Aramar, o PNM tem sido um catalisador para o avanço científico e tecnológico do país. A resistência a pressões externas e a busca por autonomia no enriquecimento de urânio destacam a determinação do Brasil em controlar sua própria trajetória nuclear.

4.2 PARCERIAS E APOIO À PESQUISA

Até o momento, foram discutidos os benefícios que a energia nuclear oferece à sociedade, bem como a estrutura de pesquisa e inovação sob a gerência da MB. Agora, é fundamental identificar o envolvimento da MB em iniciativas que, seja por meio de ações individuais ou parcerias estratégicas, visam promover e ampliar a oferta de tecnologias nucleares. Serão identificadas algumas das colaborações e apoios concedidos pela MB que fortalecem a ciência, a tecnologia e a inovação no Brasil, na área em questão.

Desta forma, foram reafirmados os entendimentos de que a **Marinha do Brasil é protagonista em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área nuclear**, tendo atingido diversas etapas piloto de desenvolvimento de processos do ciclo do combustível nuclear, e a INB, com sua capacidade **industrial**, para atingir e desenvolver a cadeia produtiva do urânio por meio da implementação de tecnologias autóctones disponíveis (INB, 2021, grifo nosso).

A citação anterior, retirada da cerimônia de entrega da 9ª cascata de ultracentrífugas, ocorrida na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende, contextualiza a importância do contrato assinado há mais de 20 anos entre o CTMSP

e a Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Esse acordo foi fundamental para o desenvolvimento da tecnologia de enriquecimento de urânio e a fabricação das ultracentrífugas, promovendo não apenas avanços tecnológicos para a Marinha, mas também para o Brasil como um todo. A entrega da décima cascata, prevista para o ano seguinte, representaria a conclusão da primeira fase de implantação da Usina de Enriquecimento Isotópico de Urânio da INB (INB, 2021).

Em 2022, a finalização da primeira fase da Usina de Enriquecimento de Urânio em Resende, com a inauguração da 10ª cascata de ultracentrífugas, foi um marco significativo para o setor nuclear brasileiro. Este avanço, desenvolvido em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), possibilitou o alcance da capacidade de produção para atendimento de 70% da demanda das recargas anuais da usina nuclear Angra 1. Dessa forma, houve um acréscimo de, aproximadamente, 5% em relação à capacidade anterior, destacando o papel crucial da MB no domínio do ciclo do combustível nuclear. A tecnologia de ultracentrifugação, desenvolvida pelo CTMSP, posicionou o Brasil como um dos 13 países com capacidade industrial reconhecida para o enriquecimento de urânio, contribuindo significativamente para a independência energética do país (Brasil, 2022a).

A MB desempenhou um papel crucial na produção, instalação e comissionamento das cascatas de ultracentrífugas, com esforços para dominar essa tecnologia iniciados no final da década de 1970. A colaboração entre a Marinha e o IPEN foi essencial para o desenvolvimento inicial da tecnologia de ultracentrifugação. Em 2000, um contrato entre a Marinha e as INB formalizou a produção e instalação de dez cascatas, visando a independência do Brasil na produção de combustível nuclear. Essa iniciativa não apenas reforçou a presença da energia nuclear na matriz energética do país, mas também gerou avanços tecnológicos e industriais significativos (Brasil, 2022a).

O CTMSP inaugurou, em 2015, a planta piloto para produção de fibra de carbono, localizada em São Paulo, que foi a primeira do tipo no país. Este projeto é parte do PNM e foi desenvolvido em parceria com a USP, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e outros órgãos de pesquisa. A planta visa incentivar a indústria nacional a investir na produção de fibra de carbono, um material de elevada resistência mecânica, baixo peso e

resistente à corrosão, utilizado na fabricação de aeronaves e na indústria automobilística. Iniciados na década de 90, os estudos sobre fibra de carbono pelo CTMSP, refletem a contínua busca pela inovação e autossuficiência tecnológica intrínsecos ao PROSUB (ABIMDE, 2015).

Em outubro de 2019, a AMAZUL, a CNEN e o IPEN firmaram um termo de execução descentralizada para modernizar o Centro de Radiofarmácia em São Paulo. Desde maio de 2018, profissionais da AMAZUL trabalharam na resolução de não conformidades que haviam interditado duas linhas de produção, comprometendo a fabricação de radiofármacos. A colaboração com o IPEN permitiu regularizar a produção e fornecimento desses produtos essenciais para cerca de dois milhões de pacientes por ano. A equipe da AMAZUL revisou procedimentos de qualidade, manutenção, logística, planejamento e desenvolvimento de análises químicas, introduzindo novos métodos que resultaram em significativa economia de recursos. Também foi readequada a infraestrutura predial e laboratorial do IPEN às exigências da Anvisa, incluindo a manutenção de equipamentos e calibração de instrumentos. Assim, foi possível garantir a conformidade dos processos de fabricação de radiofármacos e o abastecimento contínuo do mercado nacional (Brasil, 2019).

Em julho de 2019, a AMAZUL reforçou suas parcerias para o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao ciclo do combustível nuclear, sob a supervisão da Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha (DDNM). Representantes da AMAZUL receberam a visita do reitor e de docentes do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). Durante a visita, foram apresentados os projetos da AMAZUL e discutidas colaborações para enfrentar desafios técnicos específicos, como o sistema de pesagem do hexafluoreto de urânio e a utilização de materiais anticorrosivos em tubulações (AMAZUL, 2019).

A colaboração entre a AMAZUL e o IMT começou em março de 2019, visando a customização de peças e materiais para atender às necessidades da Coordenadoria do Programa do Ciclo de Combustível Nuclear. Essa área gerencia projetos do ciclo de combustível nuclear, incluindo a Unidade de Produção de Hexafluoreto de Urânio. A AMAZUL, atuando como facilitadora, conectou as duas instituições para buscar soluções práticas e inovadoras (AMAZUL, 2019).

Outra parceria que vem ganhando notoriedade é a colaboração entre a Marinha do Brasil e o IPEN para treinar militares em atividades de pesquisa e produção de radioisótopos utilizando o reator IEA-R1. Esta colaboração visa operar o reator continuamente para a produção de radioisótopos, com o objetivo de formar até 40 operadores de reator e quatro profissionais de radioproteção. Projetado para operar com uma potência máxima de 5 MW, o reator é usado para várias finalidades, incluindo a produção de radioisótopos para a medicina nuclear. Desde setembro de 2023, essa parceria já formou 10 operadores da Marinha, sendo quatro seniores e seis operadores de reator, além de nove operadores da Força Naval e cinco do IPEN. Esses operadores serão responsáveis pela condução das operações e pelo treinamento de novas equipes. O curso, ministrado por profissionais experientes do Centro do Reator de Pesquisas e do Centro de Engenharia Nuclear do IPEN, em São Paulo, prepara os militares para os mais criteriosos testes de qualificação, de forma a garantir a operação segura e eficiente das plantas nucleares (IPEN, 2019). Trata-se de Militares sendo capacitados na operação de reatores nucleares, adquirindo expertise que é vital para o PNM. Este treinamento intensivo, oferecido por profissionais experientes do IPEN, assegura que os operadores militares estejam qualificados para garantir a segurança e eficiência na operação de plantas nucleares. Em contrapartida, a MB contribui significativamente para a sociedade ao ampliar a produção de radioisótopos.

Nesse contexto, destaca-se também o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), considerado um dos principais empreendimentos nucleares da atualidade. A CNEN depende da importação de todo o radioisótopo molibdênio-99 utilizado na geração do tecnécio-99m, essencial para a medicina nuclear. Em 2009, a paralisação de reatores no Canadá, Bélgica e Holanda gerou uma crise mundial no fornecimento desse radioisótopo, forçando o Brasil a buscar alternativas na Argentina e na África do Sul. Embora a crise tenha sido contornada, ficou evidente a necessidade de garantir a independência do Brasil na produção de radioisótopos (IPEN, 2014). A crise de 2021, que interrompeu a produção de radiofármacos pelo IPEN, por falta de insumos importados, e afetou cerca de 9 mil procedimentos médicos diários, ressaltou a fragilidade dessa dependência (Zaparolli, 2021).

Para enfrentar essa situação, o RMB, um empreendimento do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, gerido pela CNEN em parceria com a AMAZUL Tecnologias de Defesa S.A, busca tornar o país autossuficiente na produção de radioisótopos. O RMB conta com a participação tecnocientífica dos institutos da CNEN e do CTMSP (CNEN, 2024). O terreno para o RMB foi cedido pelo CTMSP, e o projeto está incluído no Plano Plurianual do Governo Federal, com um custo total estimado de US\$ 500 milhões. O projeto detalhado do RMB, concluído pela AMAZUL e pela empresa argentina INVAP, envolveu a elaboração de milhares de documentos técnicos. A expertise da AMAZUL em diversas áreas de engenharia e tecnologia nuclear foi fundamental para o desenvolvimento do projeto (AMAZUL, 2024).

Com a conclusão do RMB, o Brasil alcançará maior autonomia na produção de radioisótopos, podendo até se tornar um exportador, além de promover o desenvolvimento de novos radiofármacos. O RMB é um reator de pesquisa com diversas finalidades. Muitas das aplicações vistas no capítulo 3 serão materializadas por esse equipamento. Além disso, será utilizado na formação e treinamento na área nuclear em suas diferentes possibilidades (CNEN, 2024).

A MB, por meio da DGDNTM, mantém diversos acordos com universidades visando a prospecção do conhecimento científico e participa ativamente de encontros acadêmicos, seminários e simpósios. Abaixo serão apresentadas algumas dessas importantes interações.

Em 2016, a então SecCTM, atual DGDNTM, organizou o III Workshop de CT&I da Marinha e Universidades do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre. O evento contou com a participação de diversas Instituições de CT&I da MB, além de várias universidades, incluindo a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade de Caxias do Sul. Durante o workshop, as palestras destacaram a relevância do modelo da tríplice hélice, desenvolvido por Henry Etzkowitz e Loet Leydesdorff, que enfatiza a colaboração interdependente entre a academia, o governo e a indústria para a produção de novos conhecimentos, inovação tecnológica e desenvolvimento econômico sustentável (Brasil, 2016b).

Em 2017, a DGDNTM organizou o IV Simpósio de Ciência, Tecnologia e Inovação, em São Paulo, com o tema "Parceria Academia, Empresa e Governo: Propulsora do Desenvolvimento Científico, Tecnológico e de Inovação". O evento enfatizou a importância da interação entre a Marinha, a academia e a indústria, adotando o modelo de "Hélice Tríplice" para promover o desenvolvimento tecnológico e a inovação. A agenda incluiu palestras, painéis e uma exposição com estandes de instituições científicas e tecnológicas da Marinha e empresas da Base Industrial de Defesa, destacando a necessidade de atender a demandas prioritárias como sistemas de comando e controle, defesa cibernética, energia nuclear e plataformas navais (Brasil, 2017).

Em 2022, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), órgão vinculado ao Ministério da Educação e Cultura, e o CTMSP firmaram um acordo de cooperação técnica para investir na formação de pessoal e na investigação acadêmico-científica voltada ao setor nuclear. Esse acordo tem como objetivo desenvolver soluções tecnológicas para a criação de reatores empregados na produção de energia elétrica, em submarinos, e em setores como a agricultura e a saúde. No âmbito do acordo, a CAPES concederá duas bolsas de pós-doutorado e recursos financeiros para custeio. O Plano Nacional de Pós-Graduação 2011-2020 destacava a área de Energia Nuclear, incluindo a capacitação de pessoal, como um desafio crucial para o Brasil (Brasil, 2022b).

Em outubro de 2023, o Diretor-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha, acompanhado por sua equipe, realizou uma visita à cidade de Campinas com a finalidade de fortalecer parcerias e ampliar atividades científicas, tecnológicas e de inovação na região. Durante a visita, houve uma reunião com o prefeito de Campinas, onde foram discutidas possíveis colaborações e projetos conjuntos entre a Marinha e a administração municipal. A equipe da Marinha ressaltou a importância de apoiar iniciativas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico que pudessem beneficiar tanto a Marinha quanto a cidade e a região. A colaboração com os setores público, acadêmico e industrial foi enfatizada, destacando Campinas como um centro de inovação e tecnologia no Brasil. Posteriormente, a comitiva visitou a Unicamp para discutir possíveis colaborações em pesquisas científicas e a criação de programas de intercâmbio de pesquisas entre a Marinha e a universidade. A

colaboração entre a DGDNTM e a Unicamp foi vista como estratégica, pois abre diversas possibilidades de cooperação e compartilhamento de conhecimento em áreas de expertise comum. Na ocasião, o reitor da Unicamp destacou a relevância da Marinha no avanço tecnológico e no setor nuclear, associados à questão marítima e à defesa nacional, enfatizando a importância dessa parceria para a universidade. Além disso, a comitiva conheceu o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), responsável pelo Programa Sirius¹³ e por laboratórios nacionais em diversas áreas. A visita também envolveu uma ida à sede do Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (CIESP) em Campinas, onde foram debatidos temas ligados à inovação, gestão, aprimoramento de processos e desenvolvimento econômico da região. A presença da DGDNTM foi considerada uma oportunidade para fortalecer relações e criar oportunidades de negócios para as empresas filiadas ao CIESP (Fan, 2023).

Em junho de 2024, a DGDNTM realizou uma reunião estratégica com o Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Este encontro serviu para destacar a relevância da cooperação para o avanço e capacitação do setor nuclear brasileiro, destacando a sinergia entre as instituições para promover a inovação e o desenvolvimento tecnológico sustentável. A comitiva da Marinha, composta por autoridades da DGDNTM, visitou tanto a Escola Politécnica quanto o Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, ambos integrados ao Centro de Tecnologia da UFRJ. Durante a visita, a DGDNMT apresentou uma palestra sobre "O Sistema de CT&I da Marinha", enfatizando a importância das parcerias e do intercâmbio de conhecimentos para a atualização tecnológica e inovação. A reunião também incluiu visitas a diversos laboratórios da UFRJ, onde são desenvolvidas pesquisas em áreas estratégicas. O Laboratório de Monitoração de Processos, por exemplo, foca na "aplicação de tecnologias de computação em tempo real e inteligência artificial para a segurança e operação de usinas nucleares". Essa colaboração com a UFRJ destaca a relevância de parcerias robustas entre as Forças Armadas e instituições acadêmicas, estabelecendo um ciclo positivo de formação, progresso e inovação (EBC, 2024).

¹³ O Sirius é a maior e mais complexa infraestrutura científica do País, permitindo a realização de centenas de pesquisas acadêmicas e industriais anualmente (Fan, 2023).

A coordenadora do Departamento de Engenharia Nuclear da UFRJ, destacou que essa parceria é essencial para o progresso da engenharia nuclear no Brasil, beneficiando programas de graduação e pós-graduação e fortalecendo a pesquisa e a inovação tecnológica. Essa mesma coordenadora, que esteve nas instalações da DGDNTM em 2023, ressaltou que a MB tem direcionado recursos substanciais para enriquecer a formação de seus membros e incentivar pesquisas no setor nuclear brasileiro e que esse compromisso contínuo tem buscado soluções tecnológicas inovadoras que impulsionam a produção de energia elétrica, aprimoram a propulsão naval e trazem benefícios para a sociedade através de projetos como o reator multipropósito (EBC, 2024).

Em novembro de 2023 foi apresentada, pela Frente Parlamentar Mista da Tecnologia e Atividades Nucleares (FPN), a proposta do novo PNB. Nessa proposta o PNM ganha relevante destaque dada sua importância ao “desempenhar um papel crucial no avanço tecnológico e na segurança do país, ao mesmo tempo em que se alinha aos princípios de uso pacífico da energia nuclear” (FPN, 2023). Entre as diversas contribuições do programa da MB, a que vem gerando grandes expectativas é o desenvolvimento de pequenos geradores. Estes são compactos e modulares, podendo ser fabricados em instalações industriais e facilmente transportados e instalados em áreas remotas ou inadequadas para usinas nucleares convencionais, o que reduz custos e tempo de construção. Sua configuração flexível permite diversas aplicações, como geração de energia, produção de hidrogênio e dessalinização da água do mar (FPN, 2023). Essa versatilidade torna-os uma solução inovadora e adaptável para as necessidades energéticas do Brasil.

Conclui-se que a Marinha do Brasil (MB) tem estabelecido parcerias estratégicas que são cruciais para o desenvolvimento e a adaptação de tecnologias nucleares, tanto para fins militares quanto civis. A interação contínua do Programa Nuclear da Marinha (PNM) com a indústria e as universidades não apenas fortalece a capacidade de defesa nacional, mas também promove a inovação e o progresso em diversos setores civis. Tecnologias inicialmente desenvolvidas para usos bélicos, como sofisticados aparatos de transmissão de dados e a produção de fibra de carbono, foram apropriadas com sucesso pela indústria civil, beneficiando áreas como a química, mecânica e naval. Esses avanços tecnológicos, originados no âmbito do

PNM, demonstram a capacidade da MB de gerar benefícios que transcendem a esfera militar, contribuindo significativamente para a sociedade brasileira.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa se propôs a explicar a contribuição da Marinha do Brasil para o desenvolvimento científico e tecnológico na área nuclear, utilizando a abordagem da Hélice Tríplice como fundamentação teórica. Ao longo dos capítulos, foram explorados diversos aspectos dessa contribuição, desde os fundamentos legais e teóricos até as aplicações práticas da energia nuclear e o papel do Programa Nuclear da Marinha no avanço tecnológico do país.

No Capítulo 2, examinamos os fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa, incluindo as diretrizes legais e estratégicas para o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil e a Teoria da Hélice Tríplice. Concluímos que a aplicação dessa teoria é fundamental para entender a interação entre as três esferas mencionadas, mostrando que a inovação e o desenvolvimento tecnológico são impulsionados por uma colaboração efetiva. As diretrizes legais, como a Lei Complementar nº 97, e estratégicas, como a Política Nacional de Defesa e a Estratégia Nacional de Defesa, proporcionam uma base sólida para a atuação da MB no campo nuclear, ressaltando a importância da autonomia tecnológica e da integração interinstitucional..

O Capítulo 3 explorou as aplicações benignas da energia nuclear, destacando sua utilização na produção de energia elétrica, na medicina, na agricultura e na indústria. Concluímos que a energia nuclear, além de ser uma fonte limpa e eficiente de energia, possui diversas aplicações que beneficiam múltiplos setores da sociedade. Na medicina, por exemplo, as técnicas nucleares têm sido essenciais para diagnósticos e tratamentos, enquanto na agricultura, a irradiação de alimentos e o uso de isótopos estáveis têm contribuído para a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental. No setor industrial, a radiação é utilizada para melhorar processos e garantir a qualidade dos produtos, demonstrando a versatilidade e o impacto positivo da tecnologia nuclear.

No Capítulo 4, analisamos a origem, as parcerias e o apoio à pesquisa do Programa Nuclear da Marinha. Concluímos que o PNM tem sido fundamental para o avanço das tecnologias nucleares no Brasil, trabalhando em estreita colaboração com universidades e indústrias para alcançar avanços significativos. Essas parcerias não só fortalecem a capacidade de defesa nacional, mas também promovem inovações

que beneficiam a sociedade civil. O estudo revelou que a sinergia entre governo, academia e indústria, conforme proposto pela Teoria da Hélice Tríplice, é crucial para alcançar autonomia tecnológica e progresso sustentável. O PNM exemplifica uma gestão estratégica e integrada, onde os objetivos de defesa e progresso civil estão alinhados, resultando em benefícios mútuos.

A questão central da pesquisa foi: "As pesquisas científicas na área nuclear, realizadas pela Marinha do Brasil e suas parcerias com instituições nacionais, têm contribuído significativamente para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil no século 21?" A resposta a essa questão é afirmativa, como evidenciado pelos diversos exemplos de avanços tecnológicos e inovações decorrentes das atividades do PNM.

A conclusão desta pesquisa aponta para a importância contínua da colaboração interinstitucional e da integração entre os setores de defesa e civil. A Marinha do Brasil, ao adotar a abordagem da Hélice Tríplice, não apenas fortalece sua capacidade de defesa, mas também contribui significativamente para o progresso científico e tecnológico do país, promovendo inovações que beneficiam a sociedade como um todo.

Além disso, a pesquisa destaca a importância estratégica da energia nuclear para a autonomia tecnológica do Brasil. Em um cenário global onde a transferência de tecnologia nuclear é altamente restrita, o desenvolvimento autônomo torna-se essencial. A capacidade de desenvolver e implementar tecnologias nucleares de forma independente assegura que o Brasil não fique vulnerável à dependência tecnológica de outros países, fortalecendo assim sua soberania e segurança energética.

Futuras pesquisas poderiam explorar fontes de financiamento privado para projetos de pesquisa e desenvolvimento na área nuclear, ampliando ainda mais as parcerias e potencializando os benefícios para o Brasil. Tais recursos poderiam acelerar a obtenção dos resultados tendo em vista a redução da dependência de recursos orçamentários federais.

A pesquisa realizada reafirma o papel crucial da Marinha do Brasil no desenvolvimento nacional, demonstrando que, ao alavancar suas capacidades institucionais e fomentar a cooperação trilateral, é possível alcançar resultados

transformadores que impulsionam o progresso e a inovação. Esses avanços consolidam um arrasto tecnológico que transcende a área militar, trazendo amplos benefícios para a sociedade brasileira.

REFERÊNCIAS

- ABIMDE. **CTMSP inaugura Planta Piloto para produção de fibra de carbono.** 2015. Disponível em: <https://abimde.org.br/pt-br/noticias/ctmsp-inaugura-planta-piloto-para-producao-de-fibra-de-carbono/>. Acesso em: 23 mai. 2024.
- AIEA. **Nuclear technology and applications.** 2024. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-technology-and-applications>. Acesso em: 15 mai. 2024.
- ALMEIDA, Isabel. **Torre de Marfim.** Dicionário de termos literários. E-book. 2009. Disponível em: <https://edtl.fcsh.unl.pt/encyclopedia/torre-de-marfim>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- AMAZUL. **Amazul negocia parceria com Instituto Mauá de Tecnologia.** 2019. Disponível em: <https://www.amazul.mar.mil.br/amazul-negocia-parceria-com-instituto-maua-tecnologia>. Acesso em: 20 mai. 2024.
- AMAZUL. **Sobre a Amazul.** 2013. Disponível em: <https://www.amazul.mar.mil.br/empresa/sobre-a-amazul>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- AMAZUL. **Reator Multipropósito Brasileiro.** 2024. Disponível em: <https://www.amazul.mar.mil.br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/reator-multiproposito-brasileiro>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- BRASIL. **Decreto nº 5.161, de 10 de março de 1904.** Manda executar o Tratado de permuta de territórios e outras compensações, celebrado em 17 de novembro de 1903, entre o Brasil e a Bolívia. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1900-1909/d05161.html. Acesso em: 23 jul. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 12.706, de 8 de agosto de 2012.** Autoriza a criação da empresa pública Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. - AMAZUL e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12706.htm. Acesso em: 14 jul. 2024.
- BRASIL. **Lei Complementar nº 97, de 9 de junho de 1999.** Dispõe sobre as normas gerais para a organização, o preparo e o emprego das Forças Armadas. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp97.htm. Acesso em: 14 jul. 2024.
- BRASIL. Marinha do Brasil. **Amazul e Comissão Nacional de Energia Nuclear assinam nova parceria na produção de radiofármacos.** 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/noticias/amazul-e-comissao-nacional-de-energia-nuclear-assinam-nova-parceria-na-producao-de>. Acesso em: 15 mai. 2024.
- BRASIL. Marinha do Brasil. **EMA-301: Fundamentos Doutrinários da Marinha.** Brasília, DF: Estado-Maior da Armada, 2023a.

BRASIL. Marinha do Brasil. **EMA-310**: Estratégia de Defesa Marítima. Brasília, DF: Estado-Maior da Armada, 2023b.

BRASIL. Marinha do Brasil. **EMA-323**: Política Naval. Brasília, DF: Estado-Maior da Armada, 2019.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Histórico da DGDNTM**. 2016a. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dgdntm/node/49>. Acesso em: 14 jul. 2024.

BRASIL. Marinha do Brasil. **III Workshop de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha e Universidades do RS**. 2016b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/node/1470>. Acesso em: 14 jul. 2024.

BRASIL. Marinha do Brasil. **IV Simpósio de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha**. 2017. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/ieapm/simposio_cti. Acesso em: 14 jul. 2024.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Tecnologia desenvolvida pela Marinha fortalece o setor de energia nuclear do País**. 2022a. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/agenciadenoticias/tecnologia-desenvolvida-pela-marinha-fortalece-o-setor-de-energia-nuclear-do-pais#:~:text=Atualmente%2C%20gra%C3%A7as%20ao%20PNM%2C%20o,de%20Energia%20Nucleoel%C3%A9trica%20\(LABGENE\)](https://www.marinha.mil.br/agenciadenoticias/tecnologia-desenvolvida-pela-marinha-fortalece-o-setor-de-energia-nuclear-do-pais#:~:text=Atualmente%2C%20gra%C3%A7as%20ao%20PNM%2C%20o,de%20Energia%20Nucleoel%C3%A9trica%20(LABGENE)). Acesso em: 23 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Base Industrial de Defesa**. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/industria-de-defesa/base-industrial-de-defesa>. Acesso em: 11 mai. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa**. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020a. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado_e_defesa/pnd_end_congresso_.pdf. Acesso em: 11 mai. 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020b. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado_e_defesa/pnd_end_congresso_.pdf. Acesso em: 11 mai. 2024.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **CAPES e Marinha investem em formação no setor nuclear**. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/assuntos/noticias/capes-e-marinha-investem-em-formacao-no-setor-nuclear>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CNEN. **Aplicações da energia nuclear**. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/aplicacoesdaenergianuclear.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2024.

CNEN. **Nova fonte de Cobalto do CDTN entrou em atividade em 2019.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtn/pt-br/assuntos/noticias/nova-fonte-de-cobalto-do-cdtn-entrou-em-atividade-em-2019>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CNEN. **O que é o RMB.** 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/PAINEISRMB.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

ELETRONUCLEAR. **Espaço do conhecimento.** Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>. Acesso em: 11 mai. 2024.

EBC. **Associação defende expansão da geração nuclear para 25% até 2050.** 2016. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-09/geracao-nuclear-deve-aumentar-participacao-na-matriz-mundial-para-25-ate-2050>. Acesso em: 20 mai. 2024.

EBC. **Parceria estratégica:** Marinha fortalece setor nuclear em colaboração com a UFRJ. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202406/parceria-estrategica-marinha-fortalece-setor-nuclear-em-colaboracao-com-a-ufrj>. Acesso em: 20 mai. 2024.

ETZKOWITZ, H. **Networks of Innovation:** Science, Technology and Development in the Triple Helix Era. International Journal of Technology Management & Sustainable Development. 2002.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF L. **University in the global economy:** a Triple Helix of university-industry-government relations. London: Cassell Academic, 1997.

ETZKOWITZ, H.; ZHOU, C. **Hélice Tríplice:** inovação e empreendedorismo universidade-indústria-governo. Estudos Avançados, v. 31, n. 90. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/4gMzWdcjVXCMp5XyNbGYDMQ/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

FAN, Ricardo. **Marinha do Brasil:** DGDNTM reforça compromisso com CT&I em Campinas. Defesanet. 2023. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/naval/marinha-do-brasil-dgdntm-reforca-compromisso-com-cti-em-campinas/>. Acesso em: 10 mai. 2024.

FLORES, Diego. **O que é tríplice hélice:** empresas, governo e universidade. Quikdev. 2023. Disponível em: <https://quikdev.com.br/triplice-helice>. Acesso em: 10 mai. 2024.

FPN. **Proposta do Novo Programa Nuclear Brasileiro.** Brasília, DF. 2023. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/apresentacoes-de-convidados-em-2023/08-11-2023-o-potencial-da-energia->

nuclear-na-descarbonizacao-da-matriz-energetica-brasileira/proposta-para-o-novo-programa-brasileiro-fpn. Acesso em: 31 mai. 2024.

HEINSFELD, Adelar. **Fronteira Brasil/Argentina**: a questão de Palmas de Alexandre Gusmão a Rio Branco. São Paulo, SP: Méritos. 2007.

IPEN. **Falta de molibdênio-99 no Brasil preocupa especialistas**. 2014. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=39&campo=355. Acesso em: 10 mai. 2024.

IPEN. **Energia nuclear no Brasil**. 2015. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=40&campo=2243. Acesso em: 10 mai. 2024.

IPEN. **Parceria da Marinha forma operadores de reator de pesquisa**. 2024. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=39&campo=20968. Acesso em: 17 jun. 2024.

LANA, Luciana. **Submarinos**: defesa e desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: Versal, 2014.

TILL, Geoffrey. **Seapower**: a guide for the twenty-first century. 4. ed. New York, NY: Routledge, 2018.

UFSM. **Utilidades da energia nuclear**. 2018. Disponível em: <https://www.ufsm.br/midias/arco/11-utilidades-da-energia-nuclear>. Acesso em: 10 mai. 2024.

ZAPAROLLI, Domingos. **Radiofármacos sob ameaça**. Fio Cruz. 2021. Disponível em: <https://cee.fiocruz.br/?q=radiofarmacos-sob-ameaca>. Acesso em: 11 mai. 2024.