

GUSTAVO ANDRÉ PEREIRA GUIMARÃES

MAPA TECNOLÓGICO PARA  
REATORES DE TÓRIO NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Estudos Marítimos. Área de Concentração em Segurança, Defesa e Estratégia Marítima.

Orientador: Prof. Dr. NIVAL NUNES DE ALMEIDA

Rio de Janeiro

2019

G963m Guimaraes, Gustavo André Pereira  
Mapa tecnológico para reatores de tório no Brasil / Gustavo André  
Pereira Guimaraes. \_\_ Rio de Janeiro, 2019.  
168 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Guerra Naval, Programa de  
Pós-Graduação em Estudos Marítimos (PPGEM), 2019.  
Orientador: Nival Nunes de Almeida.

Bibliografia: f. 148 - 159.

1. Engenharia nuclear 2. Ciclo do Combustível 3. Processamento  
do combustível nuclear 4. Tório. 5. Mapeamento tecnológico – Tório.  
I. Escola de Guerra Naval (BRASIL). II. Título.

CDD 621.483

GUSTAVO ANDRÉ PEREIRA GUIMARÃES

MAPA TECNOLÓGICO PARA REATORES DE TÓRIO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Estudos Marítimos. Área de Concentração em Defesa, Governança e Segurança Marítimas.

Aprovada em 17 de dezembro de 2019

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida (Orientador/EGN)

---

Prof. Dr. CMG Ref<sup>o</sup> José Augusto Abreu de Moura (EGN)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria de Lourdes Moreira (IEN)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico humildemente esse trabalho ao meu País e à Marinha do Brasil.

Que ele seja útil para o desenvolvimento de outras pesquisas.

Que ele possa servir de insumo para outros projetos científicos e tecnológicos.

Que ele possa apoiar as nossas Estratégias Marítimas e contribuir para a Marinha do Amanhã e a Marinha do Futuro.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Ana Paula, pelo amor, amizade, companheirismo e serenidade.

Ao meu filho Enrico, cujo sorriso, amor e energia me renovam diariamente.

Aos meus pais, pela vida, pelo amor, cuidado, carinho e estímulo aos estudos.

À minha gerente no BNDES, Priscila Lisboa Nascimento Banhara, pelo apoio e compreensão no ambiente de trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida, um grande parceiro, um verdadeiro Mestre e exemplo a seguir.

Ao CMG (RM1) Leonardo Faria de Mattos, por ter me aberto as portas da Geopolítica e pelos sábios conselhos.

Ao SO-RM1-MC Valdir Jorge Luiz, cujo empenho em ajudar tornou o meu caminho menos árduo.

À Marinha do Brasil e, em especial, à Escola de Guerra Naval e ao seu Programa de Pós-graduação em Estudos Marítimos, pela oportunidade de adquirir conhecimento com um corpo docente de excelência, num ambiente altamente receptivo e agradável.

## EPÍGRAFE

*O homem é o lobo do homem.*

*Man is a wolf to man.*

*L'homme est un loup pour l'homme.*

*Homo homini lupus.*

*Thomas Hobbes (1588-1679).*

## RESUMO

O Brasil possui em seu território vastas reservas de tório, um mineral atômico mais leve que o urânio e que também possui a capacidade de ser utilizado como combustível em reatores nucleares. As históricas pressões da geopolítica nuclear desde o final da Segunda Guerra Mundial retardaram, mas não conseguiram impedir que o Brasil dominasse o ciclo completo do combustível urânio, desenvolvendo capacidade técnica autóctone e independência tecnológica no abastecimento de suas usinas. A segunda década do século XXI assiste ao contínuo crescimento mundial da demanda por energia elétrica, que provoca a expansão da geração nucleoeleétrica com a construção de novas plantas, conseqüentemente estimulando o aprimoramento tecnológico. Embora a energia nuclear seja uma energia de base que atende às demandas climáticas de redução do aquecimento global, traz consigo as questões controversas da proliferação nuclear e dos resíduos radioativos. Paralelamente, o cenário geopolítico aponta para mudanças, onde o tradicional cerceamento tecnológico parece reduzir-se diante da formação de fóruns internacionais com colaboração científica e tecnológica internacional em torno do desenvolvimento compartilhado de novos conceitos de reatores nucleares, classificados como de quarta geração pelo Fórum Internacional de Quarta Geração – GIF. Tanto as tecnologias anteriores como os novos modelos podem adotar o ciclo do combustível tório, ao invés do urânio ou urânio-plutônio, com adaptações. O Brasil possui experiência em pesquisa com o tório e considera a energia nuclear estratégica para o País, além de ser membro do GIF. Entretanto, um dos maiores empecilhos para a expansão do investimento em tecnologia nuclear no País é a dificuldade de inclusão da matéria na agenda política, com promoção de amplo debate que possa culminar no estabelecimento de políticas públicas consistentes para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação na área (PD&I). Neste contexto, surgiu a oportunidade para conceber um mapa tecnológico inédito propondo o desenvolvimento de reatores de tório no Brasil. A ferramenta Mapa Tecnológico sintetiza as informações necessárias para tomada de decisão em um documento único, fornecendo uma visão abrangente, resumida e de fácil compreensão. Mapas tecnológicos têm sido utilizados por países como a China e a Austrália bem como por organizações como a Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA para orientar políticas públicas de médio e longo prazo. O presente trabalho propõe um mapa tecnológico para construção de um reator de tório no Brasil, com o objetivo de viabilizar a formulação de políticas públicas específicas que contemplem o desenvolvimento de reatores nucleares no Brasil com tecnologia autóctone utilizando o ciclo do combustível tório.

**Palavras-chave: Mapa Tecnológico. Reator Nuclear. Tório. Ciclo do Combustível Tório. Reator de Tório.**

## ABSTRACT

Brazil boasts its vast thorium reserves, an atomic mineral lighter than uranium, which also can be used as a fuel in nuclear reactors. The historical nuclear geopolitical pressures since the end of World War II have slowed down, but they have not been able to prevent Brazil from dominating the entire uranium fuel cycle, developing indigenous technical capacity and technological independence in the supply of its plants. The second decade of the 21st century sees the continuous growth of global electricity demand, rising nuclear generation by constructing new plants, thus stimulating technological improvement. Although nuclear is a source of baseload energy that meets climate demands for reducing global warming, it brings the controversial issues of nuclear proliferation and radioactive waste. At the same time, the geopolitical scenario points to changes, where the traditional technological curtailment seems to be reduced by the formation of international forums with scientific and technological collaboration on the development of the fourth generation new nuclear energy systems, named by the Generation IV International Forum – GIF. However, one of the biggest obstacles to boost the investment in nuclear technology in the country is the difficulty to place this topic on the political agenda, with the promotion of a broad debate that may culminate in the establishment of consistent public policies for Research, Development and Innovation in the area (RD&I). In this context, the opportunity arises to design an unprecedented technology roadmap proposing the development of thorium reactors in Brazil. The Technology Roadmap tool summarizes the information needed for decision making into a single document, providing a comprehensive, condensed easy-to-understand view. Technology roadmaps have been used by countries such as China and Australia as well as by organizations such as the International Atomic Energy Agency – IAEA to guide medium- and long-term public policies. This work proposes a technology roadmap to build a thorium reactor in Brazil, with the objective of enabling the formulation of specific public policies that contemplate the development of nuclear reactors in Brazil with indigenous technology using the thorium fuel cycle.

**Keywords: Technology Roadmap. Nuclear Reactor. Thorium Fuel Cycle. Thorium Reactor. Public Policy.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Linha do Tempo das Primeiras Bombas Nucleares do Clube Atômico.	40
Figura 1.2 – Linha do Tempo dos Fatos Mais Relevantes na Área Nuclear Brasileira durante o governo JK.	50
Figura 2.1 – Espectro Eletromagnético.	65
Figura 2.2 – Capacidade de Penetração de Emissões de Raios X e Radioativas.	66
Figura 2.3 – Ciclo do Combustível Nuclear – Confeção do Elemento Combustível.	81
Figura 2.4 – Distribuição Mundial de Reservas de Tório em Milhares de Toneladas.	86
Figura 2.5 – O nêutron gerado na fissão nuclear.	88
Figura 2.6 – As 4-5 Gerações de Reatores.	93
Figura 2.7 – Histórico e Status dos Membros do GIF.	106
Figura 2.8 – Conceito do Molten Salt Reactor como Reator de Quarta Geração.	108
Figura 3.1 – Formato de um TRM genérico.	113
Figura 3.2 – TRM de Longo Prazo referente à Digestão Anaeróbica de Vinhaça.	115
Figura 3.3 – Roadmap elaborado pela CAS para o Desenvolvimento de Materiais relacionados à Energia.	116
Figura 3.4 – Roadmap elaborado pela CAS para Novas Plantas Nucleares e Tecnologia de Tratamento de Resíduos Nucleares.	117
Figura 3.5 – Roadmap elaborado pela CAS para Instalações para Grandes Comunidades Científicas no campo de alta tecnologia com laser.	118
Figura 3.6 – Roadmap elaborado pela CAS no campo de alta tecnologia.	119
Figura 3.7 – Roadmap elaborado pela AIEA em parceria com a Organização Mundial da Saúde para as quatro fases de um Programa Nacional para Controle do Câncer.	120
Figura 3.8 – Roadmap elaborado pelo INPRO / AIEA – SYNERGIES.	121
Figura 3.9 – Roadmap elaborado pelo NEA / OCDE para a Energia Nuclear.	122
Figura 3.10 – Roadmaps elaborados pelo GIF (2002 e atualizado em 2013).	123
Figura 3.11 – Roadmaps elaborados pelo GIF (2002 e atualizado em 2014).	124
Figura 3.12 – Principais Subáreas da Ciência Política.	125
Figura 3.13 – O Processo de Formulação de Políticas Públicas – Policymaking.	126
Figura 3.14 – Elementos do Processo de Formulação de Políticas Públicas.	126
Figura 3.15 – Triângulo das Políticas Públicas em Energia.	127
Figura 3.16 – Plano de 6 Passos para Elaboração de um Mapa Tecnológico.	129
Figura 3.17 – Processo de Roadmapping para o TRM da Marinha Real Australiana.	130
Figura 3.18 – TRM da Marinha Real Australiana para o Período 2010-2030.	131
Figura 3.19 – Marcos e Fases Necessárias para o Desenvolvimento de uma Infraestrutura de Energia Nuclear.	132
Figura 3.20 – Proposta Inicial de Mapa Tecnológico.	140
Figura 3.21 – Mapa Tecnológico para Reator de Tório no Brasil.	141
Figura Ap1.1 – Versão da Tabela Periódica com a média dos pesos atômicos.	160
Figura Ap1.2 – Versão da Tabela Periódica com <u>intervalos</u> dos pesos atômicos.	161
Figura Ap1.3 – Carta de Nuclídeos – Visão Geral.	162
Figura Ap1.4 – Carta de Nuclídeos – Limite de Estabilidade.	162
Figura Ap1.5 – Carta de Nuclídeos – Hidrogênio (H).	163
Figura Ap1.6 – Carta de Nuclídeos –Tório (Th) e Urânio (U).	163
Figura Ap3.1 – Esquema do Reator.	166
Figura Ap4.1 – TMSR-SF2.	167
Figura Ap5.1 – TMSR-LF1.	168

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Abreviações utilizadas na figura 1.2 e respectivos sites de acesso.	50
Quadro 1.2 – Tipos de Reatores Operacionais e em Construção em 31/12/2018.	58
Quadro 2.1 – Partículas Nucleares.	66
Quadro 2.2 – Distribuição dos isótopos do urânio encontrados na natureza.	70
Quadro 2.3 – Fontes de combustíveis nucleares.	73
Quadro 2.4 – Classificação do urânio a partir do teor de urânio-235 (%).	75
Quadro 2.5 – Componentes dos Elementos Combustíveis de Angra I e II.	82
Quadro 2.6 – Vantagens e Desafios do Ciclo do Combustível Tório.	87
Quadro 2.7 – Medidas de Potência e Eficiência de uma Planta Nuclear.	91
Quadro 2.8 – Medidas de Potência e Eficiência da CNAAA.	92
Quadro 2.9 – Principais características dos reatores de cada geração.	93
Quadro 2.10 – Principais Referências de Reatores de Primeira Geração.	96
Quadro 2.11 – Reatores de Primeira Geração de Água Leve (LWR) Produzidos pelo Laboratório Nacional Argonne.	99
Quadro 2.12 – Sistemas de Reatores Nucleares Comprovados e Disponíveis Comercialmente para Exportação (ref.: 01/01/1982).	100
Quadro 2.13 – Outros Sistemas de Geração Nucleoelétrica Plenamente Desenvolvidos (ref.: 01/01/1982).	101
Quadro 2.14 – Sistemas de Reatores Nucleares Avançados ou Parcialmente Desenvolvidos (ref.: 01/01/1982).	102
Quadro 2.15 – Reatores Nucleares de 3ª Geração.	103
Quadro 2.16 – Reatores Nucleares de 3ª Geração Plus (Gen III+).	104
Quadro 2.17 – Exemplos de Pesquisa do Uso do Tório em Reatores de Potência.	105
Quadro 2.18 – Tecnologias de Reatores Gen IV x Membros do GIF.	107
Quadro 2.19 – Metas para os sistemas de energia nuclear de IV geração.	107
Quadro 3.1 – Estruturação de Mapas segundo Cosner (2007).	112
Quadro 3.2 – Descrição das camadas do TRM genérico.	114
Quadro 3.3 – Taxonomia para Elaboração de TRM para a Produção de Biogás a partir de Vinhaça.	115
Quadro 3.4 – Publicações selecionadas da série “Roadmap to 2050” da Academia Chinesa de Ciências.	116
Quadro 3.5 – Classificação dos Tópicos Relevantes para Inclusão no TRM-RT.	134
Quadro 3.6 – Agrupamento dos 14 Tópicos Selecionados para compor as Camadas do TRM-RT.	136
Quadro 3.7 – Tópicos Agrupados em Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas.	136
Quadro 3.8 – Tópicos Agrupados em Ações Intermediárias.	137
Quadro 3.9 – Tópicos Agrupados em Ações Primordialmente Técnicas.	137
Quadro 3.10 – Legenda de cores do Mapa Tecnológico.	139
Quadro Ap2.1 – Classificação da Criticalidade k.	164
Quadro Ap2.2 – Fator de Reprodução $\eta$ .	165
Quadro Ap3.1 – Tabela de Informações Básicas.	166
Quadro Ap3.2 – Informações Operacionais.	166
Quadro Ap4.1 – TMSR-SF0 VS TMSR-SF1.	167
Quadro Ap4.2 – TMSR-SF2.	167
Quadro Ap5.1 – TMSR-LF1.	168
Quadro Ap5.2 – TMSR-LF2.	168

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABACC	Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ACPR	Advanced China Pressurized Reactor
ACR	Advanced CANDU Reactor
ADS	Accelerator-driven Systems
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
AHWR	Advanced Heavy Water Reactor
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALPR	Argonne Low Power Reactor
AMFORP	American and Foreign Power
ANL	Argonne National Laboratory
ANM	Agência Nacional de Mineração
APHWR	Advanced Pressurized Heavy-Water Reactor
APR	Advanced Power Reactor
APWR	Advanced Pressurized Water Reactor
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
ASTR	Argonne Thermal Source Reactor
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (alemão)
BID	Base Industrial de Defesa
BORAX	BOiling water ReActor eXperiment
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium
CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CAS	Chinese Academy of Science / Academia Chinesa de Ciências
CCT	Ciclo do Combustível Tório
CDPNB	Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CEA	Comissão de Energia Atômica
CEI	Comunidade dos Estados Independentes
CEME	Comissão de Exportação de Materiais Estratégicos
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNBB	Conferência Nacional de Bispos do Brasil
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina)
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNP	Conselho Nacional de Pesquisas
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisas
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
CP 01	Chicago Pile One
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito
CSN	Conselho de Segurança Nacional

CT&I	Ciência, Tecnologia e Inovação
CTMSP	Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
DLA	Defense Logistics Agency
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DOE	Department of Energy
DU	Depleted Uranium / Urânio Empobrecido
DUA	Diuranato de Amônio
EBR	Experimental Breeder Reactor
EBWR	Experimental Boiling Water Reactor
EC	Elemento Combustível
EDF	Électricité de France (francês)
EMA	Estratégia da Marinha
EMFA	Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPR	European Pressurised Reactor
EQ	Escola de Química
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor
ESG	Escola Superior de Guerra
ETE	Escola Técnica do Exército
ETR	Elementos Terras Raras
EUA	Estados Unidos da América
EURATOM	EUROpean ATOMIC Energy Community
FBR	Fast Breeder Reactor
FCN	Fábrica de Combustível Nuclear
FDR	Franklin Delano Roosevelt
FUNAI	Fundação Nacional do Índio
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S/A ou simplesmente Eletrobrás Furnas
GCR	Gas Cooled Reactor
GE	General Electric
GEN I	First Generation Nuclear Reactor / Reator Nuclear de 1ª Geração
GEN II	Second Generation Nuclear Reactor / Reator Nuclear de 2ª Geração
GEN III	Third Generation Nuclear Reactor / Reator Nuclear de 3ª Geração
GEN III+	Third "Plus" Generation Nuclear Reactor / Reator Nuclear de 3ª Geração "Mais" ou "Plus"
GEN IV	Fourth Generation Nuclear Reactor / Reator Nuclear de Quarta Geração
GFR	Gas-Cooled Fast Reactor
GIF	Generation IV International Forum / Fórum Internacional de Quarta Geração
GSI	Gabinete de Segurança Institucional
GT	Grupo de Trabalho
GTI	Grupo de Trabalho Interministerial
GTI-ME	Grupo de Trabalho Interministerial MME–MCT de Minerais Estratégicos
GT-MHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor
GTPR	Grupo de Trabalho do Reator de Potência
HC-BWR	High Conversion Boiling Water Reactor

HEU	High Enriched Uranium
HTGR	High-Temperature Gas-cooled Reactor
HTR	High-Temperature Reactor
HWGCR	Heavy Water Gas-Cooled Reactor
HWLWR	Heavy Water Light Water Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency / Agência Internacional de Energia
IEA	Instituto de Energia Atômica (BR)
ICT	Instituição de Ciência e Tecnologia
IME	Instituto Militar de Engenharia
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INFCIS	Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System
INPRO	International Project on Innovative Nuclear Reactors
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPR	Instituto de Pesquisas Radioativas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JK	Juscelino Kubitshek
KHNP	Korea Hydro Nuclear Power
LABGENE	Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica
LDA	Lâmina d'água
LEU	Low Enriched Uranium
LFR	Lead-Cooled Fast Reactor
LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactor
LWGR	Light-Water-cooled Graphite-moderated Reactor
LWR	Light-Water Reactor / Reator [nuclear] de/a Água Leve
MA	Marinha do Amanhã
MAGNOX	MAGnesium Non-Oxidising
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MF	Marinha do Futuro
MME	Ministério das Minas e Energia
MOX	Mixed Oxide
m-p	Matéria-prima
MP	Marinha do Presente
MSR	Molten Salt Reactor
MSFR	Molten Salt Fast Reactor
MTR	Materials Testing Reactor
NAFTA	North American Free Trade Agreement
NEA	Nuclear Energy Agency / Agência de Energia Nuclear
NFC	Nuclear Fuel Cycle
NRX	National Research Experimental
NSG	Nuclear Suppliers Group / Grupo dos Países Supridores
NU	Natural Uranium

NWS	Nuclear Weapon States / Estados Nuclearmente Armados
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PATN	Programa Autônomo de Tecnologia Nuclear
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PHWR	Pressurized Heavy-Water Reactor
PNB	Programa Nuclear Brasileiro
PNE	Plano Nacional de Energia
PNM	Programa Nuclear da Marinha
PRONUCLEAR	Programa de Recursos Humanos para o Setor Nuclear
PROSUB	Programa de Desenvolvimento de Submarinos
PUREX	Plutonium Uranium Recovery by Extraction
PWR	Pressurized Water Reactor / Reator de Água Pressurizada
R&D	Research and Development
RD&I	Research, Development and Innovation
RH	Recursos Humanos
RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
RMBK	Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy (russo)
RT	Reator de Tório
SCTMB	Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil
SCWR	Supercritical-Water-Cooled Reactor
SFR	Sodium-Cooled Fast Reactor
SGHWR	Steam-Generating Heavy Water Reactor
SIPRON	Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SMR	Small Modular Reactor
SN-BR	Submarino com Propulsão Nuclear Brasileiro
STR	Submarine Thermal Reactor
SWR	Siedewasserreaktor (alemão)
SYNERGIES	Synergistic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability
TFC	Thorium [based] Fuel Cycle
ThDEPO	World Thorium Deposits and Resources
TMI	Three Miles Island
TMSR-LF	Thorium Molten Salt Reactor - Liquid Fuel
TMSR-SF	Thorium Molten Salt Reactor - Solid Fuel
TNP	Tratado de Não-Proliferação
TRIGA	Training Research Isotope General Atomic
TRISO	TRI-structural ISO-tropic
TRM	Technology Roadmap / Mapa Tecnológico

TRM-RT	Mapa Tecnológico para Reator de Tório
TRU	Elementos Transurânicos
UDEPO	World Distribution of Uranium Deposits
UE	União Europeia
UFC	Uranium Fuel Cycle
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
ULA	União Latino-americana
UN	United Nations
UNat	Natural Uranium
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz (francês)
U-PuFC	Uranium-Plutonium Fuel Cycle
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
US	United States
USEXA	Unidade Piloto [Produtora] de Hexafluoreto de Urânio
USS	United States Submarine
USSR	Union of Soviet Socialist Republics
VHTR	Very-High-Temperature Reactor
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor (russo)
WHO	World Health Organization
WWER	Water-Water Energetic Reactor
ZEEP	Zero Energy Experimental Pile
ZOÉ	[pour puissance] ZÉRO, Oxide d'uranium [et] Eau lourde (francês)
ZPR	Zero Power Reactor

## LISTA DE SÍMBOLOS

92-U-235	Isótopo (nuclídeo) do urânio; urânio-235
92-U-238	Isótopo (nuclídeo) do urânio; urânio-238
94-Pu-239	Isótopo (nuclídeo) do plutônio; plutônio-239
A	Nº de Massa
$\alpha$	Partícula alfa
Å	Ângstrom ( $10^{-10}$ metros)
$\beta^-$	Partícula beta
$\beta^+$	[Partícula] Pósitron
Bq	Becquerel
c	velocidade da luz
Ci	Curie
E	Energia
f	Frequência
$\gamma$	Radiação gama
h	Constante de Planck
k	Criticalidade
m	Massa
$\eta$	Fator de Reprodução
Hz	Hertz
K-25	Unidade de difusão gasosa de Oak Ridge
kW	Kilowatt
$\lambda$	Comprimento de onda
m	Massa
MeV	Mega elétron-volt
$\mu\text{m}$	micrômetros ( $10^{-6}$ metros)
MW	Megawatt
MWd	Megawatt days
MWd/t	Megawatt days per metric ton
MWe	Megawatt electric
MWt	Megawatt thermal
N	Nº de Nêutrons
n	Nêutron
nm	nanômetro ( $10^{-9}$ metros)
P	Nº de Prótons
S-50	Unidade de difusão térmica líquida de Oak Ridge
SI	Sistema Internacional
$t_{1/2}$	[tempo de] meia-vida
ton	Tonelada
X-10	Reator-piloto para a produção de plutônio em Oak Ridge
Y-12	Unidade de separação eletromagnética de Oak Ridge
Z	Nº Atômico ou Nº de Prótons

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1. Geopolítica	23
1.1. A Evolução das Teorias Geopolíticas	23
1.1.1.Os Fundadores da Geopolítica.	23
1.1.2.Geopolíticos Clássicos	24
1.1.3.Outras Teorias Geopolíticas	26
1.2. Geopolítica Energética e de Materiais Estratégicos	28
1.3. Geopolítica Nuclear	34
1.4. Geopolítica Brasileira	42
1.5. Geopolítica Nuclear Brasileira	47
1.5.1.Da Fase das Areias Monazíticas até o contrato de Angra I	47
1.5.2.Da decisão de Angra I até o Programa Nuclear Brasil-Alemanha	52
1.5.3.Programa Nuclear Paralelo e o Domínio do Ciclo do Combustível	54
2. Tecnologia de Reatores Nucleares para Geração Nucleoelétrica	59
2.1. Da descoberta do Urânio até a Radioatividade Natural.	60
2.2. Evolução da compreensão do átomo até a Fissão Nuclear controlada.	66
2.3. Tecnologia de Reatores Nucleares para Geração Nucleoelétrica	72
2.3.1.Combustível Nuclear (Nuclear Fuel)	72
2.3.2.Ciclo do Combustível Nuclear – Nuclear Fuel Cycle	76
2.3.2.1.Mineração e Beneficiamento.	78
2.3.2.2.Conversão	79
2.3.2.3.Enriquecimento Isotópico	80
2.3.2.4.Reconversão e Fabricação de Pastilhas	80
2.3.2.5.Destinação Final	83
2.3.3.Ciclo do Combustível Tório (CCT) – Thorium [based] Fuel Cycle (TFC)	84
2.3.3.1.Mineração e Beneficiamento – Tório.	85
2.3.3.2.Tório: Vantagens e Desafios Operacionais.	87
2.3.3.3.Destinação Final – Tório	88
2.3.4.Demais Componentes e Materiais Principais de um Reator Nuclear	88
2.3.4.1.Moderador (Moderator)	89

2.3.4.2.Refrigerante (Coolant)	89
2.3.4.3.Absorvedores ou Controladores	90
2.3.4.4.Blindagem	90
2.4. Tipos de Reatores Nucleares	91
2.4.1.Os Reatores Nucleares de 1ª Geração – Geração I (GEN I)	94
2.4.2.Os Reatores Nucleares de 2ª Geração – Geração II (GEN II)	99
2.4.3.Reatores Nucleares de 3ª Geração – Geração III / III+ (GEN III / III+)	102
2.4.4.Os Reatores Nucleares de 4ª Geração – Geração IV / Gen IV	106
3. Mapa Tecnológico para Construção de um Reator de Tório No Brasil	110
3.1. Introdução ao Mapa Tecnológico – Technology Roadmap (TRM)	110
3.1.1.Modelos de Mapas Tecnológicos	111
3.1.2.Benchmarking de Technology Roadmap	114
3.1.2.1.Pesquisa da EQ – UFRJ	114
3.1.2.2.Roadmaps da Academia Chinesa de Ciências – CAS	115
3.1.2.3.Publicações da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA em parceria com a Organização Mundial da Saúde – OMS	119
3.1.2.4.Publicações da Agência Internacional de Energia – IEA/NEA/OCDE	121
3.1.2.5.Fórum Internacional de Quarta Geração – GIF	123
3.2. Políticas Públicas	124
3.2.1.Ciclo das Políticas Públicas	126
3.2.2.Mapas Tecnológicos para Políticas Públicas	128
3.2.3.Insumos para Construção do Mapa Tecnológico	131
3.3. Elaboração do Mapa Tecnológico	139
3.3.1.Proposta Inicial de Mapa Tecnológico	139
3.3.2. O Mapa Elaborado	141
CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
REFERÊNCIAS	148
APÊNDICE 1	160
APÊNDICE 2	164
APÊNDICE 3	166
APÊNDICE 4	167
APÊNDICE 5	168

## INTRODUÇÃO

O Brasil possui vastas reservas de tório. O banco de dados da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA coloca o País como detentor da maior reserva torífera mundial, muito embora o Brasil tenha oficialmente prospectado apenas um terço do território nacional para minerais atômicos. Tório é um elemento químico mais leve que o urânio e três a quatro vezes naturalmente mais abundante no planeta, além de poder ser utilizado como combustível em reatores nucleares. Tal abundância cedo despertou a atenção estadunidense pelo interesse nas areias monazíticas do Espírito Santo – fonte mineral de urânio, tório e terras raras, traduzindo-se em históricas pressões geopolíticas sobre a área nuclear desde o final da Segunda Guerra Mundial.

As primeiras ultracentrífugas brasileiras para enriquecimento de urânio foram encomendadas secretamente à Alemanha pelo Almirante Álvaro Alberto ainda nos anos 1950, mas permaneceram retidas durante anos na Europa por pressão estadunidense. A geopolítica nuclear conseguiu retardar, mas não impediu a criação de um Programa Nuclear Brasileiro. A partir da instalação de usinas nucleares no Brasil e com o esforço do Programa Nuclear da Marinha – PNM, o País desenvolveu a tecnologia de ultracentrifugação isotópica para enriquecimento de urânio, alcançando o domínio completo do ciclo do combustível e, conseqüentemente, autonomia tecnológica para abastecimento do seu parque nuclear. Paralelamente, entre as décadas de 1960 e 1980, buscou desenvolver o ciclo do combustível baseado no tório e reatores de tório, decidindo bruscamente encerrar a pesquisa, assim como ocorreu nos Estados Unidos. Somente no final do século XX a comunidade científica internacional voltaria a debater regularmente suas pesquisas em torno do uso do tório em reatores nucleares.

A segunda década do século XXI assistiu ao contínuo crescimento mundial da demanda por energia elétrica, que provocou a expansão da geração nucleoe elétrica com a construção de novas plantas e conseqüentemente estimulou a pesquisa científica para aprimoramento tecnológico. Embora a energia nuclear seja uma energia de base que atende às demandas climáticas de redução do aquecimento global, traz consigo as questões controversas da proliferação nuclear. Paralelamente, o cenário geopolítico aponta para mudanças, onde o tradicional cerceamento tecnológico parece reduzir-se diante da formação de fóruns internacionais para colaboração científica e tecnológica em torno do desenvolvimento compartilhado de novos conceitos de reatores nucleares, classificados como de quarta geração pelo Fórum Internacional de Quarta Geração – GIF, do qual o Brasil é país-membro (não ativo).

Tanto as tecnologias anteriores como os novos modelos podem adotar o tório em seus materiais estruturantes ou operar com o ciclo do combustível tório, ao invés do urânio ou urânio-plutônio, com as devidas adaptações. Reatores que utilizam o tório como combustível possuem desafios tecnológicos a serem vencidos e representam uma significativa promessa de fonte nucleoeletrica limpa e resistente à proliferação nuclear. Há vários modelos sendo desenvolvidos no mundo em países como os Estados Unidos, China, Rússia, Japão, Índia e membros da Comunidade Europeia. Espera-se que entre as décadas de 2030 e 2050, as primeiras plantas comerciais com reatores de tório estejam operando ao redor do mundo. O Brasil possui experiência em pesquisa com o tório e considera a energia nuclear estratégica para o País, além de ser membro do GIF. Embora atualmente esteja desenvolvendo importantes projetos nucleares, como a propulsão nuclear para o submarino SN-BR (Projetos PROSUB e LABGENE) e um reator multipropósito para produção de radiofármacos (Projeto RMB), ainda não possui nenhum projeto específico para aproveitamento do tório como combustível em reatores nucleares.

Um dos maiores empecilhos para expansão do investimento em tecnologia nuclear no País é a dificuldade de inclusão da matéria na agenda política, capaz de sensibilizar os públicos de interesse, promovendo um amplo debate que possa culminar no estabelecimento de políticas públicas consistentes de PD&I na área. A radioatividade é um fenômeno natural, pouco compreendido fora da comunidade industrial, científica, acadêmica e de profissionais que atuam na área. Através da sua descoberta, passamos a compreender melhor a estrutura do núcleo do átomo e como utilizar as propriedades radioativas para fins pacíficos. A área nuclear envolve alta tecnologia de uso dual, sendo seu domínio considerado estratégico para a defesa do País. Neste contexto, surge a oportunidade de apresentação da proposta de desenvolvimento e construção de reatores de tório com tecnologia nacional através de um mapa tecnológico.

Mapas Tecnológicos – TRM (Technology Roadmaps) são ferramentas gráficas utilizadas para condensar informações estratégicas, vinculadas a um campo específico ou grande área tecnológica, num período determinado, projetando expectativas e/ou necessidades e/ou ações a serem tomadas em datas futuras. Mapas tecnológicos têm sido utilizados por países como a China e a Austrália bem como por organizações como a AIEA e a NEA/OCDE para orientar políticas públicas de médio e longo prazo. O desenvolvimento tecnológico da área nuclear precisa fazer parte de uma Política de Estado, que deve ser suportada independente do viés político no governo. Caso contrário, haverá atrasos e perda de continuidade, com consequentes prejuízos e perdas. O Brasil possui experiência em tais situações, dado os atrasos e percalços para conclusão das usinas de Angra II e Angra III.

O objetivo geral consistiu em elaborar um mapa tecnológico para construção de um reator nuclear no Brasil utilizando o tório como principal combustível, identificando as ações críticas, fornecendo informações técnicas relevantes capazes de dar suporte para uma tomada de decisão de investimento complexa e de longo prazo. Os objetivos específicos consistiram em:

- Demonstrar a importância geopolítica da área nuclear;
- Mostrar a tradição histórica brasileira na área nuclear;
- Identificar historicamente marcos do desenvolvimento científico da radioatividade e da área nuclear para a atual compreensão sobre o átomo, seus componentes e os elementos químicos;
- Descrever de forma simplificada elementos tecnológicos sobre reatores nucleares e o ciclo de combustível;
- Mostrar o potencial do tório diante do urânio e do plutônio;
- Utilizar o mapa tecnológico como ferramenta para apresentação de uma proposta baseada em tecnologia complexa para inserção na agenda pública.

O presente trabalho foi estruturado em três capítulos, com o seguinte teor:

—O capítulo 1 aborda a geopolítica mundial propositalmente passando pelos fundadores e pelos clássicos teóricos do poder marítimo e do poder terrestre. Em seguida, debruça-se em questões mais específicas de geopolítica, como as de minerais e minérios estratégicos até especificamente a geopolítica nuclear. Da visão abrangente mundial migra para a geopolítica brasileira e seus principais pensadores, culminando na geopolítica nuclear brasileira.

—O capítulo 2 parte da evolução histórica do desenvolvimento do conhecimento do átomo descrevendo as descobertas relacionadas à radioatividade e o seu papel na compreensão dos átomos, dos elementos químicos, das partículas e da ciência nuclear. Com este alicerce, apresenta as tecnologias de reatores nucleares em suas quatro gerações, as etapas do ciclo do combustível nuclear e conclui destacando o papel do tório, seu ciclo de combustível e reatores capazes de utilizá-lo em sua operação.

—O capítulo 3 apresenta a ferramenta mapa tecnológico ou *technology roadmap*, seu potencial e versatilidade, bem como sua aplicabilidade na sumarização de ideias concernentes ao desenvolvimento de políticas públicas. Expõe os desafios existentes do processo de formulação das políticas públicas, principalmente de inserção de projetos tecnológicos complexos no *agenda setting*. Finalmente, disponibiliza o passo-a-passo sucinto utilizado na

construção do mapa tecnológico para construção do primeiro reator de tório no Brasil, assim como o próprio mapa.

—O Apêndice 1 apresenta a tabela periódica comparativamente à carta de nuclídeos, destacando as diferenças.

—O Apêndice 2 traz conceitos selecionados e fórmulas adicionais referentes à tecnologia de reatores nucleares de caráter um pouco mais avançado para o escopo deste trabalho.

—Os Apêndices de 3 a 5 fornecem exemplos com dados técnicos de modelos de reatores nucleares capazes de utilizar o tório como combustível, que estão sendo efetivamente desenvolvidos.

## 1. Geopolítica

A geopolítica é um ramo da Ciência Política que estuda o poder de um Estado tendo como insumo básico a geografia, sendo a territorialidade o seu maior objeto. O poder, por sua vez, pode ser desdobrado em poder econômico, poder militar, poder político, poder psicossocial (BRASIL, 1987) e outras denominações atribuídas aos países em sua tomada de decisão. O estudo sistemático da geopolítica só acontece a partir do século XX. Segundo Lacoste (2012, *tradução nossa*),

[...] a palavra “geopolítica” refere-se a tudo relacionado às rivalidades de poder, onde se exercem influências políticas em territórios e, conseqüentemente, nas comunidades que nelas vivem. A geopolítica é, portanto, o conjunto de observações e de raciocínios estratégicos, geográficos e históricos que permitem uma compreensão melhor dos conflitos<sup>1</sup>.

Coutau-Bégarie (2010) faz uma longa digressão confrontando a geopolítica com a geoestratégia, examinando pontos de confluência e distinção. Dado que a sua obra se intitula *Tratado de Estratégia*, o termo geoestratégia ganha relevo e clara definição frente à geopolítica. Seguindo sua definição:

Geoestratégia é uma estratégia fundamentada na exploração sistemática das possibilidades oferecidas pelos grandes espaços em termos de extensão, de forma, de topografia, de recursos de toda ordem (COUTAU-BÉGARIE, 2010, p. 571).

Associada à concepção do geopolítico brasileiro coronel Golbery do Couto e Silva (1911-1987) de que a geoestratégia seria uma “geopolítica da segurança nacional” (COUTAU-BÉGARIE, 2010, p. 571), por uma questão de simplificação e uniformização este trabalho não fará distinção entre os termos geoestratégia e geopolítica, utilizando preferencialmente o termo geopolítica como referência para as discussões; da mesma forma para especificação do profissional, pesquisador e teórico, geoestrategistas e geopolíticos aparecerão indiferenciados. O objetivo geral deste capítulo é fornecer os subsídios básicos para compreensão das justificativas geopolíticas que motivam o objeto do presente trabalho, que é a elaboração de um mapa tecnológico para construção de um reator de tório no Brasil.

### 1.1. A Evolução das Teorias Geopolíticas

#### 1.1.1. Os Fundadores da Geopolítica

---

<sup>1</sup>[...] le mot «géopolitique» désigne tout ce qui concerne des rivalités de pouvoirs ou d'influences politiques sur des territoires et de ce fait, sur les population qui y vivent. La géopolitique est donc l'ensemble des observations et des raisonnements stratégiques, géographiques et historiques qui permettent de mieux comprendre les conflits (LACOSTE, 2012, p.8).

Friedrich Ratzel (Alemanha, 1844-1904) produziu obras cujo mérito pode ser relacionado ao valor político que atribuiu ao espaço territorial, nas quais defende o expansionismo e a conquista de novas áreas pelo Estado. Destaca-se a importância dada ao domínio da ciência e da tecnologia associado à questão civilizatória apresentada pelo autor alemão, que diferencia “povos naturais”, que viveriam de acordo com os recursos da natureza, de “povos civilizados”, que usufruiriam dos benefícios do progresso. É também de sua autoria o conceito de Espaço Vital (*Lebensraum*), que pode ser entendido como “todo o território que um país alega necessitar para obter a sua autossuficiência, [...] o objetivo dos Estados em sua marcha expansionista” (MAFRA, 2006, p. 39). Rudolf Kjellen (Suécia, 1846-1922), a quem devemos a criação do termo Geopolítica, afirmava que “o Estado é Direito, por dentro, e Força ou Natureza, por fora”, criando a tese da Vinculação Territorial do Estado, na qual “cada Estado tem o seu núcleo territorial fixo de uma vez para sempre, da qual não pode separar-se ou desligar-se, sob a pena de sucumbir”. Ambos, como homens do seu tempo, coadunavam com a ideia do Estado como um ser vivo, orgânico, unido ao solo. Enquanto o pensamento de Ratzel incentivava a ideia de que “Espaço é Poder”, Kjellen ia além, ao estabelecer que “quando se trata de sobrevivência, o Estado deve preferir a força aos princípios morais” (MAFRA, 2006, p. 42-45).

### 1.1.2. Geopolíticos Clássicos

O Almirante Alfred Thayer Mahan (Estados Unidos, 1840-1914) é a referência clássica para a importância do Poder Naval, cuja expressão maior, ao final do século XIX, era a potência marítima britânica. Sua obra de 1890 – *A Influência do Poder Marítimo na História: 1660-1783* (*The Influence of Sea Power upon History: 1660-1783*) o fez tornar-se mundialmente conhecido como o “conceituador do Poder Marítimo, segundo a tese de que quem possuir potencial militar só obterá hegemonia e vitória se dominar os mares” (MAFRA, 2006, p. 106). O professor britânico de geografia e ciências políticas Sir Halford John Mackinder (Grã-Bretanha, 1861-1947) veio suprir a óbvia lacuna deixada por Mahan, construindo uma teoria de oposição entre terra e mar com a sua Teoria do Poder Terrestre. Testemunha dos dois grandes conflitos mundiais do século XX – a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) – teve a oportunidade de revisar e aprofundar a sua teoria, apresentando termos e conceitos que, até hoje, constituem um dos mais importantes pontos de partida nos estudos geopolíticos contemporâneos. Sua teoria estabeleceu a Eurásia como o “centro geográfico” do

mundo<sup>2</sup>, atribuindo a esta determinada área do mapa a condição de epicentro dos fenômenos geopolíticos mundiais, segundo o qual “quem governar a Europa Oriental comandará o *Heartland* (Coração da Terra); quem governar o *Heartland* comandará a Ilha do Mundo; quem governar a Ilha do Mundo comandará o mundo” (MAFRA, 2006, p. 110). A Ilha do Mundo (*World Island, Midland*) traz uma abordagem na qual o conjunto da Europa, Ásia e África é tratado como uma única e gigantesca ilha; o *Heartland* (Área Pivô, Terra Central ou Coração da Terra) – a Eurásia, que ficaria longe do alcance do Poder Naval, estaria circundada pelo *Midland Ocean* (Oceano da Terra Central), um oceano único que abarcaria o Atlântico, o Pacífico, o Índico e o Glacial Ártico.

Na esteira desses conceitos criados pelos dois primeiros grandes teóricos da geopolítica, surgem as ideias de Karl Ernst Nikolaus Haushofer (Alemanha, 1869-1946) e Nicholas John Spykman (Holanda, 1893-1943), naturalizado estadunidense. Ambos trouxeram contribuições que marcaram a história do mundo moderno, uma vez que o General Haushofer influenciou diretamente a estratégia militar de Adolf Hitler, ao passo que Spykman foi o precursor da ideia de Contenção, que seria adotada pelos Estados Unidos e seus aliados ao longo da segunda metade do século XX, em especial durante a Guerra Fria (1947-1991). Haushofer apresentou a Teoria das Pan Regiões (1930), na qual:

O mundo seria dividido em quatro Pan Regiões, a saber: A Pan América, liderada pelos Estados Unidos da América; a Euráfrica, sob [a] liderança da Alemanha, auxiliada, se possível, pela Grã-Bretanha (anglo-saxões); a Pan Rússia, encabeçada pela União Soviética e a Pan Ásia, ou Esfera de Coprosperidade da Ásia Oriental Maior, sob a direção do Japão (MAFRA, 2006, p. 116).

Para este geopolítico alemão, as fronteiras não passavam de uma demarcação jurídica, cuja legitimidade poderia ser questionada a qualquer momento: cada Estado seria livre para expandir o seu Espaço Vital, e este processo dependeria única e exclusivamente do equilíbrio de poder e do “apetite por território” dos envolvidos. A Teoria das Fímbrias ou *Rimland* (1942) de Spykman enuncia que “quem controlar o *Rimland*, dominará a Eurásia; quem dominar a Eurásia controlará o mundo” (MAFRA, 2006, p. 139). A influência de Mackinder é clara. Entretanto, Spykman defende que a área pivô a ser dominada não seria o *heartland* de Mackinder, mas algo equivalente às *coastlands* (terras do litoral). O conceito-chave criado por Spykman é o *rimland* ou as fímbrias, que seria composto pelas margens ou bordas da Eurásia:

zonas intermediárias entre o interior da Eurásia e os mares que a cercam [...] a região de defrontação entre o Poder Terrestre e o Poder Marítimo, no caso de um futuro confronto. Essas terras funcionariam como “tampões, como um verdadeiro ‘cordão sanitário’” (MAFRA, 2006, p. 141).

<sup>2</sup> *Is not the pivot region of the world's politics that vast area of Euro-Asia [...]?* (Mackinder, 2004, p. 311)

Cohen (2015) viria posteriormente a introduzir o termo geopolítico “*Shatterbelt*, uma região dilacerada por conflitos internos cuja fragmentação é ampliada pela intervenção de grandes potências externas<sup>3</sup>” (*tradução nossa*). O Oriente Médio possui importantes *shatterbelts*, nele se destacando geopoliticamente o Irã e a Turquia, duas potências médias em ascensão.

### 1.1.3. Outras Teorias Geopolíticas

O historiador, sociólogo, filósofo e diplomata inglês Arnold Joseph Toynbee (1889-1975), graças à sua extensa bagagem intelectual e de conhecimentos acumulados, pode analisar a questão geopolítica de uma forma holística, sendo mais bem compreendida pelas seguintes observações que compõem a sua Teoria do Desafio e Resposta (1934):

As dificuldades geográficas, os obstáculos, são desafios que se antepõem ao processo de afirmação das Nações. Ou estas superam estes desafios e se afirmam, ou não os superam e são condenadas à estagnação ou à desagregação.  
[...] A facilidade é inimiga da civilização.  
[...] O estímulo humano aumenta de força na razão direta da dificuldade.  
(MAFRA, 2006, p. 121-123).

As reflexões de Toynbee permanecem tão atuais e aplicáveis quanto na época em que foram elaboradas. Para este autor, as potências mundiais, em qualquer época, serão os Estados que aceitarem e enfrentarem os seus desafios, desenvolvendo-se. As elites de cada povo teriam papel determinante e a Geopolítica catalisaria este processo como fonte de sugestões e soluções (MAFRA, 2006).

A Teoria da Tríade de 1968/1973 foi elaborada a partir dos esforços do Clube de Roma (Itália, 1968) e da Comissão Trilateral (EUA, 1973). O Clube de Roma produziu diversos relatórios sobre temas de interesse, destacando-se o intitulado *Os Limites do Crescimento* (1972), que mencionava fatos como o esgotamento de recursos naturais, crise energética, crescimento populacional, desemprego em massa, poluição ambiental; ou seja, alertavam para a possibilidade de um colapso total do sistema mundial e indicava caminhos para mitigar a futura crise. Arillo Peccei (1908-1983) foi a personalidade de destaque dentro deste seletivo grupo. A Comissão Trilateral, criada em 1973, contou com a colaboração do eminente filósofo e professor polonês Zbigniew Kazimierz Brzezinski (1928-2017). Uma Tríade de Blocos foi idealizada sob a liderança dos EUA (americano, a “Pan América”), Europa (europeu, incluindo Rússia/CEI<sup>4</sup>, Turquia e Norte da África) e Japão (Tigres Asiáticos<sup>5</sup>, Oceania, e possível

<sup>3</sup>Another feature of the contemporary world geopolitical map is the “shatterbelt” – a region torn by internal conflicts whose fragmentation is increased by the intervention of external major powers (COHEN, 2015, p. 9).

<sup>4</sup>CEI – Comunidade dos Estados Independentes, criado em 1991 e composto por Estados ex-membros da URSS.

<sup>5</sup>Tigres Asiáticos – Países asiáticos que apresentaram rápido crescimento e industrialização a partir de 1970.

integração chinesa). O viés econômico com foco no controle monetário internacional foi a semente do NAFTA – *North American Free Trade Agreement* (Tratado Norte-Americano de Livre Comércio), UE – União Europeia, ASEAN – *Association of Southeast Asian Nations* (Associação de Nações do Sudeste Asiático) e do conjunto de medidas econômicas de cunho neoliberal conhecido por Consenso de Washington estabelecido em 1989 (MAFRA, 2006).

A Teoria do Poder Perceptível (1975), desenvolvida pelo Coronel do Exército estadunidense Ray S. Cline (EUA, 1919-1996) destaca a população nacional como elemento fundamental geopolítico. Analisa a importância da cultura nacional e da competência dos indivíduos em uma sociedade que, junto com extensão geográfica, indústria, organização militar, estratégia e vontades nacionais culminariam em um “Poder Relativo” específico de cada Estado. Em seu cenário prospectivo, os Estados de maior população dominariam o mundo no século XXI, exceto em casos excepcionais. Assim sendo, a liderança mundial caberia aos Estados de maior Poder Perceptível, ou seja, que possuíssem capacidade para fazer guerra e impor a sua vontade. O último livro do Cel. Ray Cline, *The Nations Power in the 1990s: A Strategic Avaliament* traz uma fórmula de cálculo de Poder Perceptível dos Estados, além de considerações sobre os Estados Unidos desconcertantemente atuais, tais como:

- Os estadunidenses<sup>6</sup> devem estar atentos para verdades geopolíticas;
- [...] Para manter o acesso aos recursos das Nações amigas, os estadunidenses devem ter bases no exterior; poder aéreo e, sobretudo, poder marítimo superior para atuar nos três oceanos.
- Os Estados Unidos não tem recursos para, por muito tempo, exercer sua política externa baseada na persuasão amigável.

E acrescenta as seguintes preocupações e previsões:

- Em face de as populações do sul do planeta crescerem mais em relação às do norte, tornar-se-á muito mais difícil, para os EUA, agir como a polícia do mundo;
- Em caso de hostilidade detectada pelo Governo, os EUA devem confiar primeiramente na força, e não na boa-vontade, para a sua segurança (MAFRA, 2006, p. 149).

Ao que parece, Ray Cline descreveu boa parte da cartilha de atuação geopolítica dos EUA das duas primeiras décadas do século XXI.

Todos os países que almejam ser uma potência, bem como aqueles que desejam aumentar ou preservar o seu poder conforme Toynbee e Ray Cline, possuem desafios particulares quanto ao acesso a recursos – materiais estratégicos e fontes de energia – bem como ao domínio tecnológico, inerentes ao seu aproveitamento econômico e emprego tanto pacífico

---

<sup>6</sup> No original, “*Os americanos devem estar atentos para verdades geopolíticas*”. Os “americanos” foram substituídos por “estadunidenses”, a fim de destacar que as recomendações do autor são endereçadas especificamente aos EUA, e não ao macrocontinente das Américas, nem mesmo ao conjunto dos povos da América do Norte.

como militar. O objetivo da próxima seção é exatamente este: apresentar a Geopolítica Energética e de Materiais Estratégicos como parte integrante e inquestionável das estratégias geopolíticas globais.

## 1.2. Geopolítica Energética e de Materiais Estratégicos

A Geopolítica Energética lida com os pressupostos geográficos e de poder focados na disponibilidade de matérias-primas em geral e no suprimento de energia. Segundo Cohen (2015, p. 2) um dos quatro pilares de uma nação que reivindica poder seria a posse de um excedente de energia, ou seja, energia em excesso, muito além das suas necessidades regulares domésticas. O acesso às fontes de energia primária (aquelas encontradas diretamente na natureza, notadamente petróleo, gás natural, carvão mineral, xisto, lenha, água, vento, urânio) sobressai como preocupação perene dos Estados, uma vez que envolvem fatores logísticos e tecnológicos, bem como os custos associados perante uma demanda sempre crescente por energia cuja respectiva oferta mundial não a acompanha *pari passu*. O minério de urânio configura-se como fonte de energia primária de caráter “mais estratégico”, pela singularidade de sua aplicação dual, em especial a possibilidade de confecção de artefatos atômicos com ampla capacidade destrutiva, bem como o seu emprego militar como combustível para propulsão de submarinos e embarcações, nos quais promove um vantajoso incremento de autonomia.

A Agência de Logística de Defesa dos EUA (DLA – *Defense Logistics Agency*), que gerencia a cadeia de suprimentos para as diversas forças militares daquele país, centraliza a análise do suprimento de materiais globais/geopolíticos, inclusive materiais que se tornarão críticos no futuro<sup>7</sup>. Alguns desses materiais são matérias-primas bastante escassas na natureza, seja pela rara ocorrência geográfica de suas jazidas, seja pela baixa viabilidade econômica de sua exploração (DLA, 2019). No Brasil, o Glossário de Termos e Expressões para Uso no Exército oferece uma definição concisa e clara desses materiais, conforme reproduzido abaixo:

MATERIAL ESTRATÉGICO – Material que, dada à necessidade de sua utilização para empreender uma ação estratégica e, em face das condições de acessibilidade e das conjunturas geopolíticas e geoeconômicas, exige medidas especiais para sua obtenção, produção, industrialização e comércio (BRASIL, 2009).

O Ministério das Minas e Energia (MME) e o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), por sua vez, criaram em 2010 um Grupo de Trabalho Interministerial MME–MCT de Minerais Estratégicos (GTI-ME). Cabe ressaltar que o referido GT não foi habilitado para tratar dos

---

<sup>7</sup>*We serve our clients through a unique combination of technical expertise, global/geopolitical material supply analysis, and management & tracking of a broad range of existing & future critical materials* (DLA, 2019).

minérios e materiais nucleares, nem de petróleo ou gás natural. Portanto, embora petróleo, gás natural, urânio e tório, brutos ou refinados, possam ser considerados materiais ou minerais estratégicos, seu tratamento costuma ser debatido em instâncias específicas por razões geopolíticas<sup>8</sup>.

O abastecimento energético é uma questão de “segurança nacional” (CONANT, 1981, p. 19-20). Quando um país não dispõe de recursos energéticos suficientes para atender à sua demanda, precisa importá-los. Neste caso, cabe aos Estados assegurar um abastecimento suficiente e contínuo a preços competitivos e acessíveis à sua população e ao seu mercado interno. Devem possuir a devida capacidade de pagamento e, na ausência de tecnologia ou infraestrutura proporcional para processamento e transformação das fontes primárias, optarão por adquirir fontes de energia secundárias (eletricidade, derivados do refino de petróleo, biogás, carvão vegetal, etanol, urânio enriquecido etc.). A maioria dos países, principalmente os mais ricos, possui uma necessidade energética crescente e superior aos seus recursos internos. Por conseguinte, a geopolítica energética lida com uma componente preocupante: a questão da dependência energética, intimamente relacionada com a geografia de cada País e com o seu grau de avanço tecnológico (CONANT, 1981).

O petróleo, já por vezes alcunhado de “ouro negro”, cuja corrida exploratória iniciou em meados da década de 1850 nos Estados Unidos, tornou-se a principal fonte primária energética do século XX. Ao conhecer a saga do petróleo, compreende-se em grande parte as motivações geopolíticas concretizadas após o longo aprendizado adquirido nos dois confrontos bélicos mundiais da primeira metade do séc. XX. Quando o Primeiro Ministro Britânico Winston Churchill (1874-1965), ainda como Primeiro Lorde do Almirantado decidiu, em 1911, alterar o combustível padrão da esquadra da Marinha Britânica substituindo o carvão pelo “petróleo”, estava diante de um impasse de consequências geopolíticas: ao modernizar a frota, criaria uma dependência do petróleo estrangeiro em substituição ao carvão nacional; em contrapartida, apostava no melhor desempenho dos equipamentos, incluindo a racionalização de custos. Embora acertada pelo ponto de vista tecnológico e financeiro, tal iniciativa cobrou seu mais alto preço na Segunda Guerra Mundial, mais precisamente durante o período de virtual hegemonia marítima dos submarinos alemães U-boats no Atlântico (1941-1943), que limitaram/impediram o reabastecimento inglês afundando inúmeros navios petroleiros dos Estados Unidos (YERGIN, 1994).

---

<sup>8</sup> Portaria MCTIC nº 1.405 de 29/12/2014, publicada no DOU de 07/01/2015.

O petróleo e, mais tarde o gás natural, consolidaram-se como materiais estratégicos imprescindíveis para o equilíbrio de poder dos anos da Guerra Fria:

As lições da Segunda Guerra Mundial, a crescente influência do petróleo na economia e a dimensão dos recursos do Oriente Médio serviam para definir, no contexto inicial da guerra fria com a União Soviética, a manutenção do acesso ao petróleo como elemento vital para a segurança da América, da Grã-Bretanha e da Europa Ocidental. O petróleo se consistia no ponto de convergência para a política externa, as considerações de economia internacional, a segurança nacional e os interesses corporativos. O Oriente Médio seria o foco (YERGIN, 1994, p. 419).

Por outro lado, a União Soviética também tinha interesse no petróleo do Oriente Médio, em especial, no Irã:

O Irã estava sob a contínua e considerável pressão da União Soviética. Ao final da Segunda Guerra Mundial, a União Soviética havia exigido uma concessão de petróleo no Irã, e as tropas soviéticas continuaram a ocupar o Azerbaijão, ao norte do Irã, após a guerra. [...] Stálin tinha interesse no petróleo iraniano. A produção soviética, em 1945, foi de apenas 60% da produção de 1941. O país em desespero havia providenciado uma série de substituições durante a guerra – desde a importação de petróleo dos Estados Unidos, até motores movidos a carvão para seus caminhões (YERGIN, 1994, p. 430-431).

A Europa, devastada pela guerra, sofreria também uma crise energética que, junto com a necessidade de contenção do poder soviético, seriam questões geopolíticas equacionadas através do Plano de Recuperação da Europa (Plano Marshall):

Sem o petróleo, o Plano Marshall teria sido provavelmente um fracasso, [...] Estimouse, em 1948, que mais de 20% do total do Plano Marshall, nos quatro anos subsequentes, seria destinado à importação de petróleo e de equipamentos correlatos (YERGIN, 1994, p. 434).

Analisando fatos do passado recente sob a ótica da geopolítica energética, compreende-se a recorrente pressão estadunidense sobre a Venezuela. Durante a Segunda Guerra Mundial, havia em Washington uma preocupação em:

[...] proteger o acesso à Venezuela, que era a fonte externa de petróleo mais significativa para os Estados Unidos e, relativamente, a mais segura. Assim, o governo americano iria intervir diretamente [...] para resguardar o que foi, no meio da guerra, um enorme privilégio estratégico. De sua parte, as companhias não desejavam arriscar a sua nacionalização. [...] Elas sabiam que estavam situadas sobre algumas das mais importantes reservas de petróleo do mundo, que não poderiam se dar ao luxo de perder. A Venezuela era a maior fonte de petróleo barato [...] (YERGIN, 1994, p. 445).

A criação da OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo teve como principais protagonistas o ministro venezuelano das Minas e Hidrocarbonetos Juan Pablo Pérez Alfonzo (1903-1979) e o saudita Abdullah Ibn Hamoud Tariki ou *Sheik Vermelho* (1919-1997), chefe do Diretório dos Negócios das Minas de Petróleo da Arábia Saudita. A formação deste cartel de petróleo deu-se a partir da sua primeira conferência (10-14 de setembro de 1960) cuja reunião contou inicialmente com cinco membros: Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Venezuela

(Catar presente apenas como observador), àquela época responsável por mais de 80% das exportações mundiais de petróleo bruto (YERGIN, 1994, p. 541). A união improvável de países com rivalidades históricas e culturas distintas, incluindo dois países não árabes (Irã e Venezuela) em torno da defesa do preço do petróleo influenciou o equilíbrio de forças no mundo a partir dos dois Choques de Petróleo na década de 1970. Segundo Hobsbawn (1994, p. 245), foram “pavorosos momentos de 1973 e 1979 quando a maior potência da Terra não pôde achar resposta para um consórcio de fracos Estados do Terceiro Mundo que ameaçava estrangular seus abastecimentos de petróleo”.

Assim como Pérez Alfonzo, Hugo Chávez viria a afrontar “os interesses globais estadunidenses não apenas por ter se aliado com a Rússia e o Irã, mas por ter se aliado com a Rússia e o Irã de sua posição privilegiada na bacia do Caribe” (KAPLAN, 2013, p. 96). A centralidade geopolítica do petróleo justificou a defesa do Kuwait em 1991, pois havia o receio de que o presidente iraquiano Saddam Hussein (1937-2006), após a anexação do Kuwait, invadisse a Arábia Saudita e passasse a controlar o abastecimento global de petróleo. Dentre outras razões, a China incomoda as demais potências mundiais pela sua proximidade das ricas reservas de petróleo, gás natural, metais e minerais estratégicos da Ásia Central – o *Heartland* de Mackinder, ou a esfera de influência do *Rimland* de Spykman – cujo controle parece crucial para o poder mundial.

Apesar do frio inóspito das regiões mais próximas do Ártico, Kaplan (2013, p. 173) descreve a abundância e diversidade de recursos naturais em solo russo – “petróleo, gás natural, carvão, ferro, ouro, cobre, grafite, alumínio, níquel e uma infinidade de outros metais e minerais, bem como a energia elétrica gerada pelos poderosos rios siberianos” – e destaca insumos geopolíticos para ascensão desta potência:

O súbito aparecimento da Rússia entre as grandes potências europeias de princípios do século XVIII estava relacionado aos ricos depósitos de minério de ferro encontrados nas florestas dos Urais, perfeitos para a produção dos canhões e mosquetes imprescindíveis à guerra moderna. Do mesmo modo, em meados da década de 1960, a descoberta de vastos campos de petróleo e gás natural no Noroeste da Sibéria guindaria a Rússia ao *status* de hiperpotência energética do começo do século XXI. A conquista da região levou ainda a outra consequência: introduziu a Rússia na geopolítica do Pacífico, pondo-a em conflito tanto com o Japão quanto com a China.

Oleodutos e gasodutos atravessam a Eurásia partindo da Rússia, Turcomenistão, Cazaquistão, passando por mares internos como o Mar Cáspio e o Mar Negro e territórios como Ucrânia, Geórgia, Azerbaijão e Turquia para alcançarem China, Bulgária e Europa Ocidental, consolidando uma interdependência econômica e energética. Essa imbricada teia opera como pano de fundo de conflitos regionais e justifica parte da instabilidade “mackinderiana”, a exemplo tanto da Geórgia e da Crimeia quanto da Síria, palcos de recentes guerras

(convencionais e híbridas<sup>9</sup>) do início do século XXI, que possuem vantagens geográficas para acesso logístico intrinsecamente vinculado à geopolítica energética e de materiais estratégicos.

Segundo Kaplan (2013, p. 189):

O Cazaquistão vem se firmando como legítima potência independente. Está desenvolvendo três campos supergigantes (conhecidos como “elefantes”) de petróleo, gás e condensado<sup>10</sup>, dois deles no Mar Cáspio, com pesados investimentos de multinacionais ocidentais. A construção de um novo oleoduto, que ligará o Cáspio ao Oeste da China, será concluída em breve. O Cazaquistão está prestes a se tornar o maior produtor de urânio do mundo; possui a segunda maior reserva mundial de cromo, chumbo e zinco, a terceira maior de manganês, a quinta maior de cobre e figura entre as dez maiores de carvão, ferro e ouro.

E prossegue:

O Cazaquistão é o *verdadeiro Heartland* de Mackinder! Rico em todos os recursos naturais estratégicos do planeta encontra-se bem no meio da Eurásia [...] grandes potências como a Rússia e a China se digladiam por seus recursos naturais.

Outra potência regional média que merece destaque é a Índia que, em 2018, foi a terceira maior importadora de petróleo do mundo<sup>11</sup>, e Kaplan (2013, p. 233) esclarece a sua importância geopolítica:

À medida que Estados Unidos e China tornam-se grandes potências rivais, a direção para a qual a Índia pender pode vir a determinar o curso da geopolítica na Eurásia do século XXI. Em outras palavras, a Índia está assomando como o Estado-pivô em essência; e, segundo Spykman, o exemplo máximo de poder terrestre do *Rimland*. Mahan comentou que a Índia, bem no meio do litoral do Oceano Índico, é crucial para a penetração tanto do Oriente Médio quanto da China em direção ao mar.

A Índia possui rivalidades históricas com o Paquistão – disputa pela Caxemira, e com a própria China – divergência de demarcação de fronteira no Himalaia e a questão do Tibete. Investimentos chineses em portos no entorno indiano (Mianmar, Bangladesh, Sri Lanka e Paquistão) acirram a disputa por rotas comerciais vitais para o escoamento de materiais estratégicos. Segundo Kamdar (2008):

[...] a Índia e a China estão cientes de que são concorrentes na corrida para assegurar recursos naturais essenciais, em especial petróleo e gás natural, e para firmar sua influência sobre uma vizinhança compartilhada em grande parte (p. 22).  
[...] A Índia firmou consigo mesma o compromisso de atingir a independência energética em 2020 (p. 140).

<sup>9</sup> Segundo Korybko (2018, p. 8), “A guerra híbrida é a combinação entre revoluções coloridas e guerras não convencionais”. As revoluções coloridas, por sua vez, “consistem em desestabilizar governos por meio de manifestações de massas em nome de reivindicações abstratas como democracia, liberdade etc.; [...] é o golpe brando”. Já as guerras não convencionais são “aquelas combatidas por forças não regulares, sejam guerrilhas, milícias ou insurgências [...] o momento do golpe rígido”.

<sup>10</sup> Condensado (*Condensate*) – Fração líquida do gás natural obtida no processo primário de separação de campo, mantida na fase líquida na condição de pressão e temperatura de separação. Disponível em: <<http://dicionariodopetroleo.com.br/dictionary/condensado/>>. Acesso em: 09 jun. 2019.

<sup>11</sup> Em 2018, o país que importou maior volume de petróleo cru no mundo foi a China (20,2%), seguida pelos EUA (13,8%) e pela Índia (9,7%). Disponível em: <<http://www.worldstopexports.com/crude-oil-imports-by-country/>>. Acesso em: 02 out. 2019.

Desta forma, o subcontinente indiano busca:

[...] garantir a segurança energética do país expandindo seu fornecimento de petróleo e sua capacidade de refino e, ao mesmo tempo, reduzindo sua dependência de combustíveis fósseis (p. 275).

A “última fronteira” na busca incansável por recursos energéticos tem sido a pesquisa em águas ultraprofundas<sup>12</sup>. Em 2007, um minissubmarino russo plantou uma réplica de titânio da bandeira daquele país no leito do Pólo Norte a aproximadamente 4,6 km de profundidade<sup>13</sup> (2,5 milhas náuticas). Vastos territórios do Oceano Ártico são reivindicados por ao menos quatro nações no seu entorno, além da Rússia: Canadá, Groelândia (administrada pela Dinamarca), Noruega e os EUA. O interesse no Ártico pode ser compreendido graças ao potencial de reservas de materiais estratégicos descoberto recentemente:

Por trás de todos estes interesses está a divulgação de estudos geológicos indicando que o Ártico pode conter algumas das maiores reservas mundiais inexploradas de petróleo e gás natural. [...] Esta região, que ocupa meros 6% da superfície terrestre, representaria 22% das “reservas desconhecidas de petróleo e gás do mundo tecnicamente recuperáveis”. Isto inclui 13% das reservas desconhecidas de petróleo do mundo e 30% das de gás natural – em conjunto, o equivalente a 412 bilhões de barris de petróleo, ou 56 vezes a taxa atual de consumo de petróleo anual dos EUA<sup>14</sup> (KLARE, 2013, p. 6-7, *tradução nossa*).

A extração contínua e crescente de materiais estratégicos acena para o esgotamento das atuais reservas conhecidas e exploradas estimulando a busca por novas fontes vitais para a sobrevivência de países e de suas respectivas empresas a médio e longo prazo.

Além da disputa por fontes primárias energéticas, há uma verdadeira disputa por novos depósitos de terras raras e outros materiais estratégicos. Segundo publicações da Agência Nacional de Mineração – ANM e do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM,

Os Elementos Terras Raras (ETR) compõem um grupo de elementos químicos da série dos Lantanídeos (número atômico entre 57 a 71, grupo IIIB da Tabela Periódica), começando por lantânio (La) e terminando por lutécio (Lu), acrescidos do escândio (Sc) e do ítrio (Y), que apresentam comportamentos químicos similares.

[...]

Embora haja muita pesquisa sobre o assunto, **não há substitutos eficientes para os diversos usos dos ETR.**

[...]

<sup>12</sup> Nas atividades de exploração e produção de petróleo, as medidas de profundidade no mar, isto é, a distância vertical entre a superfície do mar e o solo marinho (ou lâmina d’água – LDA), são definidas em três níveis: águas rasas – até 300 m (metros); águas profundas – de 300 a 1.500 m; e águas ultraprofundas - igual/acima de 1.500 m.

<sup>13</sup> *At 1:36 p.m. Moscow time on August 2, 2007, the robotic arm of a Russian mini-submarine planted a titanium replica of the Russian flag on the seabed of the North Pole, two and half Miles below the ocean’s surface.* (KLARE, 2013, p. 1).

<sup>14</sup> *Driving all of this interest is the release of geological studies indicating that the Arctic may contain some of the world’s largest untapped reserves of oil and natural gas. [...] this region, which occupies a mere 6 percent of the earth’s surface, was said to account for 22 percent of the “undiscovered, technically recoverable [oil and gas] resources in the world.” This includes 13 percent of the world’s undiscovered oil reserves and 30 percent of its undiscovered natural gas — together, the equivalent of 412 billion barrels of oil, or 56 times the current rate of U.S. annual petroleum consumption* (KLARE, 2013, p. 6-7).

Entre as principais aplicações dos compostos de terras raras estão: ímãs **permanentes para motores miniaturizados e turbinas para energia eólica**, composição e polimentos de vidros e lentes especiais, **catalisadores de automóveis, refino de petróleo**, luminóforos para tubos catódicos de televisores em cores e telas planas de televisores e monitores de computadores, **ressonância magnética nuclear**, cristais geradores de laser, supercondutores e absorvedores de hidrogênio, **armas de precisão** (ANM, 2013, **grifos nossos**).

Os ETR se encontram sumariamente listados no rol de materiais estratégicos definidos pelos EUA (DLA, 2019); e, embora não representem nem 50% destes itens e nem sejam matérias-primas energéticas, também são objeto de interesses geopolíticos globais. O Japão reivindica as Ilhas Senkaku e a China, as ilhas Diaoyu – virtualmente as mesmas ilhas – não pelo seu valor comercial ou pelas vantagens estratégicas de localização geográfica, mas sim pelos interessantes depósitos de terras raras em seu leito oceânico. Há uma “caçada” mundial por novas jazidas de minerais estratégicos, que certamente não se resume aos interesses sino-japoneses. Os EUA estudam a viabilidade de minas abandonadas na Califórnia. Minas e mineradoras australianas encontram-se sob a mira de agressivas investidas estrangeiras pelo seu controle, com destaque para a China. Como o refino de terras raras gera resíduos tóxicos, mineradoras planejam transportar terras raras da Austrália para refinar na Malásia, cuja legislação ambiental é menos severa. Entretanto, os resíduos lançados ao mar podem alcançar o Japão, podendo gerar disputas internacionais indesejadas (KLARE, 2013).

Essa intrincada teia de relações em diversas cadeias de suprimentos dependentes do acesso e da disponibilidade de materiais estratégicos como os ETR desvanece as respectivas motivações geopolíticas dos Estados envolvidos. Ao lado da geopolítica energética, tal agenda de interesses permanece ativa no cenário internacional. Merece atenção destacada as questões envolvendo minerais atômicos como urânio e tório e seus derivados, cuja correlação de forças compõe o campo de estudos da geopolítica nuclear.

### 1.3. Geopolítica Nuclear

Leo Szilard (1898-1964), cientista húngaro de família judaica, possui lugar de destaque na história da energia nuclear. A descoberta das propriedades radioativas do urânio e do tório fora reconhecida e premiada em 1903 com o Prêmio Nobel de Física, concedido a Henri Becquerel (1852-1908) e ao casal Marie Curie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1903). Cerca de trinta anos depois, Szilard patentearia a bomba atômica na Grã-Bretanha, a partir de um *insight* em que conectava as teorias descritas por Albert Einstein (1879-1955) com as pesquisas publicadas à época na área da física nuclear. A mesma mente que antecipara em cinco anos a

possibilidade de uma reação em cadeia gerar uma enorme quantidade de energia e até mesmo uma explosão (fissão nuclear) iria exercer um papel fundamental na história moderna escrevendo uma carta, que seria assinada pelo seu já amigo Albert Einstein e entregue ao Presidente dos Estados Unidos Franklin Delano Roosevelt (1882-1945). Datada em dois de agosto de 1939, continha uma clara advertência quanto ao risco de o programa nuclear nazista desenvolver primeiro uma bomba atômica. Considerada tal carta o estopim do Projeto Manhattan, este seria autorizado dois anos depois, em outubro de 1941, e consumiria dois bilhões de dólares para desenvolver os primeiros artefatos nucleares, cujo poder determinaria uma nova ordem mundial (L'ANNUNZIATA, 2016).

Em 1938, cerca de um ano antes da carta de Einstein/Szilard e do início da Segunda Guerra Mundial, uma proposta do Presidente Roosevelt de utilizar a influência estadunidense para reunir as principais potências europeias havia sido rechaçada pelo então Primeiro Ministro Britânico Arthur Neville Chamberlain (1869-1940). Em retrospecto Churchill, sucessor de Chamberlain, acreditava que essa tinha sido uma oportunidade desperdiçada de adiar ou até mesmo evitar o conflito. Já o Projeto Manhattan, embora executado inteiramente nos Estados Unidos, havia sido fruto de um acordo de cooperação estabelecido entre os dois estadistas (Churchill e Roosevelt) desde 1940 e, portanto, antes de “*Pearl Harbor*”. Ambos reuniram conhecimentos científicos em seus países, úteis para a guerra, com cientistas estadunidenses e britânicos trabalhando em conjunto numa “corrida”, uma verdadeira “batalha de laboratórios” contra os alemães (CHURCHILL, 2017).

Em 1941, já estava estabelecida a “concepção geral geopolítica da defesa conjunta do oceano Atlântico pelas duas potências de língua inglesa”. Havia um consenso entre Churchill e Roosevelt de que o mundo do pós-guerra deveria ser governado por um grupo de potências. Um modelo para a futura ordem mundial seria proposto no ano seguinte, “intitulado ‘Plano das Quatro Potências’. A direção suprema proviria de um conselho composto de Inglaterra, Estados Unidos, Rússia e China”. A viabilidade desse plano dependia, primeiramente, da vitória da guerra; esta, por sua vez, contava com a fabricação de bombas atômicas, em solo estadunidense, em larga escala, antes dos alemães (CHURCHILL, 2017). Portanto, a centralidade geopolítica da questão nuclear definiu-se concomitantemente ao se domínio científico e iria se firmar ao longo das décadas seguintes, conforme o seu desenvolvimento e os subsequentes aprimoramentos tecnológicos.

Independentemente das tratativas com a Inglaterra, os Estados Unidos ainda vivenciavam a política externa isolacionista perante um conflito que acontecia na distante Europa, fora do alcance dos olhos e dos ouvidos do povo americano. Em sete de dezembro de

1941, o ataque japonês a *Pearl Harbor* seria o evento que justificaria publicamente a entrada dos EUA na Segunda Guerra Mundial. Merece menção a obra de Robert B. Stinnett *Day of Deceit: The Truth about FDR [Franklin Delano Roosevelt] and Pearl Harbor*, que reúne evidências de que o governo estadunidense teria conhecimento prévio e detalhado das intenções e dos efetivos preparativos do Japão. No capítulo 13 intitulado “Um Preço Bem Baixo” (*A Pretty Cheap Price*), um oficial estadunidense afirma que as vítimas e os prejuízos do ataque aéreo japonês “foram um preço bem baixo pago para unificar o país<sup>15</sup>” pois, embora fosse do interesse do governo estadunidense engajar-se ativamente neste conflito mundial, a população resistia à ideia e se manteve reticente até a comoção nacional provocada pelo ataque aéreo japonês, cujo “fator surpresa” é questionado nesta obra revisionista (STINNETT, 2001; CAMARGO, 2006).

Como parte do esforço de guerra, o Projeto Manhattan – o primeiro evento de *Big Science*, envolvendo a colaboração de cientistas de diversas nacionalidades e especialidades – contaria com algumas vantagens adicionais. A primeira delas foi a disponibilidade inesperada de grande quantidade de urânio: convenientemente, havia um carregamento de cerca de 1.200 toneladas de minério de urânio de excelente qualidade com 65% de pureza, originário do Congo Belga justamente em Staten Island, New York, e outras 3.000 toneladas aguardando embarque na África. O Projeto Manhattan adquiriu todo o urânio disponível, enquanto construía instalações apropriadas e testava novas tecnologias para enriquecer o urânio a 95%<sup>16</sup> (KIERNAN, 2015). Outra enorme vantagem foi descoberta do plutônio, bem como de suas propriedades físséis, em Berkeley em janeiro de 1941, pela equipe de Glen T. Seaborg (1912-1999), pioneiro na síntese de elementos químicos artificiais através de aceleradores de partículas apelidados de cíclotrons<sup>17</sup> (L’ANNUNZIATA, 2016, p. 482). A síntese do plutônio e suas interessantes propriedades físséis foram mantidas em segredo até 1946: de fato, houve uma grande censura com relação aos avanços científicos e tecnológicos na fissão nuclear nos periódicos técnicos da época, e as publicações científicas referentes ao assunto foram suspensas. Como a tecnologia disponível à época ainda era experimental, todo o projeto foi uma grande aposta, sofrendo diversas otimizações entre 1942 e 1945; havia dois modelos do “dispositivo” – como eram apelidadas as bombas, sendo desenvolvidos em paralelo, com expectativa de sucesso para pelo menos uma delas (KIERNAN, 2015).

---

<sup>15</sup> *It was a cheap price to pay for the unification of America* (STINNETT, 2001, p. 135).

<sup>16</sup> O urânio encontrado na natureza é o 92-U-238, fértil, que possui apenas 0,7% de 92-U-235, físsil. Os elementos férteis não geram reação nuclear espontânea. Enriquecer o urânio significa aumentar o percentual de 92-U-235, para que seja mantido um processo de fissão nuclear controlado.

<sup>17</sup> O plutônio (94-Pu-239), um elemento químico artificial gerado a partir do urânio, também é físsil.

O falecimento do Presidente Franklin Roosevelt, em 12 de abril de 1945, trouxe o seu vice, Harry Truman (1884-1972), para a Presidência dos EUA. Uma das heranças da gestão anterior foi o Projeto Manhattan, do qual Truman tinha total desconhecimento, assim como o Congresso do País. Na verdade, a inteligência militar acreditava ter total controle do sigilo envolvendo o desenvolvimento de bombas atômicas nos EUA, mas estavam enganados. O agente soviético, espião atômico e físico Klaus Fuchs – codinome *Rest*, fora convidado para testemunhar o teste de explosão da primeira bomba atômica (chamado Teste de Trinity) em Alamogordo, Novo México, em 16 de julho de 1945; no mesmo dia, outro espião soviético, David Greenglass – codinome *Kalibr*, que trabalhava em uma das fábricas do Projeto, viu no horizonte o brilho da explosão atômica e entendeu se tratar do teste; e havia mais agentes russos infiltrados. Desta forma, a URSS tomou ciência, pelos seus próprios meios e quase que imediatamente após o teste de Trinity, de que os Estados Unidos possuíam bombas atômicas com extraordinário poder de destruição. Portanto, de nada adiantou a manutenção do segredo pelos EUA e Inglaterra diante do aliado soviético até Truman informar à Stálin em 1945, fato que só iria agravar uma relação de desconfiança que se consolidou durante a Guerra Fria, um marco na Geopolítica Nuclear (KIERNAN, 2015; CHURCHILL, 2017, p. 491).

As duas versões planejadas da bomba atômica foram construídas: a que explodira no teste de Trinity era a versão “implosão” e utilizava plutônio – desta, havia uma segunda unidade, que foi apelidada de *Fat Man* e lançada em nove de agosto em Nagasaki; e ainda havia uma terceira bomba disponível deste modelo, programada para lançamento em 24 de agosto mas não utilizada, devido à rendição japonesa dias antes. Da versão “arma” só havia uma unidade disponível no início de agosto, batizada de *Little Boy* e lançada em Hiroshima em seis de agosto, contendo todo o escasso urânio enriquecido nas fábricas do Projeto Manhattan – quase 50 kg de 92-U-235. Justamente o acesso contínuo e seguro a fontes minerais de urânio foi uma questão crítica levantada no imediato pós-guerra – sua escassez poderia limitar ou mesmo inviabilizar a confecção de novos artefatos dos dois modelos. Outro desafio extremamente relevante para os EUA era como manter o monopólio do conhecimento científico acerca da tecnologia nuclear, dado que cientistas de diversas nacionalidades além daqueles reunidos no Projeto Manhattan compreendiam o mecanismo por detrás da fissão nuclear: seria uma questão de tempo para que diversos países tivessem condições de fabricar a sua própria bomba atômica (BERNSTEIN, 2007; KIERNAN, 2015).

Assim como Stinnett (2001) questiona se o governo estadunidense não permitiu que Pearl Harbor fosse atacado para permitir a entrada dos EUA na Segunda Guerra Mundial, vários autores levantam a questão da verdadeira motivação para o lançamento dos dois artefatos

atômicos. Se era realmente necessário tal uso, por que não empregar apenas um deles? E por que um intervalo tão curto – somente três dias – entre os dois lançamentos? Alperovitz (1969, p. 13) afirma:

Segundo minha opinião, a evidência presentemente avaliável mostra que a bomba atômica não foi necessária para terminar a guerra ou salvar vidas – e que isto foi compreendido pelos líderes americanos na época. O General Eisenhower lembrou recentemente que nos meados de 1945 ele exprimiu uma opinião semelhante à do Secretário da Guerra: “Disse-lhe que eu era contra, por duas razões. Primeiro, os japoneses estavam prontos para se render e não era necessário atacá-los com essa coisa terrível. Segundo, eu odiava ver o nosso país ser obrigado a usar semelhante arma...”. No momento, não é possível ir além dos limites da conclusão de que a bomba foi desnecessária.

O título do livro de Gar Alperovitz “Diplomacia Atômica” (*Atomic Diplomacy*) traduz a centralidade da questão nuclear nas relações internacionais do pós-guerra e fornece o contexto no qual se estabeleceu a geopolítica nuclear.

Segundo Quigley (1966), Szilard e cientistas envolvidos com o Projeto Manhattan encaminharam ao menos duas cartas à Washington, nas quais buscavam sensibilizar líderes políticos para que impedissem o lançamento das bombas no Japão. Ambas as cartas foram escritas antes do sucesso do teste de Trinity em Alamogordo: traziam em comum a recomendação para o controle nuclear mundial no pós-guerra, limitando a pesquisa para fins bélicos e viabilizando o desenvolvimento científico e tecnológico de seus usos pacíficos, já vislumbrados pelos cientistas, muitos dos quais ganhadores de Prêmios Nobel em Física e Química. Na segunda carta, conhecida como Relatório Franck (nome de outro cientista da equipe e Prêmio Nobel), sugeriram também uma demonstração pública internacional da bomba e afirmavam a impossibilidade da manutenção do monopólio das armas nucleares pelos EUA, enquanto salientavam os prejuízos que o controle de matérias-primas traria ao uso pacífico da energia nuclear. Mesmo com ressalvas, o Relatório Franck, apresentado em junho de 1945, recomendou o controle desses minerais estratégicos.

Uma comissão secreta formada em março de 1945 por cientistas, políticos, militares e destacados membros da sociedade civil se reuniu para estudar um sistema de controle internacional da energia nuclear. O resultado imediato viria a ser conhecido como Relatório Acheson-Lilienthal (CAMARGO, 2006; QUIGLEY, 1966). A partir destes relatórios, começa a se definir um pensamento estratégico em torno da ciência e tecnologia nucleares. Quando a Alemanha se rendeu em oito de maio de 1945, mas não o Japão, coube ao novo Presidente dos EUA (Truman) tomar a decisão de empregar as bombas finalizadas, com a justificativa de obter uma rendição incondicional no menor prazo possível, poupando a vida de soldados estadunidenses; e assim foi feito. Em verdade, as questões geopolíticas já se sobressaíam como

o interesse na obtenção de vantagens negociais perante a URSS, cuja nascente rivalidade reivindicaria um maior poder diplomático (ALPEROVITZ, 1995).

A Organização das Nações Unidas surgiu oficialmente em outubro de 1945. Em sua primeira resolução, datada de 24 de janeiro de 1946 e como resultado da primeira sessão oficial, criou a Comissão de Energia Atômica – CEA para lidar com os problemas suscitados pela descoberta da energia atômica (UN, 2019). O Relatório Acheson-Lilienthal culminaria no Plano Baruch, que foi apresentado à recém-criada CEA. A filosofia do Plano Baruch atendia basicamente às demandas mais imediatas dos EUA no início da Era Nuclear. Rocha Filho (2006) resume as pretensões contidas do referido plano:

[...] propunha a desapropriação de todas as jazidas minerais radioativas para que se corrigissem assim as “injustiças da natureza”, que dera minerais radioativos a quem não tinha a tecnologia e os negara aos que a tinham desenvolvido. [...] As jazidas ficariam sob o controle das Nações Unidas, que transformariam o minério de urânio ou de tório em combustível nuclear.

O Plano Baruch desejava colocar as reservas de minerais radioativos do mundo inteiro sob o controle do Conselho de Segurança da ONU, o que significava dizer, sob o controle dos países com direito a veto. Naquele tempo, os Estados Unidos tinham controle absoluto do conselho.

Marques (1992) e Sales (1958) complementam de forma esclarecedora:

O Plano Baruch representava da mesma forma uma peça integrante da estratégia dos Estados Unidos da América voltada a preservar e manter seu monopólio atômico. Porém, como este não poderia ser sustentado através do conhecimento tecnológico, já que a Física Nuclear era de domínio público, restava unicamente o caminho de lutar pela implantação do monopólio mundial das fontes energéticas nucleares, “com controle rígido de todas as fases de exploração, inclusive a expropriação de jazidas”.

Camargo (2006, p. 159) expõe alguns detalhes contidos no documento apresentado:

Numa abordagem maniqueísta, o Plano Baruch distinguiu dois tipos de atividades nucleares: as autorizadas e as não autorizadas pela ADA [Autoridade de Desenvolvimento Atômico], ou seja, as permitidas e aquelas não permitidas. Encabeçando a lista das atividades não toleradas estavam a mineração e o refino de urânio e tório, que seriam internacionalizadas e expropriadas.

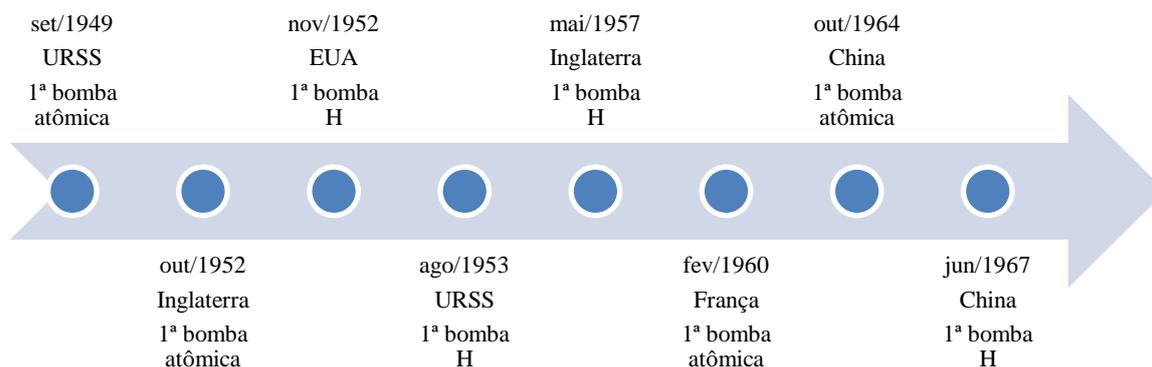
Podemos considerar a apresentação do Plano Baruch como um divisor de águas da Geopolítica, a partir do qual surge efetivamente a Geopolítica Nuclear. A preocupação geográfica com a localização, o acesso, a posse e a quantidade de minerais radioativos ganha importância; e tais materiais passam a receber um tratamento internacional diferenciado do petróleo e do gás natural que, por sua vez, também são matérias-primas críticas para o equilíbrio de poder. Segundo Coutau-Bégarie (2010, p. 572), a geoestratégia seria a “irmã da estratégia nuclear”. Para Conant (1980, p. 91), a “Era da Fissão Nuclear” traz consigo “seu próprio conjunto de fatores geopolíticos”.

Essa tentativa de controle de jazidas para monopólio do conhecimento provou-se infrutífera já em 1949:

Informações sobre o programa atômico dos Estados Unidos tinham chegado à União Soviética via Klaus Fuchs, David Greenglass, mais conhecido como “Kalibr”, e George Koval, entre outros. Tanto Greenglass como Koval tinham passado algum tempo em Oak Ridge<sup>18</sup> durante a guerra, Koval por quase um ano. Greenglass era irmão de Ethel Rosenberg e passara informações para ela e Julius Rosenberg com a ajuda de sua mulher, Ruth. Quando seu papel foi descoberto em 1950, o eventual depoimento de Greenglass resultou na pena de morte para os Rosenbergs e em nenhuma acusação para Ruth. Ele cumpriu uma pena de 15 anos. A União Soviética detonou sua primeira bomba nuclear em 29 de agosto de 1949, em Semipalatinsk, no Cazaquistão. Era uma bomba de implosão, como a Fat Man, cujos esboços Greenglass havia fornecido aos soviéticos (KIERNAN, 2015, p. 299).

Contudo, não eram somente as bombas nucleares de fissão que estavam sendo desenvolvidas. Além dos dois modelos utilizando urânio e plutônio, desde julho de 1942 os Estados Unidos estavam desenvolvendo também a bomba de hidrogênio, conhecida como Bomba H (RHODES, 1988). Fuchs (um dos espiões soviéticos) após a Segunda Guerra Mundial ainda mantinha a URSS atualizada quanto ao progresso estadunidense e britânico no desenvolvimento da Bomba H, que seguia em frente em parte devido ao fracasso do Plano Baruch. A tecnologia da Bomba H de fusão nuclear<sup>19</sup> foi mantida em segredo do próprio Presidente Truman até a explosão da primeira bomba soviética (SULLIVAN, 2016). A figura 1.1 apresenta, em sequência cronológica, os países e suas primeiras detonações de bombas nucleares.

**Figura 1.1 – Linha do Tempo das Primeiras Bombas Nucleares do Clube Atômico.**



**Fonte: Adaptado de Rocha Filho (2006 p. 30-42).**

Em 1953, Truman foi substituído por Dwight David Eisenhower (1890-1969) na Casa Branca. No discurso de lançamento do Programa Átomos para a Paz, em oito de dezembro de

<sup>18</sup> Oak Ridge, no Tennessee, foi a cidade onde foi enriquecido todo o urânio da bomba atômica *Little Boy*.

<sup>19</sup> As bombas atômicas de fusão nuclear, como a bomba H, se baseiam na energia gerada pela fusão de dois átomos leves, de hidrogênio (H de Hidrogênio). Neste caso, utilizam-se os bem conhecidos isótopos do hidrogênio deutério e trítio. A potência é mais de mil vezes maior do que a das bombas atômicas baseadas em fissão de átomos pesados, como urânio e plutônio.

1953, Eisenhower reconhecia publicamente que “o monopólio nuclear americano, tanto do conhecimento atômico quanto das armas nucleares, havia terminado” (CAMARGO, 2006). A partir deste programa, as tecnologias para usos pacíficos do átomo ganharam impulso, e o mundo passou a conhecer algumas das suas futuras aplicações possíveis (e hoje reais), tais como radioisótopos em fertilizantes, alimentos (e medicina); produção de energia elétrica como alternativa para o petróleo, gás natural, hidroeletricidade etc. e propulsão de navios e submarinos (dual). Vários países se beneficiaram da iniciativa – na Índia, por exemplo, o programa nuclear recebeu grande impulso na década de 1950; o Brasil, por sua vez, teve acesso ao seu primeiro reator nuclear (de pesquisa), inaugurado em 1960 (MARGULIES, 2018, p. 69-70; PATTI, 2014, p. 229). A Crise dos Mísseis de Cuba, durante a Guerra Fria, em 1962, foi um momento particularmente tenso com relação ao equilíbrio de poder no mundo e à possibilidade de uma Terceira Guerra Mundial ser deflagrada. Gradativamente, as potências nucleares em geral buscaram o consenso. As guerras que se seguiram foram todas geograficamente restritas e convencionais. Nye (2009) defende que “a desproporção entre a imensa devastação que as armas nucleares podem infligir e quaisquer metas políticas razoáveis tornaram os líderes pouco inclinados a empregá-las”.

A evolução apresentada na figura 1 desencadeou a proposição do TNP – Tratado de Não Proliferação, apresentado inicialmente em 1º de julho de 1968 que, segundo Seitenfus (2016, p. 266) “é visceralmente desequilibrado, pois prevê que os países-membros do clube atômico mantenham suas capacidades nucleares”. Com o TNP nasceu o supracitado clube atômico ou grupo dos Estados Nuclearmente Armados<sup>20</sup> (Nuclear Weapon States – NWS), composto pelos Estados Unidos da América, Inglaterra, Rússia (ex-URSS), França e China que, por conseguinte, possuem assento permanente no Conselho de Segurança da ONU (Organização das Nações Unidas) e direito a veto (SEITENFUS, p. 145-146). O clube atômico foi formado para que este grupo privilegiado detivesse permanentemente vantagem tecnológica e bélica sobre o resto do mundo. Seus membros fixos são exatamente as potências que, gradativamente, foram capazes de produzir independentemente seus próprios artefatos atômicos, consagrados por uma sequência de explosões-teste até 1º de janeiro de 1967. Deste modo, firmou-se a filosofia de cerceamento tecnológico e de controle por detrás da geopolítica nuclear que vigora até hoje, com reflexos para o uso pacífico.

Entretanto, a postura internacional da Índia chama atenção: além da recusa em assinar o TNP (que entrou em vigor em 1970), o país explodiu em 1974 seu primeiro artefato atômico,

---

<sup>20</sup> Decreto nº 2.864 (07/12/1998), Art. IX, 3: “[...] um Estado nuclearmente armado é aquele que tiver fabricado ou explodido uma arma nuclear ou outro artefato explosivo nuclear antes de 1º de janeiro de 1967.

*revelando a fraqueza do regime de não proliferação nuclear* (SPEKTOR, 2009, p.90). Margulies (2008, p. 70) descreve a ação indiana como “uma traição”, assim interpretada pelo governo canadense, fornecedora de reatores nucleares para aquele país, que ainda hoje pertence ao seleto grupo dos cinco países não-signatários do TNP (junto com Paquistão, Israel, Sudão do Sul; e Coreia do Norte, que se retirou do tratado em 2003), resistindo às pressões externas.

O Brasil se situa no meio do caminho deste processo: domina tecnologicamente o ciclo completo do combustível nuclear urânio<sup>21</sup>, mas não usufrui plenamente deste conhecimento; possui capacidade técnica para construção autóctone e operação de reatores nucleares para geração elétrica e para produção de radioisótopos; mas ainda não dispõe de domínio tecnológico (nem de uma firme vontade política) para viabilizar ambos. É um Estado não nuclearmente armado e faz parte do Grupo de Países Supridores – NSG<sup>22</sup>. Quanto a jazidas destes minerais nucleares estratégicos, detém a vantagem de possuir reservas viáveis economicamente tanto de urânio quanto de tório.

Em suma, a tecnologia nuclear é o fundamento e o alicerce da geopolítica nuclear: os Estados que possuem capacidade de construção de reatores e usinas nucleares e de produção do combustível nuclear possuem uma vantagem inequívoca perante aqueles excluídos destas competências.

#### **1.4. Geopolítica Brasileira**

O pensamento geopolítico brasileiro, embora tenha suas raízes localizadas na primeira metade do século XX, passa a ganhar um contorno mais sólido e original a partir do pensamento do coronel Golbery do Couto e Silva. Militar, político e escritor, Golbery dá ênfase ao planejamento da segurança nacional, identificando-a com o próprio conceito de estratégia. Segundo seu pensamento, a segurança nacional pressupõe a nação como unidade de poder no campo internacional. O *Zeitgeist* do pós-Segunda Guerra Mundial pode ser sintetizado no aforismo “Fora do poder não há salvação”, que já salientava os efeitos assimétricos do desenvolvimento tecnoindustrial. Assim sendo:

[...] para Golbery do Couto e Silva a planificação da Política de Segurança Nacional deve arquitetar-se com base numa axiologia própria de uma visão ocidental cristã, democrática, realista e brasileira do sistema internacional.

---

<sup>21</sup> O ciclo do combustível nuclear contém todas as etapas envolvidas na produção do combustível para reatores nucleares, incluindo: mineração, refino, enriquecimento, fabricação do combustível propriamente dito, recuperação de materiais fissionáveis do combustível já utilizado e a sua disposição final ou reutilização.

<sup>22</sup> Grupo de Países Supridores (Nuclear Suppliers Group – NSG) é um grupo de 48 países supridores de material nuclear. Disponível em: < <https://www.nuclearsuppliersgroup.org/en/>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

O conjunto de ensaios reunidos da obra *Geopolítica do Brasil* [...] é prenhe de referências ao papel do Brasil na defesa da civilização ocidental cristã, à importância da preservação do sistema democrático de governo malgrado as vulnerabilidades estratégicas daí decorrentes, ao privilégio do enfoque realista no estudo das relações internacionais plasmadas pela Guerra Fria e à adoção de uma visão geopolítica brasileira do sistema internacional (FREITAS, 2004).

Cabe a Golbery o mérito de fornecer ao Brasil seu próprio “Destino Manifesto Brasileiro<sup>23</sup>”, de caráter regional, desenvolvendo premissas sobre as quais defenderá suas propostas para uma geopolítica brasileira, inserindo-as na agenda nacional. Este teórico define Geopolítica:

[...] como ciência (na conceituação e nos fundamentos) e arte (na *práxis* dela decorrente) que tem por campo de estudo a “fundamentação geográfica das linhas de ação políticas formuladas à luz dos fatores geográficos, em particular de uma análise calcada, sobretudo, nos conceitos básicos de espaço e posição”.

Ainda, destaca o papel preponderante da geopolítica na gestão do Estado, em seu pensamento no contexto político brasileiro:

A Geopolítica auxilia na elaboração dos Objetivos Nacionais Permanentes do Estado, chegando mesmo a preceder a Política na precisa medida em que colabora com esta na apresentação de sugestões e projetos (FREITAS, 2004).

Das premissas deste geopolítico, a Doutrina encerra seu entendimento do que vem a ser geopolítica e da sua interseção com o Estado Brasileiro; em sua Perspectiva ou Cosmovisão, contempla a necessidade de harmonização do progresso político e tecnológico brasileiro com a conjuntura global vigente; em seguida, engendra as Diretrizes Gerais para a Ação alinhadas aos Objetivos Nacionais Permanentes, subdividindo-as em Diretrizes Geopolíticas Internas e Diretrizes Geopolíticas Externas. Ao enxergar na Geopolítica seu papel precípua no aconselhamento político se preocupa, sobretudo, com a coesão e integração regionais junto com a valorização do território no quesito Interno, bem como com elementos de vulnerabilidade Externa imprescindíveis nas questões de segurança e defesa (litoral brasileiro; o Nordeste como “zona de vulnerabilidade máxima” e as fronteiras terrestres no continente sul-americano).

Golbery reconhece a conveniência e oportunidade de uma integração regional sul-americana com apoio mútuo nos desafios de superação do subdesenvolvimento, com a colaboração regional alicerçada numa geopolítica de paz que fortaleceria o respectivo posicionamento local perante a potência nuclear estadunidense. Ao mesmo tempo, seu pensamento contrapõe as teses “mahanianas” e “mackinderianas” adaptadas ao Brasil ao resumir como grande dilema geopolítico nacional um antagonismo “sertão versus oceano”, ou, em suas premissas, “Diretrizes Internas versus Diretrizes Externas”. Ao desenvolver sua Teoria

---

<sup>23</sup> Analogia ao Destino Manifesto estadunidense. Na obra “Geopolítica Mundial e do Brasil no Século XXI”, o Capítulo 22 intitula-se “Destino Manifesto Brasileiro” (PEREIRA, 2017, p. 12; 291).

dos Hemiciclos<sup>24</sup>, acrescenta às Diretrizes Externas uma visão mundial além da continental, para a qual translada a preocupação com uma ameaça externa ideológico-subversiva. Esta orientação perante o cenário internacional prevaleceu durante a maior parte do período da Guerra Fria, quando o Brasil se posicionou ideologicamente em oposição à URSS. Pode-se deduzir do conjunto da obra de Golbery que a meta e síntese da sua Cosmovisão seriam a assunção do Brasil à categoria de Potência Emergente; o cumprimento deste “Destino Manifesto Brasileiro” passaria pela liderança na América do Sul, desde que estabelecido e mantido o alinhamento aos Estados Unidos. Como legado incontestado, a repercussão deste geopolítico na Escola Superior de Guerra (ESG) se faz presente até os dias de hoje, através de sua Doutrina de Segurança Nacional.

O General Carlos de Meira Mattos (1913-2007), outro importante geopolítico brasileiro, professor, militar e contemporâneo de Golbery, compartilhava a ideia de inclusão das premissas geopolíticas na política governamental. Este autor de importantes obras deu ênfase à: integração regional, em especial da Amazônia, articulando a ideia de uma região Pan-Amazônica fortalecida por boas relações fronteiriças, redes de comunicação e estímulo ao povoamento; à concepção de um homem brasílico, fruto da junção de três etnias, como capaz de viabilizar o “Destino Manifesto Brasileiro”; e à questão do Brasil Potência numa análise realista em que o Brasil buscaria se afirmar no cenário internacional como Potência Regional em desenvolvimento constante com crescente expansão de seu poder real ao longo do tempo. Meira Mattos tinha uma profunda confiança nas qualidades e capacidades empreendedoras do homem brasílico de vencer os obstáculos do desafio geopolítico-continental-amazônico. Para este autor, a regionalização ou consagração da vocação regional da Amazônia seria o melhor antídoto para coibir o aparecimento de modernas reencarnações da desmoralizada, mas persistente manobra de internacionalização. Sua Geopolítica Pan-Amazônica prevê a integração multinacional da área Pan-Amazônica, com cooperação regional entre os estados fronteiriços numa ampla zona geopolítica neutra, construindo uma civilização nos trópicos. A assunção do Brasil ao estatuto de Potência Emergente passaria pelo reconhecimento de suas idiossincrasias como nação tropical, capaz de liderar uma vitalização e incorporação ecumênica da região. O general Meira Mattos deu um novo enfoque à importância do Atlântico Sul para o Brasil, concebendo para o país “dois imperativos geoestratégicos inexoráveis: defesa do continente americano e a garantia da segurança atlântica” (MATTOS, 1975; FREITAS, 2004).

---

<sup>24</sup> Teoria dos Hemiciclos de Golbery: a partir do centro a noroeste do núcleo central, projetam-se uma série de hemiciclos em direção ao Atlântico e ao Leste, a partir dos quais são definidas as ameaças ao Brasil existentes em sua época, concluindo que a principal ameaça provinha da URSS como agressor potencial (FREITAS, 2004).

Para o general Meira Mattos, o Brasil e a China seriam os países potencialmente capazes de se tornar potências mundiais no séc. XXI. Todavia, este autor alerta:

As possibilidades do Brasil [...] irão depender muito da nossa capacidade de atuação política, econômica e social. Do ponto de vista militar, como enfrentaremos, inelutavelmente, uma competição internacional, teremos que dimensionar uma força de dissuasão capaz de garantir a tranquilidade de nosso desenvolvimento (MATTOS, 1975).

Ainda, insere a questão nuclear como fundamental para a segurança energética do país, no cenário pós 1º Choque do Petróleo (1973), citando a reavaliação das jazidas de urânio de Poços de Caldas (MG), a descoberta de novas reservas em Figueiras (PR) e perspectivas de imensas jazidas de urânio justamente no norte amazônico – o que interconecta as estratégias geopolíticas relacionadas ao Programa Nuclear Brasileiro e à Pan-Amazônia. Em 1975, ano de publicação da sua obra *Brasil: Geopolítica e Destino*, na qual dedica um capítulo à defesa da energia nuclear, seria assinado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha para construção de oito usinas, com transferência de tecnologia prevista.

Therezinha de Castro (1930-2000), geopolítica e geógrafa do IBGE que veio a compor o quadro da ESG, consolida e expande as lições deixadas por Golbery e Meira Mattos, principalmente na “questão Amazônica”, cuja geopolítica (geoestratégia) busca defender sob a ótica da soberania nacional. Sua cosmovisão se situa em outro *Zeitgeist*, perante o fim da Guerra Fria e a proposta da Nova Ordem Mundial, no qual o mundo “redescobre” e passa a cobiçar a Amazônia:

Therezinha de Castro começa por alertar para as ameaças reais à soberania nacional brasileira resultantes de estudos científicos relativos ao grau de destruição da floresta e do humanismo faccioso gerado mundialmente em torno da proteção dos índios. Essas ameaças foram consubstanciadas na tese de soberania relativa defendida, em 1989, pelo Presidente francês François Mitterrand. Tal proposta era defendida ainda por Mikhail Gorbatchov ao qual se atribui a frase “o Brasil deve delegar parte dos seus direitos (sobre a Amazônia) aos organismos internacionais competentes”. Em princípio, legitimadoras dessa comunhão de pontos de vista sobre a imposição internacional ao Brasil da doutrina de soberania limitada e a internacionalização de parte significativa do seu território, a Ecologia e a *práxis* das Organizações Não-Governamentais (ONGs) afiguram-se, para Therezinha de Castro, essenciais “ao serviço do neocolonialismo, [...]” (FREITAS, 2004, p. 97).

É notória a semelhança o discurso supracitado de internacionalização da Amazônia com o seu equivalente, oriundo do Plano Baruch de 1946, no qual se propunha uma internacionalização das jazidas de minerais atômicos. Diante desse claro ataque à soberania nacional, refundam-se as Diretrizes Internas de Golbery com a visão Pan Amazônica de Meira Mattos no preceito “integrar para não entregar”. A ideia subjacente é eliminar as causas que suportam as propostas de internacionalização, através da correta ocupação deste vácuo demográfico, exploração econômica alinhada com proteção ambiental, preservando quando possível, mas substituindo a

conservação pelo desenvolvimento sustentado da região. Ainda, Therezinha de Castro alerta para interferências ligadas a entidades religiosas como a CNBB – Conferência Nacional de Bispos do Brasil, e inclusive órgãos internos como a FUNAI – Fundação Nacional do Índio, ambos associados a interesses estrangeiros.

A defesa da Antártica figura como mais uma de suas bandeiras, cuja percepção geopolítica aguçada conecta a importância de “marcar posição no sexto continente” com a defesa do Atlântico Sul. Therezinha de Castro estabelece uma interessante ponte entre a Antártica e a energia nuclear ao expor que a comunidade científica internacional já havia antecipado a presença de urânio naquela região. Não obstante, a presença do Brasil na Antártica vem a reforçar seu caráter de Potência Regional e Potência Mundial Emergente. Com relação à Nova Ordem Mundial, a geopolítica alinha-se a Golbery e Meira Mattos no quesito integração regional para resistir à sede de poder dos países do hemisfério norte, reforçando a importância do estímulo brasileiro ao fortalecimento de acordos regionais como o do MERCOSUL. Para este objetivo, muito contribuiu o posicionamento brasileiro em defesa dos direitos da Argentina na disputa pelas Malvinas/Falklands (1982), promovendo o arrefecimento da bipolaridade militar regional Brasil-Argentina que, principalmente a partir dos seus governos democráticos, passaram a colaborar em inúmeras áreas (inclusive a nuclear).

A Teoria do Quaternio, apresentada pelo coronel brasileiro e professor de geopolítica Roberto Machado de Oliveira Mafra, traz como pedra basilar a não aceitação do tratamento dado ao Brasil e aos países latino-americanos como potência inferior, aos quais seria imposto um papel secundário no cenário internacional com caráter de neocolônia. Para tanto, define quatro blocos – Norte-americano, Sul-americano, Europeu e Asiático (excluiu a África), propondo a criação de uma União Latino-americana (ULA), ampliando a quantidade de membros e respectiva atuação do MERCOSUL até se tornar uma comunidade de nações, tal qual a União Europeia. Com a consolidação da ULA, aí sim a América Latina poderia se segregar da civilização ocidental, como descrito na Teoria do Choque das Civilizações (MAFRA, 2006, p. 181-196), promovendo autonomia e uma identidade latino-americana.

A Minuta do Livro Branco da Defesa Nacional, publicada em 2016, descreve as prioridades geopolíticas do Brasil:

Em termos geopolíticos, o Brasil dá prioridade a seu entorno imediato, definido como entorno estratégico, constituído pela América do Sul, o Atlântico Sul, costa ocidental da África e a Antártica (BRASIL, 2016).

Nesta síntese, encontramos a marca indelével do legado dos principais geopolíticos brasileiros. Golbery, Meira Mattos e Therezinha de Castro certamente leram Mahan e, acompanhando os

acontecimentos ao longo do século XX, estavam cientes de que este respeitado geopolítico e autor estadunidense há tempos preconizara o total e completo controle do Golfo do México e do Caribe como uma “resolução inviolável da nossa [EUA] política externa” (MAFRA, 2006, p. 106). Destarte, pode-se inferir que a recente (2018-2019) investida estadunidense na Venezuela através de pesadas sanções e questionamento da legitimidade do Presidente Nicolás Maduro guarda antigas pretensões geopolíticas quanto à região costeira e ao petróleo, que datam de um período anterior à Segunda Guerra Mundial, à Guerra Fria e a própria pretensa Nova Ordem Mundial; entretanto, não seria um “cisne negro<sup>25</sup>” enxergar nesse movimento geopolítico orquestrado a procura de uma “porta de entrada legítima” para as riquezas da Amazônia, com acesso à sua biodiversidade e às suas riquezas em minérios estratégicos, incluindo ferro, ouro, urânio e tório brasileiros, ameaçando mais uma vez a soberania nacional. Na mesma linha de pensamento, cabe destacar, com relação aos interesses internacionais pelo aquífero Guarani, o fato do mesmo ser rico em urânio (BONOTTO, 2004).

## **1.5. Geopolítica Nuclear Brasileira**

Em quatro de maio de 1925, o navio *Valdívia* trouxe o ilustre Albert Einstein para o Brasil. Durante sua curta permanência, fez duas conferências: uma no Clube de Engenharia e outra na Escola Politécnica do Rio de Janeiro (TOLMASQUIM, 2003). Pouco mais de dez anos depois, o País recebeu Marie Curie, que proferiu uma conferência no Rio de Janeiro, “em sessão solene secretariada por Álvaro Alberto da Motta e Silva [...] recebendo o título de membro correspondente da Academia Brasileira de Ciências” (CAMARGO, 2006). Embora o País possuísse um baixíssimo índice de industrialização nesse período, os cientistas brasileiros procuravam manter-se atualizados com as mais recentes descobertas estrangeiras, fazer intercâmbio e disseminar a pesquisa.

### **1.5.1. Da Fase das Areias Monazíticas até o contrato de Angra I**

O Brasil passa a ser considerado um ator estratégico na geopolítica nuclear internacional basicamente com o seu nascedouro, e por uma razão muito simples: em 1945, tinha interessantes reservas de areias monazíticas. Ainda, situados estrategicamente ao sul dos EUA éramos, ao lado deste, aliados do Reino Unido no conflito da Segunda Guerra Mundial. As

---

<sup>25</sup> Neste contexto, “cisne negro” é um evento com basicamente três atributos: raridade, impacto extremo e previsibilidade retrospectiva, mas não prospectiva (TALEB, 2015).

abundantes areias monazíticas do litoral capixaba – que possuíam cerca de 2% de minério de urânio e 6% de minério de tório em sua composição – já haviam sido largamente exportadas antes da compreensão do seu real valor como combustível atômico estratégico, e o País desconhecia a quantidade disponível desta matéria-prima (ROCHA FILHO, 2006). Em termos de matriz energética brasileira, mais de 85% da era baseada em carvão e lenha (SALLES, 1985, p. 55-56). Neste cenário os EUA, antes mesmo da explosão da bomba atômica em Alamogordo, fizera um acordo secreto com o Brasil, via Itamaraty, para compra de cerca de 100.000 toneladas de monazita. Seriam 3.000 ton./ano por três anos, prorrogável por dez triênios consecutivos (SALLES, 1985, p. 85-86). Mesmo com a oposição e denúncia no Brasil do Conselho de Segurança Nacional (CSN), ao final do primeiro triênio as exportações continuaram, sem renovação formal do contrato, até 1951. Durante a apresentação do Plano Baruch em 1946 na CEA, visando controlar as reservas minerais de combustíveis atômicos de todos os países possuidores de jazidas, destaca-se aqui a histórica referência ao Almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva (1889-1976), estadista, cientista e representante do Brasil:

[...] a posição do almirante Álvaro Alberto naquela comissão explica uma série de acontecimentos daí decorrentes. Em nome do Brasil, Álvaro Alberto concordou com a proposta de “correção das injustiças da natureza”, desde que ela fosse estendida aos demais combustíveis minerais, como petróleo e carvão. O representante brasileiro foi a única voz que se levantou para fazer objeções ao Plano Baruch, que chegou a ser aprovado pela comissão, com apenas duas abstenções – Índia e Austrália – mas com uma vitória do ponto de vista do representante brasileiro, que, na prática, o invalidava a tornar compulsórias as compensações específicas (ROCHA FILHO, 2006, p. 61).

Em 1951, o Brasil dá início formal à sua Política Nuclear através da Lei 1.310, que cria o Conselho Nacional de Pesquisas (CNP, futuro CNPq), delimitando explicitamente as exportações de urânio, tório e berilo (este último, mineral importante para a tecnologia nuclear), e formalizando um conceito previamente elaborado por Álvaro Alberto – O Princípio das Compensações Específicas – que incluía contrapartidas tecnológicas pelo fornecimento de materiais atômicos:

Álvaro Alberto elaborou a tese segundo a qual o preço não podia representar o valor real e total do produto e que se tornavam assim necessárias outras compensações, entre elas as seguintes: (a) preço remunerador, porém não suficiente; (b) prioridade para instalação de reatores primários, destinados à produção de combustíveis nucleares e secundários, destinados à produção de energia, conforme a terminologia da Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos; (c) cotas preferenciais de energia em favor do produtor de matéria-prima; (d) direito de representação permanente no organismo internacional a ser criado; e, sobretudo, (e) fornecimento dos equipamentos necessários ao nosso desenvolvimento nessa área, juntamente com treinamento de pessoal. Não há referências à transferência de informações (Resolução do CNP, 7 de julho de 1951 e 3 de dezembro de 1951). Isso é o que se passou a denominar de compensações específicas (ROCHA FILHO, 2006, p. 63).

No ano seguinte, novamente via Itamaraty, os EUA conseguiriam um novo acordo de exportação de areias monazíticas, burlando as compensações específicas. Ainda em 1952, o poder decisório do CNP é diluído com a criação da Comissão de Exportação de Materiais Estratégicos (CEME), que em sua 8ª sessão já descongela a exportação de berilo e na 15ª sessão autoriza a antecipação da remessa de todo o tório que seria enviado no triênio do contrato. Em 1954, novamente a CEME aprova um novo contrato com os EUA, no qual o Brasil se comprometeu a exportar 5.000 ton. de areias monazíticas e 5.000 ton. de terras raras (subproduto) em dois anos, tendo como contrapartida a obrigação de importar 100.000 ton. de trigo americano, para entrega imediata. Apesar de apoiar a Política Nuclear Brasileira idealizada pelo EMFA e pelo CNP, o então Presidente do Brasil Getúlio Vargas (1882-1954) assinou o acordo Tório x Trigo quatro dias antes do seu suicídio.

Em 1953, o CNP desistiu de obter qualquer tipo de cooperação técnica formal dos EUA. Em viagem à Europa, o almirante Álvaro Alberto obtém excelente receptividade para aquisição de indústria para obtenção de urânio nuclearmente puro e de isótopos (França) e de ultracentrífugas para geração de energia elétrica (Alemanha). Em 1954, o Presidente do Brasil Café Filho (1899-1970) inabilita o CNP de manter negociações com o exterior, e as usinas francesas ficam com seu projeto suspenso por mais de dois anos. As três ultracentrífugas alemãs prontas, testadas e pagas (US\$ 80.000) foram interdidadas por Washington via Reino Unido no porto de Antuérpia em 1954, vindo para o Brasil somente em 1957<sup>26</sup>. Durante o período 1945-1956, a Orquima S/A foi a principal exportadora de areias monazíticas do Brasil. Como empresa privada, fazia *lobby* pelo governo americano para quebrar as tentativas do CNP de reduzir ou cessar sua fonte de receita. Esse assunto foi publicamente tratado e discutido durante a primeira CPI Nuclear<sup>27</sup> (SALLES, 1985; ROCHA FILHO, 2006; PATTI, 2014).

No início do governo JK<sup>28</sup>, cogita-se pela primeira vez a instalação de uma usina nuclear no Brasil. Segundo de Biasi (1979, p. 51):

A primeira ideia para a construção de uma usina nuclear no Brasil surgiu em 1956, quando o Grupo AMFORP (American and Foreign Power), antiga *holding* norte-americana, que até a criação da ELETROBRÁS controlava diversas empresas brasileiras de eletricidade, hoje nacionalizadas, cogitou de instalar, numa delas – a Cia. Brasileira de Energia Elétrica do Estado do Rio de Janeiro – uma usina de pequeno porte (10 MW), perto de Cabo Frio. O custo do empreendimento, inicialmente estimado em mil dólares por kW, foi posteriormente reajustado para 2 mil dólares por kW. Em vista disso, o projeto foi abandonado.

---

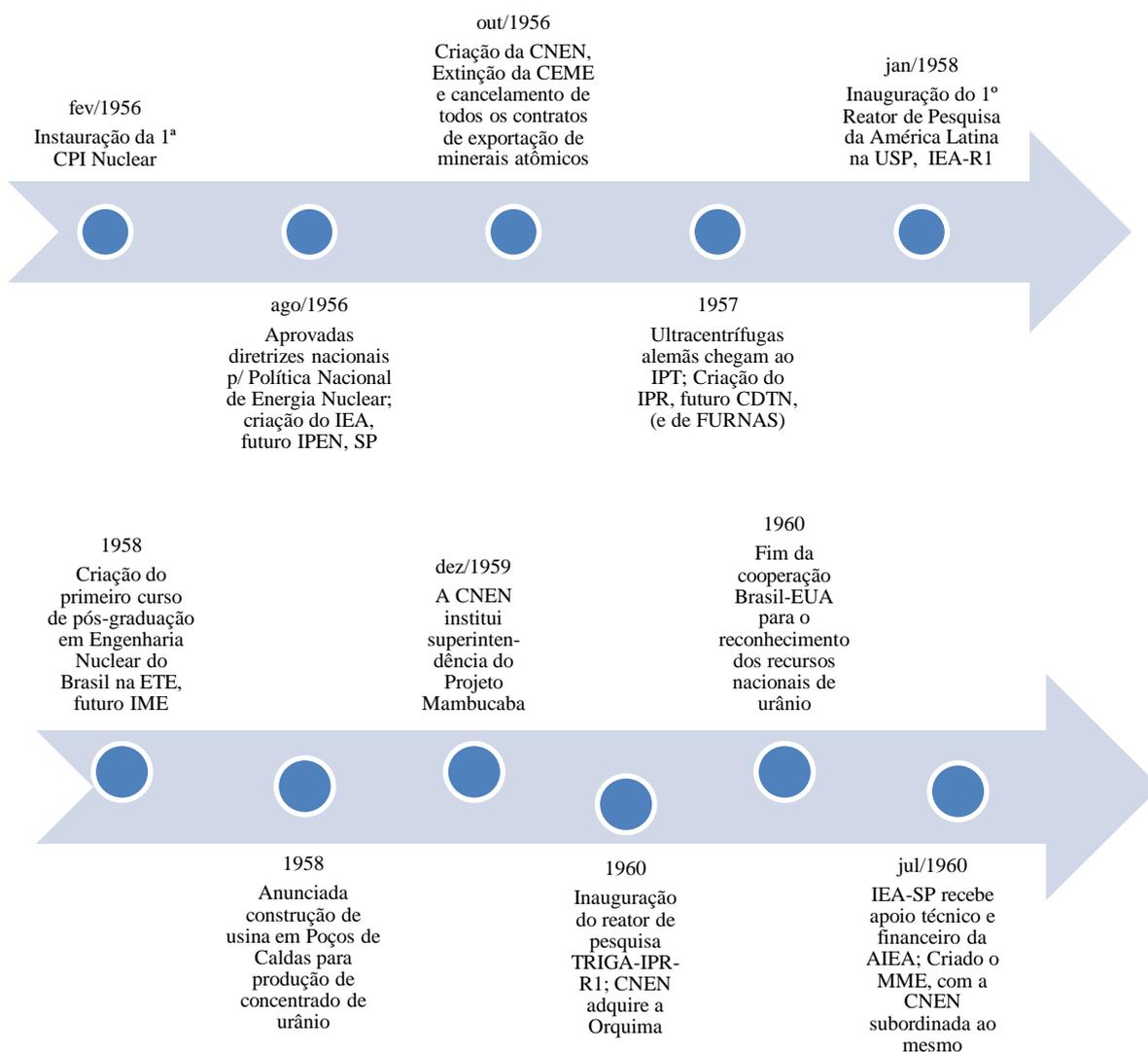
<sup>26</sup> Em 1957 o IPT recebeu duas ultracentrífugas, que lá permaneceram emparedadas até 1967, ano em que foram transferidas para o IPEN (MARQUES, 1992, p. 52).

<sup>27</sup> Em 10 de fevereiro de 1956, foi criada uma CPI – Comissão Parlamentar de Inquérito para apurar as controvérsias envolvendo a energia atômica e os acordos de comercialização de areias monazíticas com os EUA.

<sup>28</sup> Juscelino Kubitschek (1902-1976), Presidente do Brasil de 1956 a 1960.

O governo JK foi particularmente benéfico para a área nuclear, como mostra a linha do tempo da figura 1.2. O quadro 1.1 abaixo apresenta o significado das siglas da figura 1.2 e um sítio de referência na internet para consulta e acesso a maiores informações.

**Figura 1.2 – Linha do Tempo dos Fatos Mais Relevantes na Área Nuclear Brasileira durante o governo JK.**



Fonte: Adaptado de Rocha Filho (2006 p. 30-42), Patti (2014), Marques (1992) e Camargo (2006).

**Quadro 1.1 – Abreviações utilizadas na figura 1.2 e respectivos sítios (sites) de acesso.**

Sigla	Descrição	Site de Referência
IEA	Instituto de Energia Atômica	<a href="http://legis.senado.leg.br/norma/462455">http://legis.senado.leg.br/norma/462455</a>
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares	<a href="https://www.ipen.br/">https://www.ipen.br/</a>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas	<a href="https://www.ipt.br/">https://www.ipt.br/</a>
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito	<a href="https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/parlamentar-de-inquerito">https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/parlamentar-de-inquerito</a>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear	<a href="http://www.cnen.gov.br/">http://www.cnen.gov.br/</a>

CEME	Comissão de Exportação de Materiais Estratégicos (1952-1956)	<a href="http://www.fgv.br/cpdoc/acervo/dicionarios/verbet-e-tematico/comissao-de-exportacao-de-materiais-estrategicos-ceme">http://www.fgv.br/cpdoc/acervo/dicionarios/verbet-e-tematico/comissao-de-exportacao-de-materiais-estrategicos-ceme</a>
IPR	Instituto de Pesquisas Radioativas (1952-1977)	<a href="http://www.cdtm.br/o-cdtm">http://www.cdtm.br/o-cdtm</a>
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear	<a href="http://www.cdtm.br/">http://www.cdtm.br/</a>
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S/A ou simplesmente Eletrobrás Furnas	<a href="https://www.furnas.com.br/">https://www.furnas.com.br/</a>
ETE	Escola Técnica do Exército (1933-1959)	<a href="http://www.ime.eb.mil.br/pt/historia.html">http://www.ime.eb.mil.br/pt/historia.html</a>
IME	Instituto Militar de Engenharia	<a href="http://www.ime.eb.mil.br/pt/">http://www.ime.eb.mil.br/pt/</a>
MME	Ministério das Minas e Energia	<a href="http://www.mme.gov.br/">http://www.mme.gov.br/</a>
TRIGA	Training Research Isotope General Atomic	<a href="http://www.cdtm.br/instalacoes-de-grande-porte/reator-triga-ipr-r1">http://www.cdtm.br/instalacoes-de-grande-porte/reator-triga-ipr-r1</a>
AIEA/IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica / International Atomic Energy Agency	<a href="https://www.iaea.org/">https://www.iaea.org/</a>

**Fonte: Elaboração Própria.**

O decreto 47.574, de 31/12/1959, cria na CNEN a Superintendência do Projeto Mambucaba, que foi o segundo movimento para obtenção de uma usina nuclear no Brasil, desta vez com capacidade entre 150 e 200 MW, localizando-se às margens do rio Mambucaba, no estado do Rio de Janeiro. Segundo especialistas, esta deveria ter sido a escolha para a localização da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, por aspectos geográficos relacionados à segurança das fundações. Apesar dos intensos estudos decorridos no período, o Projeto Mambucaba foi encerrado em 1963, devido à indefinição quanto à tecnologia do reator nuclear e do combustível a ser utilizado, associada a problemas ligados à conjuntura econômica do país na época. Entretanto, o conteúdo dos trabalhos realizados seria futuramente aproveitado na concepção do projeto de Angra I, após o início do regime militar brasileiro em 1964, já no governo Costa e Silva, entre 1967 e 1969, tendo continuidade no governo Médici – de 1969 a 1974 (DE BIASI, 1979, p. 51).

Uma das conclusões dos estudos do Projeto Mambucaba se referia à capacidade da usina. Deste modo, os estudos seguintes passaram a considerar uma potência mínima de 300 MW. Em 1965, a CNEN instituiu o Grupo de Trabalho de Reatores de Potência, que teve curta duração. Somente em 1967, a partir de um novo Grupo de Trabalho Especial, envolvendo representantes da CNEN, ELETROBRÁS, MME e CSN, surgiu a recomendação de uma usina nuclear com capacidade em torno de 500 MW, que obteve respaldo de técnicos nucleares da AIEA no ano seguinte. A decisão de construção de Angra I se deu em 1969. Em 1970 decidiu-se a localização da usina na praia de Itaorna, município de Angra dos Reis, cujo local estimava-se que teria capacidade de abrigar até três usinas com um total de 1.800 MW. Após a conclusão do processo licitatório, em sete de abril de 1972 o contrato para construção da primeira usina nuclear brasileira foi assinado com a Westinghouse. Os termos da negociação não

contemplavam a transferência da tecnologia de enriquecimento de urânio (DE BIASI, 1979, p. 51-78).

### 1.5.2. Da decisão de Angra I até o Programa Nuclear Brasil-Alemanha

Houve um período na história do desenvolvimento nuclear brasileiro em que o tório chegou a ser um elemento estratégico de destaque. Tanto que, de 1965 a 1973, formou-se o chamado Grupo do Tório, reunindo cientistas brasileiros (IPR/CDTN) que, com a cooperação francesa, estudaram as possibilidades do uso do tório como combustível nuclear, na tentativa de desenvolvimento autônomo de um reator nuclear de tecnologia nacional. Na década de 1950, os EUA também já pesquisavam no laboratório de Oak Ridge as tecnologias de reatores regeneradores de tório (*thorium breeder reactors*) e reatores a sal fundido (*MSR – Molten Salt Reactors*). Embora indicadores técnicos e econômicos atestassem o sucesso da pesquisa estadunidense, em 1976, após uma sequência de contingenciamento de custos, ela foi definitivamente encerrada devido a questões da política nuclear relacionadas com a Guerra Fria<sup>29</sup> (MARTIN, 2012, p. 5).

A decisão pela compra do reator de água leve para Angra I interrompeu, junto com os trabalhos do Grupo do Tório, outras iniciativas de desenvolvimento de uma tecnologia nuclear nacional para reatores nucleares e seus combustíveis. Uma dessas pesquisas encerradas por falta de apoio institucional foi a do Grupo de Trabalho do Reator de Potência – GTPR do CNEN, que pesquisava o modelo de reator gás-grafite, baseada na tecnologia dos primeiros reatores comerciais franceses e britânicos (MALHEIROS, 2018, p. 52-58). Outro exemplo foi a do Grupo da Água Pesada<sup>30</sup>, no IME (1964-1977). Buscava-se no País a certeza de optar por uma tecnologia segura. Entretanto, houve grande frustração nos anos iniciais de Angra I, sendo uma das principais razões um defeito apresentado no gerador de vapor, que demorou anos para ser solucionado e contribuiu para corromper a credibilidade da geração nuclear nacional, além dos prejuízos para o País. Segundo Leite (2007, p. 219), este não foi um evento isolado:

Antes que entrasse em operação o reator de Angra I, já surgiram, em outubro de 1981, problemas nos geradores de vapor do mesmo fabricante, nas instalações de Ringhals, na Suécia, e Almaraz, na Espanha. Assim, e por prudência, e ainda em virtude desse fato, a licença de operação inicial de Angra I foi fixada no máximo de 30% da sua

<sup>29</sup> *Weinberg believed that thorium-based fluid-fuel reactors would ensure the lab's central place in the emerging nuclear power industry. He was wrong. Officially the MSR Experiment lasted from 1959 to 1973, when it was canceled, only to be reinstated for reasons lost in the obscurity of long-ago energy policy in 1974 and then finally terminated for good in 1976. The most remarkable thing about the program is that, by all technical and economic measures, it was a resounding success. Politically, though, it was a dud.*

<sup>30</sup> A pesquisa com reatores de água pesada teve uma segunda fase, mas não resistiu ao acordo posterior com a Alemanha, que compraria mais oito usinas baseadas na tecnologia de água leve (LEITE, 2007, p. 225-226).

potência nominal. Até 1990, 44 geradores de vapor com projeto Westinghouse, operando em usinas nucleares norte-americanas, apresentaram defeitos semelhantes aos de Angra.

Por outro lado, o País mantinha a dependência tecnológica – tanto do projeto e construção do reator quanto da fabricação do combustível nuclear o que, de certa forma, pavimentou o caminho para o estabelecimento formal de um Programa Nuclear Brasileiro concretizado através do Acordo Nuclear Brasil-Alemanha:

A construção de Angra I fora iniciada em 1971 [antes da assinatura do contrato com a Westinghouse], com conclusão prevista para fins de 1976. Furnas recebeu o encargo de construir Angra II e III em fins de 1974. Os contratos entre Furnas e a Siemens-KWU foram assinados em 1976, prevendo-se a entrada em operação das usinas, respectivamente, em 1983 e 1984. **Os programas II e III atropelaram o primeiro programa a meio curso** (LEITE, 2007, p. 222, *grifos nossos*).

[...]

A decisão dos Estados Unidos, ao tempo do presidente Carter, de impedir o fornecimento de combustível a quem não assinasse o tratado de não-proliferação foi outro complicador, que influenciou as discussões do governo brasileiro (LEITE, 2007, p. 223-224).

O país havia buscado anteriormente a parceria francesa; mas estes, por pressão estadunidense, cancelaram a negociação no último instante. Restava a Alemanha (Occidental), que firmou acordo para compra de oito usinas, com transferência de tecnologia do ciclo nuclear completo. A reação imediata do governo estadunidense foi aumentar secretamente as salvaguardas alemãs, fato que foi denunciado pelo Itamaraty à imprensa mundial, levantando o debate público. Antes mesmo de assumir a presidência dos EUA, Jimmy Carter (Presidente dos EUA de 1977 a 1981) advogava publicamente pela interrupção da venda. Perseguiu insistentemente o governo Geisel (de 1974 a 1979) para que o Brasil reconhecesse o Tratado de Tlatelolco<sup>31</sup>, também conhecido como Tratado para a Proscrição das Armas Nucleares na América Latina e no Caribe, que já estava assinado desde 9 de maio de 1967 e ratificado desde 29 de janeiro de 1968 – muito embora só tenha entrado efetivamente em vigor em 16 de setembro de 1994 (BRASIL, 1994; CAMARGO, 2006; ROCHA FILHO, 2006; SPEKTOR, 2009, p. 159-160).

Na negociação do acordo estavam presumivelmente abertos os canais do processo de jato centrífugo [jet-nozzle], então em desenvolvimento na própria Alemanha, e o das ultracentrífugas, também instalado na Alemanha em cooperação com a Holanda e a Inglaterra (*Urenco Enrichment Group*). Essa empresa recusou, todavia, a transferência de tecnologia ao Brasil [do enriquecimento de urânio por ultracentrifugação], alegando nossa recusa em assinar o Tratado de Não-Proliferação – TNP (LEITE, 2007, p. 224).

No contexto dos dois choques do petróleo (1973 e 1979) que encareceram abruptamente os preços do petróleo e de seus derivados, acudado diante das manobras estadunidenses

---

<sup>31</sup> Tratado de Tlatelolco – Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares para a América Latina e o Caribe, conforme Decreto nº 1.246, de 16/09/1994 (BRASIL, 1994).

corroborada com a recusa da URENCO, no intuito de impedir ao o acesso do País à tecnologia nuclear para enriquecimento de urânio, o Brasil decide optar pelo desenvolvimento autóctone do ciclo do combustível, dando início ao seu Programa Autônomo de Tecnologia Nuclear – PATN, também chamado de Programa Nuclear Paralelo. Ainda, a partir de outubro de 1978, para complicar os desafios e embates acerca da obtenção da tecnologia nuclear, o governo brasileiro teve que lidar com uma segunda CPI envolvendo questões nucleares: desta vez, tratava-se de denúncias de irregularidades no acordo com a Alemanha (Ocidental).

### 1.5.3.O Programa Nuclear Paralelo e o Domínio do Ciclo do Combustível

O domínio do ciclo do combustível urânio justifica-se por diversas razões, desde as questões econômicas e tecnológicas, como a desejada autonomia para abastecimento das usinas nucleares nacionais e a possibilidade de entrada neste lucrativo e restrito mercado via exportação, bem como fatores estratégicos, como a obtenção de um assento permanente no Conselho de Segurança da ONU e a possibilidade de abastecer um reator de propulsão nuclear – que pode operar com LEU ou requerer um alto nível de enriquecimento de urânio<sup>32</sup>. Certamente, tal conhecimento e capacidade (LEU/HEU) também permitem a confecção de artefatos bélicos. Todavia, devido aos acordos internacionais assinados pelo Brasil essa possibilidade, que se apresenta remota no século XXI, era cogitada e, possivelmente, um dos objetivos do Programa Nuclear Paralelo.

Da geopolítica nuclear presente nos anos de Guerra Fria depreende-se a necessidade de sigilo em assuntos estratégicos relacionados com segurança e defesa para preservação da soberania nacional. Assim sendo, o atual Programa Nuclear da Marinha – PNM nasceu em 1979 como parte do Programa Paralelo:

O programa nuclear brasileiro pela Marinha, iniciado na década de 1970, se desenvolve em três fases. O Projeto Chalana dividido em Zarcão (estudo e planejamento do projeto), o Ciclone (enriquecimento do urânio), e o Remo (Projeto de construção de um reator nuclear para submarino) (VAL, 2016, p. 79).

Essa informação, que era secreta, hoje é pública e se encontra atualizada e disponível no site do Ministério da Defesa:

O Programa Nuclear da Marinha, iniciado em 1979, está dividido em dois grandes projetos: o domínio do ciclo do combustível nuclear e o Laboratório de Geração Núcleo-Elétrica (LABGENE).

<sup>32</sup> O urânio considerado altamente enriquecido, *high enriched uranium* – HEU possui uma concentração de urânio-235 superior a 20%. Já no urânio levemente enriquecido, *low enriched uranium* – LEU, a concentração de urânio-235 é inferior a 20%. Enriquecer urânio significa aumentar o percentual do isótopo urânio-235 em relação ao urânio-238 para um valor acima do encontrado na natureza: U-235 (0,72%) e U-238 (99,28%).

O Brasil já domina o ciclo de produção do combustível nuclear. A Marinha inaugurou, em fevereiro de 2012, a Unidade Piloto [Produtora] de Hexafluoreto de Urânio (USEXA), última etapa para o domínio pleno do ciclo.

O LABGENE tem o propósito de desenvolver a capacidade tecnológica para o projeto, construção, operação e manutenção de reator nuclear do tipo PWR (Pressurized Water Reactor) que será empregado na propulsão do primeiro Submarino Nuclear (SN-BR) a ser construído no Brasil (BRASIL, 2019).

O Programa Nuclear da Marinha se encontra em consonância com a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (descrita na EMA-415), o qual aponta para a importância do “desenvolvimento de competências tecnológicas no Setor Nuclear” (BRASIL, 2017, p. 14). Tal estratégia aborda os desafios tecnológicos empregando três conceitos-chave envolvendo horizontes de tempo distintos: A Marinha do Presente (MP); a Marinha do Amanhã (MA) e a Marinha do Futuro (MF)<sup>33</sup>. Ciente da velocidade das transformações tecnológicas disruptivas, incluindo as de emprego dual, que eleva os riscos nos projetos de longa duração, o documento expõe claramente o interesse na área nuclear:

a) A busca pelo domínio científico e tecnológico em áreas sensíveis ou estratégicas de interesse da MB [...], **com destaque para o Projeto, a construção e a operação de Submarinos com Propulsão Nuclear**; (BRASIL, 2017, p. 20, *grifos nossos*).

É importante frisar que o interesse da MB em CT&I envolve um conjunto de temas de interesse da Força. Nesse particular:

[Nuclear e Energia] possuem características comuns do ponto de vista de sua aplicação pelos Setores Operativo e do Material e das capacidades operacionais a serem obtidas (BRASIL, 2017, p. 43).

Em sua visão de futuro, descreve sua expectativa para o Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (SCTMB) e sua relação com as políticas públicas nacionais voltadas à CT&I:

O SCTMB será um Sistema de CT&I dinâmico, **harmônico**, integrado, sinérgico, interdisciplinar e adaptativo:

[...]

3.2.2 – Um Sistema que atue de forma harmônica com as Instituições dos setores público e privado, no sentido de explorar e otimizar estímulos oriundos de **políticas públicas voltadas à CT&I** (BRASIL, 2017, p. 24, *grifos nossos*).

Em seguida, aponta para a filosofia da Tripla Hélice do Conhecimento Científico (ETZKOWITZ, 2008) como caminho para execução, composta pela Academia, Governo e Indústria, esta última definida como Base Industrial de Defesa (BID).

A Marinha do Brasil ainda mantém sob sua responsabilidade o PROSUB – Programa de Desenvolvimento de Submarinos que possui, dentre outras metas, a construção do primeiro

<sup>33</sup> Quadro temporal relacionado aos meios navais, aeronavais e de fuzileiros navais, bem como os respectivos sistemas e subsistemas da MB: operação e manutenção dos meios atuais e pequenas modernizações – MP; meios que estão sendo construídos e/ou obtidos, incluindo “compras de oportunidade” – MA; P&D com análise de conjuntura, prospecção e primeiros passos para concepções futuras – MF.

submarino brasileiro e da América Latina com propulsão nuclear, o SN-BR. O LABGENE será o protótipo em terra do reator para propulsão naval nuclear. A construção do submarino de propulsão nuclear, importante instrumento de poder naval e dissuasão, depende de um complexo processo de transferência tecnológica da França, parte dele com emprego dual – ou seja, com aproveitamento para a indústria brasileira. Cabe ressaltar que o reator nuclear será desenvolvido com tecnologia autóctone.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN destaca como principais desafios para o setor nuclear brasileiro:

- a) buscar a autonomia e sustentabilidade do Brasil na produção de energia nucleoeleétrica;
- b) ter autossuficiência nas etapas do ciclo combustível com possibilidade de exportação de excedentes;
- c) ampliar a oferta de produtos e serviços tecnológicos na área nuclear (saúde, meio-ambiente, agricultura e indústria); e
- d) atender ao previsto na Estratégia Nacional de Defesa, no que se refere ao desenvolvimento de submarino de propulsão nuclear.  
(CNEN, 2016, p. 10)

O domínio do ciclo do combustível para o urânio não está completamente operacional:

Atualmente, o Brasil possui o domínio tecnológico de todas as etapas do ciclo do combustível nuclear em escala laboratorial ou em usina de demonstração. Com capacidade plena para atendimento da atual demanda de Angra 1 e 2, em escala industrial, operam unidades das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) das etapas de mineração, pastilhas e de elementos combustíveis, enquanto a Usina de Enriquecimento, em implantação, não atingiu capacidade instalada suficiente. A etapa de Conversão, de acordo com o planejamento estratégico da INB, atualmente encontra-se em fase de projeto, com previsão de início de implantação para a próxima década (CNEN, 2016, p. 4).

Atualmente, os projetos nucleares envolvendo o urânio encontram grande resistência externa e da própria sociedade brasileira, conforme mencionado em Malheiros (2018, p. 59):

Lamentavelmente essa área ainda não foi compreendida pelo grande público e muito menos pelas autoridades que comandam o País. Possivelmente, dentro de poucos anos, vamos pagar caro por esse esquecimento. Nenhum país que pretenda passar para o Primeiro Mundo pode deixar de lado o conhecimento nuclear. A energia nuclear é uma das maiores fornecedoras de alta tecnologia para toda a indústria. Hoje, no Brasil, aqueles que falam de energia nuclear não tem o menor conhecimento.  
[...] não podemos nos conformar, quando países do grupo nuclear, que tem uma série de conhecimentos, tentam cercar o nosso acesso a esse conhecimento. Isto é o que temos que evitar.  
[...] se o submundo da política internacional é imundo, o submundo internacional nuclear é mais sujo ainda.

A paralisação das obras de Angra III (que utilizará um reator nuclear PWR<sup>34</sup> de 2ª geração<sup>35</sup>) exemplifica a falta de políticas públicas de Estado. O País apresenta demanda anual crescente

<sup>34</sup> PWR – Pressurized Water Reactor – Reator de água pressurizada. É a tecnologia de reatores nucleares mais utilizada no mundo.

<sup>35</sup> Existem basicamente quatro/cinco gerações de reatores. Os de 1ª geração foram os protótipos até meados da década de 1970. Modelos de 2ª geração se estenderam até 2010 e são a maioria dos que se encontram operacionais.

de energia elétrica e permanece tecnologicamente atrasado na área de reatores nucleares. As usinas nucleares que estão sendo construídas ao redor do mundo utilizarão reatores nucleares modernos, chamados de 3ª geração ou 3ª geração “mais”. Paralelamente, protótipos de reatores nucleares de quarta geração estão sendo projetados, construídos e testados – todos esses resistentes à proliferação.

A evolução tecnológica nacional na área nuclear não passa despercebida no mundo globalizado. No cenário internacional, Brasil e EUA fazem parte dos nove países que, em 2001, assinaram o acordo de cooperação para desenvolvimento conjunto de tecnologias nucleares, conhecido como *The Generation IV International Forum – GIF*. Foram selecionados seis conceitos de reatores (dentre eles o *MSR*) para serem desenvolvidos. Esses sistemas de energia nuclear de 4ª geração, além de atenderem às necessidades futuras mundiais de energia, deverão: ser sustentáveis, possuindo um aproveitamento mais eficiente do combustível em termos de conversão e reduzindo a produção de resíduos; ser economicamente competitivos; possuir rigorosos padrões de segurança e confiabilidade (praticamente à prova de acidentes); e, ter alta resistência à proliferação (sua implantação e uso não aumentariam significativamente a probabilidade de proliferação de armas nucleares). O tório é um combustível nuclear que se enquadra nos critérios acima, e por isso vem sendo intensamente estudado (REVOL, 2013).

Embora seja uma rara oportunidade de intercâmbio científico na área nuclear, o Brasil não é membro atuante do GIF. Diante das incertezas em relação aos cenários futuros, o custo do não engajamento do Brasil na construção da ordem internacional nascente pode ser muito maior do que o ônus imediato, que é o investimento na capacitação, no preparo e no desenvolvimento de meios necessários ao exercício da soberania. O setor nuclear, junto com o cibernético e o espacial, figura como um dos três setores estratégicos para a defesa, cuja prioridade reside na elevação da capacitação científica e tecnológica do País e preparação dos recursos humanos (BRASIL, 2016).

Após o regime militar, o Brasil sofreu um desnecessário desmantelamento da Defesa cuja principal consequência foi a redução de inovações tecnológicas duais nacionais devido ao intercâmbio limitado e não-sistemático entre produções científicas acadêmicas e industriais entre si e com a área de defesa. Nas áreas nuclear e espacial, historicamente sofre severos revezes impostos por restrições internacionais, que vem continuamente atrasando seus programas. A emancipação do país da dependência tecnológica externa só é possível com investimento adequado, que deve ter garantia orçamentária. Como praticamente toda a

---

Os de 3ª / 3ª+ geração são modelos evoluídos e aprimorados. Os de 4ª geração são tecnologias disruptivas – modelos inovadores com previsão para se tornarem tecnologias estáveis a partir de 2030.

tecnologia militar tem aplicação civil, a questão de destaque é a interface entre necessidades tecnológicas já identificadas na área de Defesa e os agentes que são as fontes de conhecimento e inovação, a saber: universidades, centros de pesquisa, indústrias e empresas. A construção dessa interface suportada por sólida base orçamentária e de financiamento privado demanda o estabelecimento adequado de políticas públicas de CT&I, pois o mercado mundial de reatores nucleares permanece ativo sinalizando, inclusive, um processo de expansão.

Em dezembro de 2018, segundo a Agência Internacional de Energia Atômica, havia 451 reatores nucleares em operação no mundo, com 55 novos reatores em construção (IAEA, 2019):

### Quadro 1.2 – Tipos de Reatores Operacionais e em Construção em 31/12/2018.

Reatores	PWR <sup>a</sup>	BWR <sup>b</sup>	GCR <sup>c</sup>	PHWR <sup>d</sup>	LWGR <sup>e</sup>	FBR <sup>f</sup>	HTGR <sup>g</sup>	Total
Operacionais	298	73	14	49	14	3	-	451
Em Construção	45	4	-	4	-	1	1	55

- Pressurized Light-Water Moderated and Cooled Reactor ou Reator refrigerado e moderado a água leve pressurizada.
- Boiling Light-Water Cooled and Moderated Reactor ou Reator moderado e resfriado a água leve fervente.
- Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor ou Reator moderado a grafite e resfriado a gás.
- Pressurized Heavy-Water Moderated and Cooled Reactor ou Reator resfriado e moderado a água pesada pressurizada.
- Light-Water Cooled, Graphite Moderated Reactor ou Reator moderado a grafite, resfriado a água leve.
- Fast Breeder Reactor ou reator regenerador rápido.
- High Temperature Gas Cooled Reactor ou Reator refrigerado a gás de alta temperatura<sup>36</sup>.

**Fonte: IAEA (2019).**

Associado ao investimento em novas plantas nucleares, os países membros com participação ativa do Fórum Internacional de Reatores Nucleares de Quarta Geração – GIF compartilham informações referentes aos avanços tecnológicos de seis novos conceitos de reatores nucleares, previstos para serem disponibilizados comercialmente em meados de 2030. Tais informações demonstram um significativo interesse tanto no desenvolvimento tecnológico nuclear quanto na expansão desta fonte energética. No caso da geopolítica nuclear brasileira, ações direcionadas para o desenvolvimento de Ciência, Tecnologia e Inovação na área nuclear são imprescindíveis para que o país participe ativamente deste movimento mundial. O Capítulo 2 se ocupará das questões científicas e tecnológicas envolvendo a radioatividade, a Tecnologia de Reatores Nucleares e de sua evolução, de modo a contribuir para uma melhor compreensão das dificuldades tecnológicas mencionadas no presente capítulo.

<sup>36</sup> As tecnologias de reatores são abordadas com maior detalhamento no Capítulo 2 deste trabalho.

## 2. Tecnologia de Reatores Nucleares para Geração Nucleoelétrica

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – CNAAA é a primeira central nucleoelétrica do Brasil. Trata-se de um complexo industrial fixo (há a possibilidade de se construir complexos móveis<sup>37</sup>), destinado à produção de energia elétrica. Localizado na cidade de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro, possui duas usinas em operação – Angra I e Angra II; e Angra III, em fase de construção. Cada usina nuclear ou planta nucleoelétrica possui um único reator nuclear que por sua vez é alimentado com um combustível nuclear. Os termos geração “nuclear”, geração “termonuclear” ou geração “nucleoelétrica”, em se tratando de indústria de energia, podem ser considerados sinônimos e, portanto, intercambiáveis (CNEN, 2015).

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030, Caderno nº 7 – Geração Termonuclear) “as principais diferenças entre as usinas termelétricas convencionais e termonucleares estão no combustível utilizado e na forma de aquecimento e vaporização da água” (BRASIL, 2007, p. 59). No Brasil, os principais combustíveis da geração termelétrica são o petróleo e seus derivados, o gás natural ou o carvão mineral. Já a geração termonuclear brasileira utiliza como combustível o urânio enriquecido para gerar energia elétrica. Comparativamente, o mecanismo da geração hidrelétrica aciona as turbinas através da queda d’água de um rio que, neste caso, substitui o vapor gerado nas termelétricas e termonucleares (TOLMASQUIM, 2016).

A geração termonuclear depende do processo autossustentado e controlado de fissão nuclear que ocorre dentro do reator. Fissão nuclear é o rompimento ou quebra do núcleo do átomo. O processo de fissão nuclear não gera eletricidade imediatamente: o rompimento do núcleo atômico libera energia nuclear sob a forma de calor. Esse calor, por sua vez, é aproveitado para aquecer a água até virar vapor. O vapor é capaz de acionar uma turbina e, finalmente, a turbina produz energia elétrica. Diferentemente da fissão, a fusão nuclear diz respeito a outro processo, atualmente indisponível tecnologicamente em escala industrial, e sua abordagem não faz parte do escopo deste trabalho.

O objetivo deste capítulo é introduzir o assunto de reatores nucleares a partir de uma contextualização histórica. Primeiramente, destaca-se a importância da evolução da compreensão da natureza do átomo e de sua estrutura até a descoberta da radioatividade e do

---

<sup>37</sup> A Rússia lançou ao mar em 2019 a primeira central nuclear flutuante, a Akademik Lomonosov I. para fornecer energia a áreas remotas, como o Ártico. Fonte: ROSENERGOATOM (2019): Disponível em: <https://www.rosenergoatom.ru/en/for-journalists/highlights/32662/>. Acesso em: 18 set. 2019.

processo de fissão nuclear. Em seguida, a segunda parte do capítulo se ocupa das tecnologias de reatores nucleares – intrinsecamente associadas ao ciclo de combustível utilizado. Finalmente, enfatiza-se o papel do elemento tório como combustível nuclear potencial, assim como modelos de reatores nucleares relacionados.

## 2.1. Da descoberta do Urânio até a Radioatividade Natural.

A primeira menção à palavra átomo como unidade fundamental da matéria veio do período pré-socrático, no século V a.C., mais especificamente da escola atomista, tendo Leucipo e seu discípulo Demócrito como principais representantes. Em 306 a.C., Epicuro (341-271 a.C.) retomaria as teorias atomistas em Atenas, na Grécia Antiga (MARCONDES, 2007). Essa ideia do átomo como a menor parte da matéria e indivisível só sairia do campo filosófico para ganhar sustentação científica no séc. XVIII. Enquanto eclodia em Paris a Revolução Francesa com a queda da Bastilha em 1789, o químico francês Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), membro recém-admitido na Royal Society de Londres (1788), publicava seu Tratado Elementar de Química, no qual citava os 33 elementos químicos até então conhecidos e fornecia a primeira definição pragmática de elemento químico: através de experimentos medidos cientificamente conduzidos, concluíra que **elemento é o último ponto a partir do qual não se consegue mais decompor determinada substância** (STRATHERN, 2002).

No mesmo ano, o químico autodidata berlinense Martin Heinrich Klaproth (1743-1817), residente na Boêmia, na cidade de St. Joachimstal, fazia experiências com uma rocha dita “amaldiçoada”, de “má-sorte”. Encontrar o mineral conhecido como pechblenda<sup>38</sup> era indesejado para a maioria dos exploradores, pois indicava o esgotamento da exploração de uma jazida de prata. Ao trabalhar com amostras de pechblenda, Klaproth extraiu um elemento até então desconhecido, que produzia cores verdes e amarelas vibrantes quando associado ao vidro. Em homenagem à recente descoberta do planeta Urano pelo britânico Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822), Klaproth batizou o novo elemento de *uranium*. A rocha de má sorte ganharia novos atributos na virada do século XX (DAHLKAMP, 1993; ZOELLNER, 2009).

Nos primeiros meses de 1869, quase um século após a descoberta do urânio, o químico siberiano Dmitri Mendeleiev (1834-1907) publicou a primeira versão da Tabela Periódica como nós conhecemos hoje (2019), base de todas as suas versões posteriores (STRATHERN, 2002). Seu trabalho possui o grande mérito de agrupar os elementos coerentemente segundo as suas

---

<sup>38</sup> Pechblenda: do original alemão *pechblende*, onde *pech* significa desgraça ou piche, e *blende* significa mineral.

propriedades, mesmo desconsiderando fatores referentes à estrutura atômica. Segundo L'Annunziata (2016, p. 799-800),

Todas as pesquisas envolvendo a estrutura do átomo surgiram após as descobertas da radiação X por Wilhelm C. Röntgen em 1895 e da radioatividade a partir de sais do elemento urânio por Henri Becquerel<sup>39</sup> em 1896.

[...] Apenas um ano depois da descoberta da radioatividade, J. J. Thomson descobriu o elétron, o identificou como uma partícula e determinou a sua relação carga/massa<sup>40</sup>.  
(*tradução nossa*)

Apesar do grande passo, J. J. Thomson não esclareceu a localização e disposição dos elétrons no átomo, nem se sabia como se moviam. Tampouco se conhecia sequer a existência de um núcleo no átomo. Sabia-se que os átomos eram estáveis, mas não o porquê. Ignorava-se por completo o conteúdo ensinado hoje (2019) nas escolas sobre o átomo ser formado por um núcleo com prótons (P) e nêutrons (N), cercado por elétrons (é); que os prótons possuem carga positiva, elétrons são negativos e nêutrons não possuem carga; que o nº atômico Z é igual ao nº de prótons e que este caracteriza o átomo de um elemento químico específico; que os átomos possuem isótopos, pois o nº de nêutrons no núcleo pode variar, e assim, o nº de massa  $A = Z + N$ ; e assim por diante. A idealização esquemática da imagem do átomo se resumia a um “pudim de passas” ou “bolo de ameixas”, onde cargas positivas e negativas estariam espalhadas uniformemente no átomo, como as passas / ameixas dentro do pudim / bolo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

A partir do ano de 1898, a família Curie daria uma inigualável contribuição à ciência: enquanto o casal Marie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906) apresentaria ao mundo a radioatividade natural, a filha mais velha do casal Irène (1897-1956) e seu marido Frédéric (1900-1958), os Joliot-Curie, desvendariam quase meio século depois a radioatividade artificial. Em dezembro de 1897, meses após o nascimento de sua filha Irène, a cientista polonesa Marie Curie começou a estudar a radioatividade emitida por vários compostos de urânio. Comparando a pechblenda com diversos outros sais de urânio, descobriu que a quantidade de radioatividade emitida era diretamente proporcional à quantidade de urânio presente, como descrito por Strathern (2000):

Ao longo desses experimentos, porém, Marie Curie fez uma descoberta importante. Não parecia importar que o composto estivesse aquecido, em solução ou sob [a] forma de pó. Somente uma coisa afetava a quantidade de radioatividade: a quantidade de urânio presente. A fonte da radioatividade não era [de] compostos de urânio: essa propriedade pertencia aos próprios átomos de urânio.

<sup>39</sup> Segundo Habashi (2001) e CNEN (2019), Claude Félix Abel Niepce de St. Victor (1805-1870), um cientista amador francês, descobriu que o urânio impressionava chapas fotográficas trinta anos antes de Becquerel.

<sup>40</sup> *Research into the structure of the atom all began with the discoveries of X-radiation by Wilhelm C. Röntgen in 1895 and radioactivity from salts of the element uranium by Henri Becquerel in 1896. [...] Only 1 year after the discovery of radioactivity, J. J. Thomson discovered the electron, identified it as a particle, and determined the charge-to-mass (e/m) ratio of the electron.*

Mas seria essa propriedade exclusiva do urânio? Marie Curie iniciou alguns experimentos com átomos de peso atômico semelhante.

[...] **O urânio não era o único a exibir essa propriedade: o tório também era radioativo. (grifos nossos)**

Marie ainda percebeu que havia minérios de urânio – como a própria pechblenda – mais radioativos que o próprio urânio, e desconfiou que pudesse haver outros elementos químicos nestes minérios. A partir desse momento, seu marido francês, o cientista Pierre Curie, abandonou sua própria pesquisa em assunto diverso e se uniu à Marie. Com muita dificuldade, conseguiram extrair quantidades mínimas de um novo elemento químico até então desconhecido, associado ao bismuto (Bi), e 400 vezes mais radioativo que o urânio. Esse elemento foi batizado por Marie Curie de Polônio (Po), em homenagem à sua terra natal. Ao publicar sua descoberta, utilizou pela primeira vez a palavra radioatividade, cunhada por ela mesma.

Curiosamente, o nível de radioatividade da pechblenda sinalizava ainda haver mais um elemento químico desconhecido além do recém-descoberto polônio. Em quantidades ínfimas, o novo elemento foi isolado junto com pó de bário (Ba) e sua existência foi confirmada por um químico especialista no campo da espectroscopia. A esse elemento novo o casal Curie deu o nome de rádio (Ra). Para confirmar suas pesquisas, os Curie foram buscar mais pechblenda exatamente na mina de prata esgotada de St. Joachimstal. O procedimento de extração de rádio utilizado por Marie, apesar de longo, tedioso e difícil, foi o mesmo adotado industrialmente anos depois. E a pesquisa avançava também em outros laboratórios ao redor do mundo:

Pierre montou um experimento em que a emissão radioativa passava através de um campo magnético. Descobriu que ela se separava em três diferentes tipos de raios — raios alfa, beta e gama (como vieram a ser chamados). Ao mesmo tempo em que Pierre Curie fazia essa descoberta, o mesmo fenômeno estava sendo constatado separadamente por Becquerel e pelo físico de origem neozelandesa Ernest Rutherford [(1871-1937)] (responsável pelos nomes dos raios). Foi Pierre Curie quem descobriu que os raios beta tinham carga negativa — enquanto Rutherford demonstrou que os raios alfa tinham carga positiva e os raios gama eram neutros (STRATHERN, 2000).

O químico francês Paul Villard (1860-1934) foi o primeiro a apresentar os raios gama à comunidade científica como uma radiação altamente penetrante. Ernest Rutherford, ao publicar a sua descoberta na qual identificou e nomeou os três tipos de emissão, creditou à Villard sua descoberta quanto às emissões gama. Prosseguindo com suas experiências, Rutherford descobriu que **os átomos que emitiam partículas alfa e gama transmutavam-se em partículas de menor peso – ou seja, em outro elemento, e que esse processo ocorria sucessivas vezes até que o elemento químico final fosse estável**. Ao identificar esse processo natural espontâneo, Rutherford “fundou” um novo campo de estudo – a radioquímica.

O trabalho do casal Curie acrescentou dois novos elementos químicos (Po – Polônio e Ra – Rádío) à tabela periódica, legado de Dmitri Mendeleiev. Essa tabela era organizada principalmente pelo peso atômico (o conceito de massa atômica  $A$  ainda não existia) e sua capacidade de se combinar com outros elementos (valência), uma vez que também não se conhecia o conceito de nº atômico  $Z$ . Outra proeza da dupla Curie diz respeito à descoberta de que, os elementos radioativos, também eram uma fonte de energia: como carregar materiais radioativos nos bolsos provocava queimaduras na pele, resolveram investigar e calcularam, por exemplo, que “1 g de rádio emitia 140 calorías por hora – o suficiente para ferver água!” (STRATHERN, 2000). Podemos dizer, então, que o casal Curie foram os primeiros a perceberem que **há liberação de energia sob a forma de calor durante o processo que em breve viria a ser chamado de decaimento radioativo.**

Em 14 de dezembro de 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1947) apresentou à Sociedade Alemã de Física a sua Teoria Quântica, na qual a emissão e a absorção de radiação se davam em "quanta", ou seja, valores discretos de energia múltiplos de um valor constante ( $h$ ). Dois anos depois, Pierre e Marie Curie finalmente haviam conseguido isolar 100 mg de rádio – um trabalho de quatro anos (QUINN, 2011). Ainda em 1902, no Canadá, Ernest Rutherford e o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956) publicaram um artigo mostrando a diferença entre raios X e a radioatividade: os raios X são gerados artificialmente, enquanto **a radioatividade é um fenômeno atômico que ocorre espontaneamente.** Utilizando amostras de **tório**, a dupla de cientistas percebeu um **decréscimo da atividade**<sup>41</sup> **radioativa num período de pouco mais de quatro dias.** Em outras palavras, o número de desintegrações ocorridas nas amostras de tório medidas em certa unidade de tempo havia se reduzido. Surgia assim a primeira noção de **decaimento radioativo: os átomos podiam mudar através da radioatividade.** Os resultados publicados por Rutherford no seu livro “Radioatividade”, em 1904, trouxeram pela primeira vez o conceito de decaimento radioativo em termos de meia-vida<sup>42</sup>. O conceito reforçava algo que o casal Curie já havia notado: a intensidade da radioatividade depende apenas da quantidade do elemento ali presente na amostra (HEILBRON, 2003, p. 40; L’ANNUNZIATA, 2016, p. 135-136). Os detalhes de “como

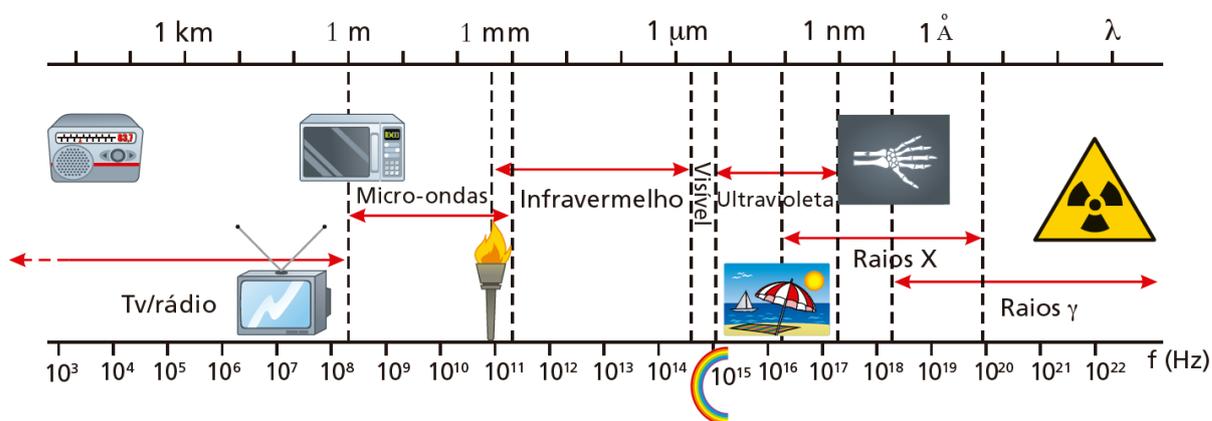
<sup>41</sup> A soma das taxas de decaimento  $R$  de todos os radionuclídeos [isótopos radioativos] presentes em uma amostra é chamada de **atividade** da amostra. A unidade de atividade no SI [Sistema Internacional] recebe o nome de **becquerel em homenagem a Henri Becquerel [...]**. 1 becquerel = 1 Bq = 1 decaimento por segundo. A unidade mais antiga, o **curie**, continua a ser usada até hoje: 1 curie = 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

<sup>42</sup> **Meia Vida** – Tempo necessário para que a atividade de um dado material radioativo caia pela metade, como resultado de um processo de decaimento radioativo (CNEN, 2019).

ocorria” eram desconhecidos e, portanto, incompreendidos – ainda faltava descobrir a existência dos nêutrons.

Os elementos radioativos emitem três tipos de radiação: Alfa ( $\alpha$ ), que equivale ao núcleo de um átomo de hélio (He) e possui carga positiva; Beta ( $\beta$ ), que equivale a um elétron ( $e^-$ ); e Gama ( $\gamma$ ), que são “partículas” de luz – fótons. Fótons possuem alta energia e não possuem massa. A figura 2.1 apresenta o espectro de ondas eletromagnéticas e posiciona, nos níveis de menor comprimento de onda e de maior frequência, as ondas de raios X e as de radiação gama – emissão radioativa de “partículas” gama ( $\gamma$ ).

**Figura 2.1 – Espectro Eletromagnético**

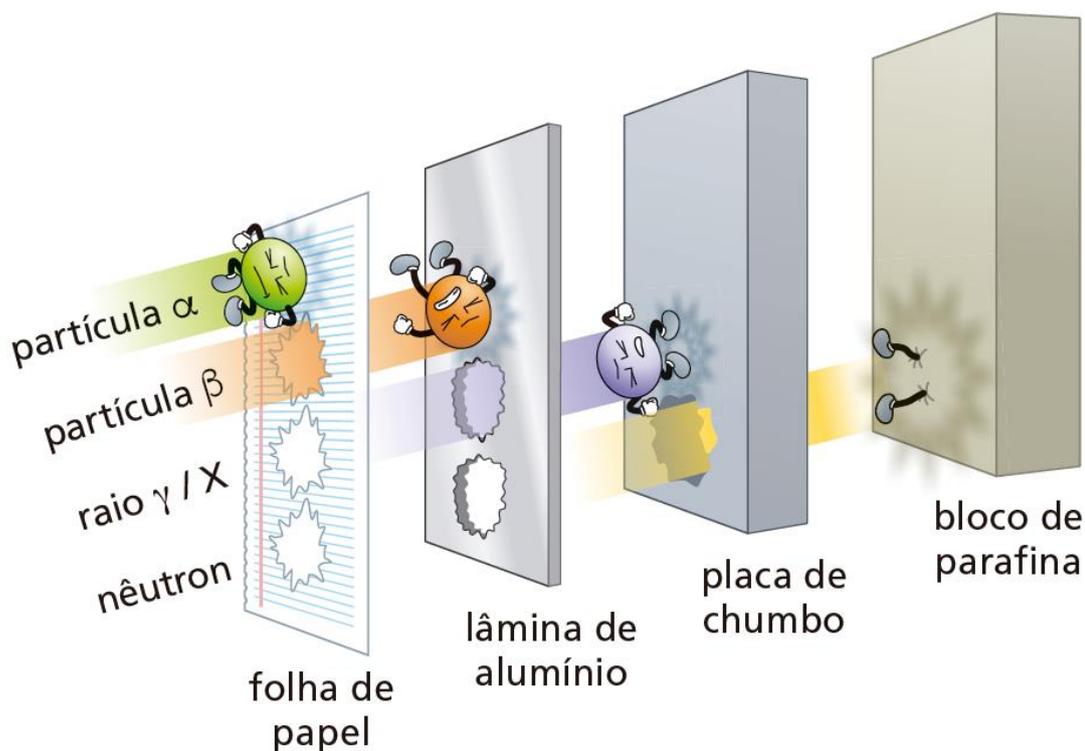


**Figura 2.1 – Espectro de ondas eletromagnéticas. Na linha superior, temos o comprimento de onda ( $\lambda$ ), que é medido em escala métrica. Na linha inferior, temos a frequência ( $f$ ), medida em Hertz (Hz). Quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência, e vice-versa. Fonte: Carvalho (2017, p. 17).**

Hoje sabemos que tanto os raios X como as emissões gama são manifestações de ondas eletromagnéticas; que a radioatividade possui aplicação muito mais nobre do que a de construir dispositivos bélicos: podemos produzir energia elétrica, aumentar a vida útil de produtos agrícolas, esterilizar kits laboratoriais e materiais cirúrgicos, diagnosticar e tratar doenças como câncer, ajudar a recuperar obras de arte e documentos danificados pelo tempo, intempéries ou acidentes, colorir rochas e cristais, dessalinizar água etc. Para a construção de reatores, manipulação de combustíveis nucleares, tratamento seguro de rejeitos e recuperação, é imprescindível conhecer primeiramente as propriedades de penetração das emissões radioativas para definir o material adequado de proteção ou blindagem. A figura 2.2 ilustra didaticamente o grau de penetração das emissões radioativas alfa e beta (partículas), das radiações gama e

raios X (que não são partículas, mas ondas eletromagnéticas), bem como da partícula denominada nêutron<sup>43</sup>.

**Figura 2.2 – Capacidade de Penetração de Emissões de Raios X e Radioativas**



**Figura 2.2 – Capacidade de penetração das partículas ou radiações emitidas. A existência das radiações alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ) foi descoberta praticamente três décadas antes do nêutron. Assim que o nêutron foi descoberto, os cientistas passaram a fazer experimentos “bombardeando” nêutrons em diversos elementos químicos, donde descobriram a radioatividade artificial, a fissão nuclear e a maioria dos elementos químicos artificiais, conhecidos como transurânicos ( $Z > 92$ ). Fonte: Carvalho (2017, p. 10).**

Comparando-se algumas características dos raios X e raios gama, Carvalho (2017, p. 19-20) nos esclarece que:

[...] é possível analisar a estrutura dos materiais através do espalhamento de raios X. Os raios X são também usados em diagnósticos médicos, visto que penetram com facilidade em tecidos humanos pouco densos, sendo barrados pelo tecido ósseo. [...] Os raios  $\gamma$  são altamente penetrantes e há probabilidade de causar câncer, danos nos tecidos humanos ou alterações genéticas. Sua capacidade de destruir os tecidos humanos é usada na Medicina para eliminar tumores cancerígenos. São também usados para diagnósticos médicos [...]. Raios X de alta frequência são similares aos raios  $\gamma$ , diferindo destes apenas pela sua origem. Se não se sabe o que provocou o aparecimento da radiação, não se podem distinguir os dois tipos.

<sup>43</sup> Há outros tipos de partículas que podem ser emitidas de um núcleo que fogem ao objetivo deste trabalho, como pósitrons ( $\beta^+$ ) – equivalente à emissão de uma partícula beta ( $\beta^-$ ) com carga positiva, neutrinos etc.

[...] As ondas eletromagnéticas de alta frequência (raios X e raios  $\gamma$ ) tem energia suficiente para provocar ionização dos átomos (arrancar elétrons) quando incidem sobre um material. Elas são chamadas de **radiação ionizante**<sup>44</sup>.

A probabilidade de haver emissão de radiação gama (emissão  $\gamma$ ) é maior do que a probabilidade de emissão  $\beta$  (beta) que, por sua vez, é maior que a de alfa ( $\alpha$ ). Numa emissão gama, o núcleo do átomo não se modifica: apenas passa de um nível maior de energia para um nível inferior. Um elétron de origem nuclear é o resultado de uma emissão beta, provocando mudança no n° atômico Z. Neste caso, há uma transformação de um elemento químico em outro elemento da tabela periódica. Entretanto, o peso atômico A permanece inalterado. Já as emissões alfa se manifestam através da emissão de um conjunto de prótons e nêutrons, modificando tanto o n° atômico Z como o n° de massa A (ZOHURI, 2017). O quadro 2.1 resume o comportamento das partículas nucleares:

**Quadro 2.1 – Partículas Nucleares.**

Emissão	Símbolo	Tipo	Carga	Massa	Composição	Equivalência	Barrada por
Alfa	${}^4_2\alpha$	Partícula	+2	+4	2 prótons e 2 nêutrons	${}^4_2\text{He}$ – átomo de hélio	folha de papel
Beta	${}^0_{-1}\beta$	Partícula	-1	0	elétron	é – elétron	lâmina de alumínio (Al)
Gama	${}^0_0\gamma$	Onda eletromagnética	0	0	fóton de alta energia	–	placa de chumbo (Pb); alguns metros de parede de concreto
Nêutron	${}^1_0n$	Partícula	0	+1	“nêutron”	–	bloco de boro (B); de parafina

Fonte: Adaptado de Carvalho (2017), Zohuri (2017) e L’Annunziata (2016).

## 2.2. Evolução da compreensão do átomo até a Fissão Nuclear controlada.

O físico alemão Albert Einstein confirmou, em 1905, as descobertas de Planck. Como na maioria das descobertas científicas, primeiro se averiguava uma determinada propriedade através de experimentos empíricos controlados e reproduzíveis. Em seguida, buscava-se uma teoria para se explicar o fenômeno observado. Em 1911, Ernest Rutherford descobriu que o átomo possuía um núcleo, e propôs o primeiro modelo atômico onde há um pequeno núcleo cercado de elétrons – o átomo como um sistema solar. No final do mesmo ano, conheceu o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) e o convidou para fazer parte de sua equipe de pesquisadores em Manchester. Rutherford era um homem de laboratório; Bohr, um físico

<sup>44</sup> **Radiação Ionizante** – Qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria, desloca elétrons dos átomos ou moléculas produzindo íons (CNEN, 2019).

teórico. Nessa época, Hans Geiger<sup>45</sup> (1882-1945) também era assistente de laboratório de Rutherford. Bohr acabou ajudando Rutherford a confirmar sua teoria atômica, aperfeiçoando seu modelo atômico ao introduzir a Teoria Quântica de Planck: o físico dinamarquês propôs que os elétrons em torno do núcleo ficavam em determinadas órbitas, cuja posição era proporcional ao nível de energia. Esse trabalho, publicado em 1913, permitiu prever a existência de mais um elemento químico, o háfnio (Hf) (STRATHERN, 1999).

Em 1905, Einstein apresenta a equivalência entre massa e energia derivada de sua Teoria Especial da Relatividade, através da qual conclui que, se um corpo emitiu energia, a massa do corpo decresce proporcionalmente à quantidade de energia perdida<sup>46</sup> (L'ANNUNZIATA, 2016, p. 220). Daí surgiu a famosa equação  $E = m \times c^2$ , que passaria a ser amplamente utilizada nos cálculos de decaimento radioativo. Em 1930 surge o primeiro acelerador de partículas, o ciclotron, inventado pelo físico estadunidense Ernest Lawrence (1901-1958). Até então, o bombardeio de átomos era feito utilizando-se materiais radioativos e sua emissão espontânea de partículas, com sua respectiva velocidade e energia. Lawrence conseguiu acelerar a emissão de partículas através de um equipamento com um sistema de campos elétricos e magnéticos que permite o bombardeio de átomos com energias mais elevadas. Nos anos seguintes, a tecnologia dos ciclotrons evoluiu rapidamente, e equipamentos cada vez mais poderosos foram construídos (L'ANNUNZIATA, 2016, p. 583-589). Um novo “salto quântico” no conhecimento da estrutura básica do átomo veio em 1932, quando James Chadwick (1891-1974) descobriu a existência do nêutron:

[...] apenas depois que James Chadwick descobriu o nêutron e determinou a sua massa que a estrutura de um núcleo atômico pode ser explicada como contendo um número definido de prótons e nêutrons. Consequentemente, os termos **nuclídeo**, **radionuclídeo** e outros relacionados com o núcleo atômico puderam então ser cunhados.

[...]

Há 266 **nuclídeos** estáveis e 83 **nuclídeos** instáveis ou radioativos que ocorrem naturalmente no planeta. São conhecidos mais de 3.000 **nuclídeos radioativos** produzidos artificialmente. Os **nuclídeos radioativos** são chamados de **radionuclídeos**<sup>47</sup>. (L'ANNUNZIATA, 2016, p. 68, *tradução nossa, grifos nossos*).

O Glossário de Termos Usados em Energia Nuclear (CNEN, 2019) traz a seguinte definição:

**Nuclídeo** – Termo geral aplicado a todas as formas atômicas dos elementos. Os **nuclídeos** compreendem todos os isótopos de todos os elementos e são diferenciados pelos seus números atômicos, massa atômica e estado de energia (*grifos nossos*).

<sup>45</sup> Johannes Wilhelm Geiger, físico alemão, coinventor do contador Geiger-Muller, medidor de radioatividade.

<sup>46</sup> *As a consequence of his special theory of relativity, Einstein concluded that energy was equivalent to mass, that is, if a body emitted energy, the mass of the body would decrease proportionally to the amount of energy lost.*

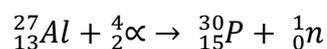
<sup>47</sup> *However, it was not until James Chadwick discovered the neutron and determined its mass that the structure of an atomic nucleus could be explained to contain a definite number of protons and neutrons. Consequently the terms **nuclide**, **radionuclide**, and others related to the atomic nucleus could then be derived [...] There are 266 stable **nuclides** and 83 unstable or **radioactive nuclides** that exist naturally on Earth. More than 3000 artificially produced **radioactive nuclides** are known. The **radioactive nuclides** are referred to as **radionuclides**.*

Segundo Halliday, Resnick & Walker (2016), *nuclídeos com o mesmo número de prótons e um número diferente de nêutrons são chamados de isótopos (grifos nossos)*. É o número de nêutrons presente em um átomo que determina o isótopo daquele elemento. O conhecimento da existência dos núcleons – prótons e nêutrons – permite um mínimo de conhecimento acerca do núcleo atômico, sem o qual ficaria inviável a discussão sobre a radioatividade. Segundo L’Annunziata (2016, p. 1):

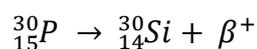
**Radioatividade, também conhecida como decaimento radioativo**, é um processo de decaimento espontâneo e transformação de **núcleos atômicos instáveis** acompanhados da emissão de radiação (também chamada de radiação nuclear) <sup>48</sup> (*tradução nossa, grifos nossos*).

No período de apenas dez anos após a descoberta do nêutron os cientistas descobriram a fissão nuclear, o seu potencial de liberação de energia e aprenderam a controlá-la. Em 1932, no mesmo ano da descoberta do nêutron por Chadwick, Carl Anderson (1905-1991) descobriu a existência do pósitron ( $\beta^+$ ), também chamado de antielétron, o equivalente a um “elétron de carga positiva”. O mundo subatômico ainda apresentou novas partículas nos anos seguintes, como os *quarks*. Hoje sabemos que o nêutron é composto de *quarks*. Entretanto, na primeira metade do século XX, era considerado como uma partícula elementar.

Em 1934, a filha mais velha do casal Curie, Irène Joliot-Curie e seu marido Frédéric Joliot, bombardearam vários elementos químicos com partículas  $\alpha$  provenientes do polônio. Na intenção de identificar pósitrons, a dupla Joliot-Curie produziu  $^{30}_{15}\text{P}$  a partir do  $^{27}_{13}\text{Al}$ , um radioisótopo de fósforo a partir do alumínio, ou seja, um elemento químico a partir de outro diferente! Ao irradiar partículas alfa emitidas pelo polônio em uma folha de alumínio, alguns átomos de alumínio absorveram uma partícula alfa, transformando-se em fósforo e emitindo um nêutron. A reação pode ser representada conforme a equação abaixo:



Em seguida, verificaram que nos minutos seguintes ocorria uma nova transformação, na qual o fósforo recém-produzido decaía em silício, estável, emitindo um pósitron:



“Assim, os Joliot-Curies não só produziram um radioisótopo anteriormente inexistente, como foram os primeiros a produzir pósitrons no laboratório<sup>49</sup>”. Este isótopo radioativo artificial – o radioisótopo de fósforo – sofre um decaimento radioativo, isto é, decai de fósforo para silício.

<sup>48</sup> *Radioactivity, also referred to as nuclear decay, is the process of spontaneous decay and transformation of unstable atomic nuclei accompanied by the emission of radiation (also referred to as nuclear radiation).*

<sup>49</sup> *Thus the Joliot-Curies not only produced a previously non-existent radioisotope, but they were the first to produce positrons in the laboratory.*

Outros elementos foram irradiados, e novos radioisótopos inéditos foram produzidos. A partir dos resultados deste trabalho a radioquímica, inaugurada por Rutherford três décadas antes, estabeleceu-se firmemente como campo de estudo, desenvolvendo técnicas de produção de radioisótopos (radionuclídeos) e radiofármacos (L'ANNUNZIATA, 2016, p. 76 e 116).

Bombardear elementos químicos com partículas era “moda” na época, pois em um curto espaço de tempo o mundo científico saía da completa ignorância sobre a natureza do átomo para a compreensão de parte de sua estrutura e propriedades. Paralelamente, no mesmo ano da descoberta do casal Joliot-Curie, o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) bombardeava diversos elementos químicos com nêutrons. Ao bombardear o urânio, provavelmente provocou a fissão nuclear. Entretanto, sua publicação de 1934 mostra que o cientista ignorou o fenômeno. A geoquímica alemã Ida Noddack (1896-1978), que descobrira com o marido o elemento químico rênio (Re), leu o artigo de Fermi e rapidamente sugeriu, em um artigo científico publicado no mesmo ano, que o núcleo poderia se dividir. Infelizmente, sua observação foi ignorada. Como cita Kiernan (2015, p. 52), “Ida Noddack estava simplesmente muito à frente de seu tempo”. Niels Bohr volta à cena em 1936 com a sua teoria da gota líquida, na qual descreve que o núcleo atômico não seria “duro”, mas sim “maleável como uma gota líquida” – poderia mover-se, alongar-se **e inclusive romper-se** – tese que seria fundamental para a interpretação do fenômeno de fissão nuclear.

A física judia austríaca Lise Meitner (1878-1968), auxiliada pelo amigo Niels Bohr, se escondeu dos nazistas na Suécia de 1938. Fizera parte da equipe berlinense de laboratório com o radioquímico Otto Hahn (1879-1968) e o químico Fritz Strassman (1902-1980). A pesquisa da equipe Meitner-Hahn-Strassman baseava-se no trabalho publicado por Fermi e criticado por Ida. Após a fuga de Lise e de seu sobrinho Otto Frisch (1904-1979), a equipe desfalcada prosseguiu com os experimentos de bombardeio de átomos de urânio com nêutrons, mas os resultados obtidos pareciam não fazer sentido para os cientistas remanescentes – afinal, o urânio tinha nº atômico 92: como o bombardeio com nêutrons poderia gerar o bário encontrado, este que tinha um nº atômico muito inferior ( $Z=56$ )? Lise Meitner não só compreendeu que houvera fissão do núcleo, com decomposição em átomos de bário e nêutrons, como calculou que a energia gerada pelo rompimento de cada átomo de urânio seria da ordem de 200 MeV. Seguindo com os cálculos, previu a enorme quantidade de energia que poderia ser gerada (sabendo que 1g de urânio possuía  $2,5 \times 10^{21}$  átomos, chegando a essa conclusão através da equação de Einstein  $E = m \times c^2$ ). Infelizmente, todo esse potencial descoberto às vésperas da 2ª Guerra Mundial não poderia ter outro destino senão a confecção de dispositivos bélicos. E foi o que aconteceu (KIERNAN, 2015; L'ANNUNZIATA, 2016). Em janeiro de 1939, Otto Hahn e Fritz

Strassman publicaram a descoberta sem ao menos dividir com Lise o crédito pela interpretação da fissão nuclear ou mesmo do nome do processo, *fissão nuclear*, cunhado por ela e pelo sobrinho. No mesmo ano, utilizando seu modelo de núcleo da “gota líquida”, “Bohr foi o primeiro a descrever o que efetivamente acontecia durante a fissão nuclear” (STRATHERN, 1999).

Até 1941, o último elemento da Tabela Periódica era o urânio, de nº atômico 92. Todos os elementos com  $Z > 92$  foram sintetizados e identificados depois de 1941 e passaram a ser denominados de transurânicos (depois do urânio). Todos os elementos transurânicos (TRU) são radioativos. O neptúnio (Np,  $Z=93$ ) e o plutônio (Pu,  $Z=94$ ) foram sintetizados pela primeira vez nos anos 1940-1941 pelos químicos estadunidenses Edwin MacMillan (1907-1991) e Glenn T. Seaborg (1912-1999), com a colaboração de diversos pesquisadores. Nessa época, foram identificados os isótopos  ${}^{238}_{94}\text{Pu}$  e  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ . Os nomes se referem aos planetas: os isótopos naturais  ${}^{234}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  e  ${}^{238}_{92}\text{U}$  do elemento urânio vêm de Urano (vide quadro 2.3); o primeiro elemento transurânico  ${}_{93}\text{Np}$  foi batizado de neptúnio devido ao planeta Netuno, que vem depois de Urano; da mesma forma, os isótopos do plutônio  ${}^{238}_{94}\text{Pu}$  e  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  foram assim denominados com referência ao (até então) próximo planeta do sistema solar, Plutão. A publicação da pesquisa só foi liberada em 1946, no período pós-guerra, pois entretantes se descobriu que o  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  era também fissionável, como o  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Esses seriam os elementos-chave das bombas atômicas (KIERNAN, 2015; L’ANNUNZIATA, 2016).

#### Quadro 2.2 – Distribuição dos isótopos (nuclídeos) do urânio encontrados na natureza.

Nuclídeo / Isótopo	Descrição	Percentual (% átomos)	Meia-Vida / $t_{1/2}$ (anos)	Atividade Específica (Bq/mg)	Emissão $\alpha$	Emissão $\beta$	Emissão $\gamma$
					Energia Média Emitida por Transformação (MeV/Bq)		
${}^{234}_{92}\text{U}$	urânio-234	0,0056%	247.000	231.000	4,84	0,0013	0,002
${}^{235}_{92}\text{U}$	urânio-235	0,718%	710.000.000	80	4,47	0,048	<b>0,154</b>
${}^{238}_{92}\text{U}$	urânio-238	99,28%	4.510.000.000	12,4	4,26	0,01	0,001

Fonte: Adaptado de Patarin (2002, p. 33) & IAEA (2019).

Durante a 2ª Guerra Mundial, Enrico Fermi liderou a equipe que construiu o primeiro reator nuclear, tendo como combustível aproximadamente 36,6 ton. de óxido de urânio<sup>50</sup> ( $\text{UO}_2$ ) e 5,6 ton. de urânio metálico. Foi construído no subsolo do ginásio da Universidade de Chicago, com uma pilha de tijolos de grafite (quase 350 ton.) em 57 camadas, e três varetas de controle feitas de cádmio (Cd) embutidas no reator. Em dois de dezembro de 1942, a equipe de Enrico

<sup>50</sup>  $\text{UO}_2$  é um composto muito estável utilizado atualmente para fabricar pastilhas de combustível nuclear dos reatores à água. Mantém suas propriedades mecânicas até seu ponto de fusão (2.760 °C) e não reage com a água caso a pastilha de combustível se rompa. Infelizmente, é um péssimo condutor de calor (PATARIN, 2002, p.28).

Fermi obteve a primeira reação nuclear controlada. Em outras palavras, fizeram com que o reator nuclear Chicago Pile One – CP 01 atingisse a sua criticalidade, ou seja, “a reação em cadeia foi sustentada com a produção de um nêutron para cada nêutron absorvido pelo núcleo do urânio<sup>51</sup>”. Por definição, a criticalidade diz respeito à manutenção de um processo autossustentado de fissão nuclear: a data e hora de atingimento da criticalidade de um reator nuclear determina o início de sua operação. O próprio Fermi já havia descoberto que a água, parafina (vide figura 2.2) e o cádmio (Cd) eram alguns dos materiais capazes de desacelerar feixes de nêutrons tornando-os mais lentos (o cádmio é um excelente absorvedor de nêutrons). Essa classificação de nêutrons rápidos, intermediários (ou epitérmicos) e nêutrons lentos (estes últimos também chamados de nêutrons térmicos) tornou-se uma referência para reatores nucleares, pois o processo de desacelerar nêutrons mostrou-se uma maneira de potencializar a sua absorção e, por conseguinte, controlar o processo de produção de radionuclídeos ou de fissão nuclear.

No Tennessee, o governo estadunidense construiu a cidade de Oak Ridge para abrigar um gigantesco complexo industrial para o esforço de guerra. O objetivo: enriquecer urânio para a fabricação de bombas atômicas. Havia três métodos experimentais conhecidos para enriquecimento de urânio, nunca utilizados em escala industrial. Para tanto, foram construídas em Oak Ridge instalações com nomes-código: Y-12 era a unidade de separação eletromagnética; K-25, a de difusão gasosa; e S-50, de difusão térmica líquida. E ainda havia a instalação X-10, com um reator-piloto para a produção de plutônio. Hanford, na Califórnia, foi o local escolhido para instalação da produção de plutônio em escala total. Os dispositivos – as bombas – foram construídos em Los Alamos, no Novo México. Junto com o Laboratório de Metalurgia de Chicago, na Universidade de Chicago, Illinois, esse conjunto de instalações compôs o Projeto Manhattan (KIERNAN, 2016, p. 15-16). Somente depois da 2ª Guerra Mundial é que surgiram os primeiros Programas Estatais Nucleares para o desenvolvimento pacífico de reatores nucleares para geração de energia elétrica e produção de radioisótopos (radionuclídeos). Apesar de todo o cerceamento tecnológico a que foi submetido, o Brasil também estabeleceu o seu Programa Nuclear e conseguiu dominar a tecnologia de enriquecimento de urânio por meio de ultracentrifugação em cascatas, que é considerado um processo eficiente e economicamente viável (desde que um volume mínimo seja produzido).

---

<sup>51</sup> *the chain reaction was sustained with the production of a neutron for every neutron absorbed by the uranium nucleus.*

### 2.3. Tecnologia de Reatores Nucleares para Geração Nucleoelétrica

Os reatores nucleares para geração nucleoelétrica são equipamentos construídos com o intuito de extrair energia térmica sob a forma de calor proveniente de reações controladas de fissão nuclear<sup>52</sup>, ou seja, um tipo de reator de potência com a finalidade de gerar energia elétrica. De acordo com Kohuri (2017, p.32) e Perrotta (1999), um projeto de reator nuclear precisa definir os seguintes itens fundamentais<sup>53</sup>: (i) Um combustível – a escolha do combustível faz parte do projeto do reator e traz consigo a responsabilidade da gestão de uma série de processos envolvidos no seu preparo, conhecido como Ciclo do Combustível Nuclear. Inclui mineração, refino, enriquecimento, fabricação de elementos combustíveis (estruturas metálicas que isolam o combustível do ambiente), uso no reator; após o uso, processamentos químicos para recuperar e reconverter o material fissionável ainda existente no combustível usado e “reenriquecimento” do material combustível para uso no ciclo seguinte, ou simplesmente transporte, acondicionamento e armazenagem; (ii) Um moderador para desacelerar / termalizar nêutrons rápidos, tornando-os lentos (exceto para projetos de reatores rápidos que não demandam um moderador); (iii) Um refrigerante para retirar o calor; (iv) Um sistema de controle envolvendo absorvedores que permitam controlar o nº de nêutrons; (v) Um sistema de blindagem que proteja as pessoas e o equipamento das emissões radioativas geradas (principalmente a radiação gama, mais penetrante); e, (vi) Um mecanismo que reúna todas essas características de forma econômica e operacional, incluindo a estrutura e a geometria do elemento combustível, quando utilizado.

#### 2.3.1. Combustível Nuclear (Nuclear Fuel)

Os três elementos-químicos chave para o combustível nuclear são o urânio, o tório e o plutônio. O urânio pode ser utilizado em sua forma natural (com a composição encontrada na natureza), passar por processos industriais para enriquecimento isotópico; ou pode ser gerado a partir do tório. O plutônio, por sua vez, é um elemento químico artificial, obtido a partir do

---

<sup>52</sup> Reatores de fissão nuclear para outros propósitos, como geração de transurânicos, para servir de fontes de nêutrons ou irradiação de materiais, para pesquisa e treinamento, assim como tecnologias de reatores de fusão não são abordados neste trabalho, sendo eventualmente citados.

<sup>53</sup> *From this we can directly derive the basic functional requirements of a reactor. We need: A fuel such as U-235; A moderator to thermalize (i.e., slow down) the fast neutrons; A coolant to remove the heat; A control system to control the number of neutrons; A shielding system to protect equipment and people from radiation; A system that pulls all this together into a workable device.*

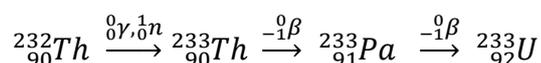
urânio. Originalmente, o urânio em sua forma metálica era o combustível demandado para produção de plutônio para fins militares, para as pilhas atômicas, reatores de primeira geração e reatores de pesquisa, que exigiam uma grande concentração de urânio (PATARIN, 2002, p.43). Os combustíveis nucleares são a fonte do processo de fissão nuclear. Essa fonte compõe-se de uma mistura de materiais físséis e materiais férteis. Uma reação em cadeia de fissão nuclear não se sustenta com materiais férteis: é preciso uma quantidade adequada de materiais físséis para sustentar a reação. Os materiais férteis são aqueles que, quando absorvem nêutrons, são transmutados e se tornam físséis. Os materiais físséis decaem espontaneamente, sendo o urânio-235 e o plutônio-239 os mais importantes. Embora o urânio-238 seja a forma mais abundante de urânio encontrada na natureza, ele não é uma boa fonte de nêutrons, por ser fértil. O quadro 2.3 fornece principais as fontes de combustíveis nucleares:

### Quadro 2.3 – Fontes de combustíveis nucleares.

Nuclídeo	Nomeclatura	Característica	Forma de Obtenção
${}_{92}^{233}U$	Urânio-233	Físsil – Artificial	Absorção de nêutrons pelo ${}_{90}^{232}Th$
${}_{92}^{235}U$	Urânio-235	Físsil – Natural	Ocorrência natural em minérios.
${}_{92}^{238}U$	Urânio-238	Fértil – Natural	Ocorrência natural em minérios.
${}_{94}^{239}Pu$	Plutônio-239	Físsil – Artificial	Absorção de nêutrons pelo ${}_{92}^{238}U$
${}_{90}^{232}Th$	Tório-232	Fértil – Natural	Ocorrência natural em minérios.

Fonte: Adaptado de L'Annunziata (2016).

Os processos que envolvem a absorção de nêutron por nuclídeo seguida de decaimento radioativo para transformação em outro nuclídeo são chamados de transmutação. A reação abaixo descreve como o tório-232, fértil, decai para o protactínio-233 emitindo uma partícula beta. Em seguida, o protactínio-233 decai para o urânio-233, físsil.



Com relação ao tório-232, sua importância como combustível foi publicamente cogitada já em 1945. Segundo Argentiére (1953, p. 514-515):

Em dezembro de 1945, um discreto comunicado da Comissão de Energia Atômica Americana considerava o tório como equivalente ao urânio. E sugeria que se poderia produzir o urânio-233 partindo-se do **tório-232**. O comunicado considerava o urânio-233 como combustível nuclear, e capaz de produzir reações nucleares.

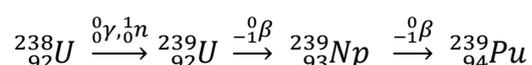
[...]

No início de 1948, anunciou-se que em Los Alamos tinha sido posta em funcionamento a oitava pilha atômica (breeder) dos Estados Unidos, mas desta vez o combustível não era o urânio, mas o **tório-232**.

E completa:

[...] o Governo Americano resolveu estabelecer estrita fiscalização sobre as exportações e utilização do tório. Idêntica atitude já havia tomado o Canadá, quando, por ordem do Conselho, datada de 12 de fevereiro de 1946, **interditava a exploração do tório** (*grifos nossos*).

O mesmo processo de captura de nêutron com emissão de partículas beta ocorre nos decaimentos consecutivos urânio-238 fértil em urânio-239, este em netúnio-239 e, finalmente, o decaimento para plutônio-239, físsil. Outro exemplo de processo de transmutação.



Nos exemplos acima, tanto o tório-232 quanto o urânio-238 eram materiais férteis que transmutaram nos materiais físsis urânio-233 e plutônio-239, respectivamente. Com relação à quantidade de material físsil gerado, as transmutações recebem a seguinte classificação: a) conversão: quando o processo de transmutação gera menos material físsil do que aquele consumido no processo; e, b) regeneração, procriação ou “**breeding**”: quando o processo de transmutação gera mais material físsil do que aquele consumido no processo. A transmutação tipo conversão não deve ser confundida com a etapa de conversão do ciclo do combustível nuclear. Reatores nucleares que operam com transmutações do tipo regeneradoras são comumente chamados de “breeders”. O termo **reator “breeder”** (procriador/regenerador) foi proposto pelo cientista húngaro Leo Szilard e por Fermi enquanto trabalhavam juntos no Projeto Manhattan. Atualmente, os “breeders” ou reatores regeneradores rápidos são comumente apelidados de FBR (Fast **Breeder** Reactor) e LMFBR (Liquid Metal Fast **Breeder** Reactor), este último referindo-se ao metal líquido utilizado como refrigerante, geralmente sais de sódio em alta temperatura em estado líquido (fundido). O combustível de um FBR costuma ser uma combinação de urânio e plutônio, conhecida pela sigla MOX (Mixed Oxide) que significa literalmente uma mistura de óxidos (o óxido de plutônio se apresenta como PuO<sub>2</sub>). O urânio no MOX pode ser natural, empobrecido ou reprocessado. Entende-se por urânio empobrecido ou *depleted uranium* (DU) a amostra que contém urânio com um percentual de urânio-235 abaixo de 0,72 % em nº de átomos ou abaixo de 0,711 % em peso.

Segundo Karpas (2015, p. 13):

O limiar de 20% de <sup>235</sup>U que diferencia o urânio levemente enriquecido do urânio altamente enriquecido (LEU-HEU) é artificial, baseada na hipótese de que dispositivos nucleares [armas nucleares] com percentual igual ou inferior a 20% não seriam eficientes. O material residual do processo de enriquecimento isotópico

contém menos  $^{235}\text{U}$  do que o urânio natural e é definido como urânio empobrecido (DU<sup>54</sup>) (*tradução nossa*).

Sobre o papel do isótopo urânio-235 para a classificação de qualquer material ou amostra que contenha urânio, segue o quadro 2.4:

**Quadro 2.4 – Classificação do urânio a partir do teor de urânio-235 (%):**

Urânio...	Em inglês	Sigla	% U-235 (em nº de átomos)
Empobrecido, Exaurido ou Esgotado	Depleted Uranium	DU	< 0,72% (normalmente entre 0,2%-0,4%)
Natural	Natural Uranium	NU / UNat	$\cong$ 0,72%
Levemente Enriquecido	Low-Enriched Uranium	LEU	0,72% < % U-235 < 20%
Altamente Enriquecido	High-Enriched Uranium	HEU	> 20%

Adaptado de Karpas (2015).

O enriquecimento de urânio reúne uma sequência de processos industriais cujo objetivo é aumentar a quantidade de um dos isótopos, o urânio-235, em uma mistura de isótopos de urânio contendo urânio-235 e urânio-238. Por essa razão é chamado de enriquecimento isotópico. Grosso modo, a composição encontrada na natureza é de 0,7% de urânio-235 e 99,3% de urânio-238 (vide quadro 2.2). Como são isótopos e possuem comportamento químico idêntico, a separação de urânio-235 do urânio-238 para aumentar a sua concentração necessita de uma tecnologia que permita aproveitar a tênue diferença de massa (peso) entre os dois, separando o urânio-235 (mais leve) do urânio-238 (mais pesado). O urânio pode ser utilizado na forma metálica (U com alto grau de pureza), como óxido ( $\text{UO}_2$ ,  $\text{U}_3\text{O}_8$ ), e sob a forma de diversos compostos, tais como:  $\text{U}_2\text{Fe}$ ,  $\text{U}_3\text{Si}$ ,  $\text{U}_3\text{Si}_2$ , UN, UC,  $\text{UC}_2$ ,  $\text{UC}_3$ ,  $\text{UAl}_2$ ,  $\text{UAl}_3$ ,  $\text{UAl}_4$ ,  $\text{UZr}_2$  etc. Sob a forma de materiais cerâmicos, temos principalmente o  $\text{UO}_2$  (comum como pastilhas cilíndricas) e  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$  e  $\text{ThO}_2$  (utilizados em reatores “breeders”) sendo utilizados como combustível nuclear (PERROTTA, 1999, p. 13-15).

Um projeto de reator nuclear inclui necessariamente as especificações do combustível que irá utilizar. Um conceito de medida importante do combustível nuclear vem a ser o *burnup*<sup>55</sup>, que se refere à eficiência de queima do combustível nuclear. Segundo Lamarsh (2001, p. 127-128):

<sup>54</sup> The 20% borderline between LEU and HEU is artificial and was based on the assumption that nuclear weapons with 20% or less  $^{235}\text{U}$  would not be efficient. The waste, or tails, of the isotope enrichment process contains less  $^{235}\text{U}$  than in natural uranium and is defined as depleted uranium (DU).

<sup>55</sup> The total energy released in fission by a given amount of nuclear fuel is called the fuel burnup and is measured in megawatt days (MWd). The fission energy released per unit mass of the fuel is termed the specific burnup of the fuel and is usually expressed in megawatt days per metric ton or per kilogram (that is, MWd/t ou MWd/kg) of the heavy metal originally contained in the fuel. [...] Fuel performance is also described in terms of fractional burnup (often expressed in %), denoted as  $\beta$  and defined as the ratio of the number of fissions in a specific mass of fuel to the total number of heavy atoms originally in the fuel.

A energia total liberada na fissão para uma dada quantidade de combustível nuclear é chamada de [eficiência da] queima de combustível [*burnup*], e é medida em megawatts por dia (MWd). A energia de fissão liberada por unidade de massa é chamada de queima específica do combustível [*specific burnup* ou *burnup* específico] e é normalmente expressa em megawatts por dia por tonelada ou por quilo (isto é, MWd/t ou MWd/kg) do metal pesado contido originalmente no combustível. [...] O desempenho do combustível é também descrito em termos de fração de *burnup* [*fractional burnup*] (frequentemente expresso em %), simbolizado por  $\beta$  e definido como a razão entre o nº de fissões em uma massa específica do combustível pelo nº total de átomos pesados presentes originalmente no combustível (*tradução nossa*).

E cada combustível, por sua vez, possui uma série de processos repetitivos determinados compondo o ciclo do combustível nuclear, com todas as etapas necessárias para converter o minério no combustível utilizado pelo reator, incluindo sua recuperação ou destinação final. Uma das razões de se considerar o Ciclo do Combustível Tório comparativamente aos Ciclos do Combustível Urânio ou Urânio-Plutônio diz respeito ao acréscimo de *burnup* que o primeiro proporciona.

### 2.3.2. Ciclo do Combustível Nuclear – Nuclear Fuel Cycle<sup>56</sup>

Ciclos são processos repetitivos. No combustível nuclear para geração nucleoe elétrica, o ciclo tem um significado muito particular, especialmente no que diz respeito às etapas de destinação final. Isto porque o combustível nuclear não se esgota por si – não se desfaz numa nuvem de gás de combustão, como ocorre na queima fóssil de derivados do petróleo ou gás natural, nem gera cinzas. Tampouco faz sentido em falar de ciclo de combustível no processo de geração eólica, solar ou mesmo hidrelétrica a fio d'água (sem reservatório). Grande parte da polêmica ambiental enfrentada pela energia nuclear gira em torno do armazenamento de combustível usado e dos possíveis riscos, uma vez que ainda há atividade (radioatividade) e geração de calor em escala não comercial, mas significativa o suficiente para exigir resfriamento.

A iniciativa brasileira em torno do domínio do ciclo completo da energia nuclear remonta as décadas de 1950, através da busca de cooperação tecnológica pelo Almirante Álvaro Alberto, que em 1953 negociou com a Alemanha Ocidental a compra de três ultracentrífugas e de uma usina para produção de hexafluoreto de urânio – UF<sub>6</sub> (etapa de conversão, necessária

---

<sup>56</sup> A centralidade do urânio (enriquecido) como combustível nuclear, bem como seu emprego associado com a produção de plutônio, tornou desnecessária a sua citação na maior parte das referências acerca do ciclo do combustível nuclear. Com a ascensão do debate do tório como combustível, tem-se utilizado a nomenclatura “Ciclo do Combustível Tório (*Thorium Fuel Cycle*)” para distinguir do “Ciclo do Combustível Nuclear (*Nuclear Fuel Cycle*)”, que engloba os ciclos do urânio e U-Pu (urânio-plutônio).

para o enriquecimento isotópico); com a França, a negociação envolveu uma usina de produção de dióxido de urânio –  $UO_2$ . O fato de o Brasil ter optado inicialmente pela linha de reatores a água leve pressurizada PWR que utilizam urânio levemente enriquecido – LEU como combustível nuclear reflete as decisões tomadas nessa fase inicial. A busca pelo domínio completo do ciclo do combustível nuclear se intensificou quando os EUA chantagearam o Brasil suspendendo o fornecimento de combustível para Angra I. Mais uma vez, a Alemanha se prontificou a estabelecer uma nova parceria, desta vez com a transferência tecnológica do enriquecimento de urânio e do reprocessamento do material irradiado, do qual se poderia produzir plutônio. Entretanto, pressões geopolíticas afetaram a negociação, e a transferência da tecnologia de enriquecimento por ultracentrifugação acordada inicialmente com a Alemanha teve de ser substituída por um processo experimental chamado *jet nozzle*, que na verdade nunca funcionou. Este evento marcou profundamente o governo brasileiro de tal sorte que se tomou a acertada decisão do desenvolvimento autóctone do ciclo completo de combustível nuclear. O enriquecimento do urânio representa uma conquista tecnológica nacional, fruto de uma parceria entre o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN (CAMARGO, 2006; ROCHA FILHO, 2006).

Atualmente, apenas doze países dominam esta tecnologia, que é considerado um processo eficiente e economicamente viável, dos quais somente três – Brasil, EUA e Rússia, possuem reservas de urânio suficientes e simultaneamente o domínio tecnológico para manter o ciclo de combustível autossustentado e independente em seus próprios países. No Brasil, cabe à INB – Indústrias Nucleares do Brasil, a coordenação e controle das etapas ciclo completo do combustível Nuclear. O enriquecimento isotópico é um processo economicamente viável, desde que um volume mínimo seja produzido. Quando Angra 3 estiver operacional, o volume de urânio enriquecido consumido pela CNAEA reunindo as três usinas permitirá que a INB alcance o *break-even* no processo de enriquecimento. Portanto, a entrada em operação de Angra 3 é imprescindível para a independência financeira da INB, hoje dependente de aportes orçamentários estatais para manter o fornecimento de Angra 1 e 2, onde parte do processo de enriquecimento é terceirizado para empresas estrangeiras fora do País (INB, 2019).

O ciclo completo do combustível nuclear envolve desde a extração mineral na exploração da jazida, passando por todos os tratamentos químicos e físicos e respectivos processos industriais para a montagem do elemento combustível até a destinação final. Tudo o que ocorre no ciclo de combustível nuclear se alinha à tecnologia de reator nuclear utilizada. Se o reator operar com urânio enriquecido, todas as etapas de enriquecimento necessárias constarão do ciclo. Caso a tecnologia do reator se baseie no urânio natural, tais processos

envolvendo enriquecimento podem ser suprimidos. O interesse na produção de plutônio afeta também o ciclo do combustível, incluindo a sua recuperação.

Literalmente, o detalhamento do ciclo do combustível nuclear está intrinsecamente relacionado com a tecnologia de reator nuclear empregada. Segundo Kok (2009, p. 213),

Há uma conexão intrínseca entre a escolha do ciclo do combustível e o reator ideal, na qual a busca de um ciclo de combustível simultaneamente prático e econômico deve ter prioridade frente à ambição de obter um ciclo “perfeito”. A resposta convencional tem sido sempre a de que nós precisamos migrar para os reatores regeneradores rápidos [...]. Esta solução comumente adotada é uma tecnologia bastante complicada e geralmente mais cara. Mas há outras opções. Nós precisamos otimizar a tecnologia nuclear: reduzir drasticamente o volume de resíduos radioativos através do reuso ou da queima do combustível descartado e assegurar a sustentabilidade e a maximização da utilização do recurso. [...] A resposta para tais desafios envolve formas inovadoras de pensar, nova P&D e uma estratégia de desenvolvimento de combustível nova, utilizando ciclos alternativos que incluem a reciclagem e **combustíveis de tório**<sup>57</sup> (*tradução nossa; grifos nossos*).

As etapas do ciclo do combustível nuclear visam primordialmente atender às demandas estratégicas de cada País, civis e militares. O domínio do ciclo do tório representa um desafio tecnológico atual e se encontra atrelado à evolução tecnológica de reatores de quarta geração. Os processos a seguir tratarão inicialmente do Ciclo do Combustível Urânio adotado no Brasil. O Ciclo do Combustível Urânio-Plutônio (U-Pu) não será explorado, uma vez que a tendência mundial do setor nuclear gira em torno da redução dos estoques de plutônio, concomitantemente com a diminuição de sua produção no médio e longo prazo.

### 2.3.2.1. Mineração e Beneficiamento.

É o primeiro conjunto de etapas do ciclo. A mina pode ser explorada a céu aberto ou ser subterrânea. Há mais de 200 tipos de ocorrências minerais uraníferas no planeta (PARATIN, 2002, p. 33). O Brasil é um País rico em minerais atômicos: as estatísticas costumam posicionar o Brasil entre a sexta e a sétima reserva mundial de minérios de urânio, com aproximadamente 309.370 toneladas de  $U_3O_8$ <sup>58</sup>. Considerando que o País só prospectou um terço de seu território

<sup>57</sup> *There is a link between the choice of fuel cycle and the optimal reactor, qualified by noting that we would not be pursuing a “perfect” cycle, but a practical and at the same time economic one. The conventional answer has always been that we need to move to a “breeding” fast reactor [...]. The fast-spectrum reactor is quite a complicated technology, and more expensive generally, and is one commonly adopted optimization solution. But there are others. We must optimize nuclear technology: reduce the volume of waste drastically by re-use/ burn of discharged fuel, and ensure sustainability and maximization of resource utilization. [...] The response to these challenges involves some new thinking, new R&D, and a new fuel development strategy, using alternate cycles that include recycling and thorium fuels.*

<sup>58</sup>  $U_3O_8$  é um óxido de ocorrência natural, resultado da oxidação do  $UO_2$ , usado como referência para cálculo de reservas.

com relação a minérios radioativos ricos em urânio, esse volume pode ainda crescer significativamente, especulando-se um volume adicional em torno de 500.000 toneladas de  $U_3O_8$ , que inclui reservas em Rio Cristalino (PA) e Pitinga (AM). Por outro lado, questões políticas e orçamentárias afetam a manutenção e retardam a expansão da lavra. Setores da área nuclear reivindicam a flexibilização do monopólio da extração de minérios radioativos, hoje assegurado constitucionalmente e delegado exclusivamente à INB.

Em 2019, havia somente uma única mina em operação a céu aberto no País. Localizada em Caetité, no sudoeste da Bahia, extrai o minério uranitita, que contém uma mistura de  $UO_2$  e  $U_3O_8$ . O beneficiamento da uranitita na Unidade de Concentrado de Urânio produz o chamado “yellow cake”, uma pasta amarela com alto teor de urânio. Genericamente, o “yellow-cake” se refere ao concentrado de  $U_3O_8$ . Todavia, esse composto químico amarelo que sai de Caetité é o diuranato de amônio – DUA,  $(NH_4)_2U_2O_7$ . Após esta etapa de produção de concentrado, este é acondicionado em tambores enquanto aguarda a etapa de Conversão.

Há cerca de uma dezena de outros projetos visando o aumento da produção mineral brasileira. Dentre eles, destacamos: 1) Projeto Santa Quitéria que visa explorar o urânio associado ao fosfato da jazida de Itatiaia, no município de Santa Quitéria, Ceará, cuja produção primária será a de fosfato, com o urânio como um subproduto; e, 2) Projeto de Ampliação da Unidade de Concentrado de Urânio em Caetité (INB, 2019).

### **2.3.2.2. Conversão**

Apesar do domínio tecnológico completo do ciclo do combustível nuclear do País, o Relatório Integrado 2018 da INB afirma: “Após esse processo [beneficiamento] o material é colocado em tambores especiais e seguem para a fase de conversão realizada internacionalmente”. A Carta Anual de Políticas Públicas e Governança Corporativa da INB complementa: “Somente a etapa de conversão e parte do enriquecimento ocorrem no exterior” (INB, 2019). Tais etapas ainda são realizadas fora do Brasil por questões econômicas e de infraestrutura industrial. De Caetité, o “yellow cake” DUA, acondicionado em tambores, é enviado até o porto de Salvador e embarcado para o Canadá, onde será convertido no gás hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ). Em seguida, o gás produzido no Canadá é enviado à Europa para que uma unidade da URENCO efetue o enriquecimento<sup>59</sup> (FAPEMA, 2019; INB, 2019).

---

<sup>59</sup> SANTOS, Ivanildo. Brasil quer autossuficiência na produção de urânio até 2014. **FAPEMA**. Maranhão, 15 out. 2009. Disponível em: < <https://www.fapema.br/index.php/brasil-quer-autosuficiencia-na-producao-de-uranio-ate-2014/>>. Acesso em 23 set. 2019.

### 2.3.2.3. Enriquecimento Isotópico

No mundo, a concorrência comercial de processos de enriquecimento isotópico se limita à difusão gasosa (EUA e França) e à ultracentrifugação isotópica (Rússia, consórcio URENCO, Japão e Brasil). A ultracentrifugação isotópica é mais vantajosa que a difusão gasosa, por consumir muito menos energia no processo, ser mais eficiente e rápida no processo de separação física e permitir a instalação de pequenas unidades em cascata – o enriquecimento do combustível pode ser feito em cascatas dedicadas, evitando contaminação (PATARIN, 2002).

No Brasil, o Centro Tecnológico da Marinha de São Paulo – CTMSP fabrica as ultracentrífugas que são utilizadas pela INB. O documento Análise de Metas e Resultados do Plano de Negócios de 2018 da Indústrias Nucleares do Brasil – INB afirma que a URENCO é a “empresa fornecedora do serviço de enriquecimento isotópico no exterior” – a empresa recebe o gás  $UF_6$  do Canadá e efetua o enriquecimento isotópico de urânio, obtendo maior concentração do isótopo urânio-235 – entre 2% e 5%. Esse processo não produz rejeitos, embora os resíduos da ultracentrifugação isotópica gerem urânio empobrecido (DU). A etapa seguinte é a reconversão, na qual o produto retorna à forma sólida (INB, 2019).

### 2.3.2.4. Reconversão e Fabricação de Pastilhas

A Fábrica de Combustível Nuclear – FCN da INB, localizada no município de Resende, no Rio de Janeiro, executa o processo de reconversão. Nesta etapa, há a transformação do gás  $UF_6$  enriquecido em dióxido de urânio –  $UO_2$ , sob a forma de pó, que é misturado a outros compostos de urânio. Essa mistura em pó é então prensada para ser compactada, formando frágeis pastilhas verdes que precisam ser reforçadas para poder suportar as severas condições internas do reator durante a operação sem trincar. Por isso, as pastilhas verdes sofrem um processo metalúrgico de sinterização, em um forno a uma temperatura de 1700-1750 °C para a confecção de pastilhas reforçadas. Tais pastilhas ainda são retificadas para ajuste fino das dimensões. Em seguida, são armazenadas para, oportunamente, serem acondicionadas em varetas (tubos) de uma liga metálica especial chamada *zircaloy*<sup>60</sup> para compor o elemento combustível (PERROTTA, 1999).

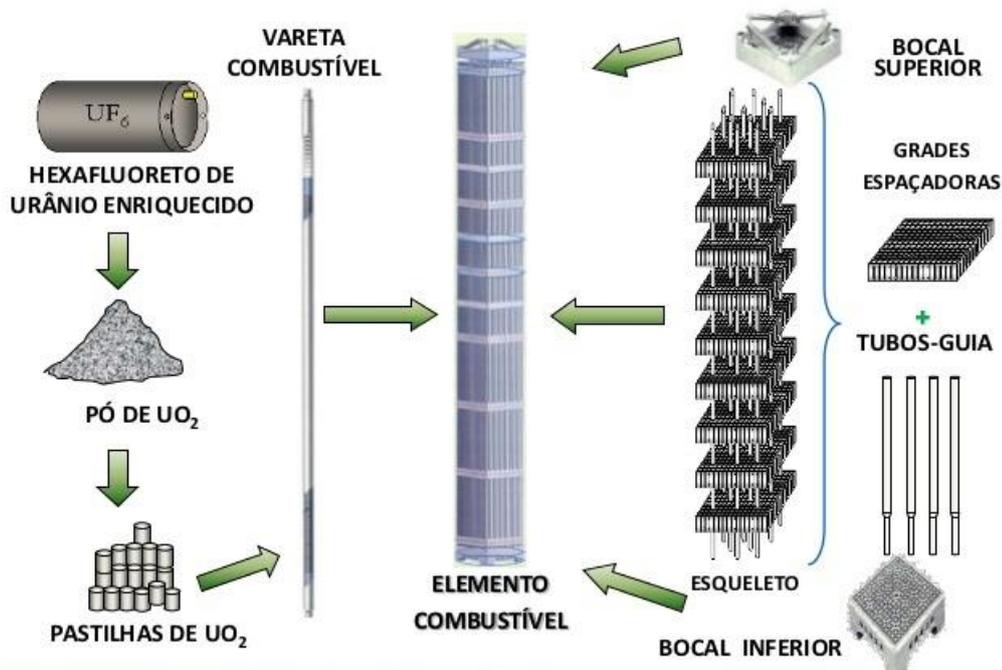
---

<sup>60</sup> *Zircaloy* é uma liga de zircônio (Zr) especialmente projetada para reatores nucleares devido às suas propriedades apropriadas sob o aspecto de economia de nêutrons. É um material estrutural utilizado principalmente para revestimento de combustíveis para reatores de tipo PWR, para varetas, tubos guias e espaçadores.

Genericamente, o Elemento Combustível (EC) pode ser definido como um conjunto metálico rígido contendo combustível em barras, varetas ou placas, em um arranjo geométrico pré-definido. Nos reatores nucleares comerciais da CNAEA, o elemento combustível (EC) é uma estrutura metálica rígida composta de tubos de uma liga metálica especial – o zircaloy –, formando um feixe de varetas com até cinco metros de altura, cada qual com dezenas de pastilhas do material físsil; e o “esqueleto”, onde há uma série de grades espaçadoras, tubos guia para as varetas de controle, molas e bocais nas extremidades inferior e superior. Os feixes de varetas são agrupados seguindo a geometria da seção transversal, que pode ser circular, hexagonal, quadrado ou retangular, dependendo do projeto.

A figura 2.3 contribui para identificar os principais componentes estruturais dos elementos combustíveis utilizados pelas usinas da CNAEA.

**Figura 2.3 – Ciclo do Combustível Nuclear – Confeção do Elemento Combustível.**



Fonte: INB (2019).

A produção e montagem dos elementos combustíveis dos reatores no Brasil ocorrem na Fábrica de Combustíveis Nucleares da INB, em sua Unidade de Equipamentos e Montagens, também localizada em Resende – RJ. Esses conjuntos permanecem no reator por um longo tempo até que o acúmulo de produtos de fissão e o consumo de material físsil diminuam sua contribuição para a operação do reator, a ponto de justificar a sua substituição.

Há um planejamento para os reatores de Angra I e II, no qual há previsão de interrupção periódica da operação para substituição de cerca de 1/3 (um terço) dos elementos combustíveis.

Conforme descrito pela INB (2019):

As pastilhas de urânio são empilhadas em varetas de uma liga super-resistente, o zircaloy. Um conjunto destas varetas, mantidas rigidamente por grades espaçadoras, forma o elemento combustível. As usinas Angra 1 e Angra 2 são abastecidas por dois combustíveis diferentes, ambos fabricados pela INB.

Um elemento combustível permanece no reator durante três ciclos, ou seja, aproximadamente três anos. Após este período eles são armazenados dentro das usinas, nas piscinas de combustíveis usados.

Conforme supracitado, na CNAEA há periodicamente uma parada programada para troca de parte dos elementos combustíveis usados: nestes, o urânio se tornou empobrecido e passou a apresentar um desempenho inferior na geração de calor. Um terço dos elementos combustíveis usados é substituído por elementos novos. O conjunto retirado contendo além do urânio empobrecido uma variedade de núclídeos transurânicos (TRU), vai para a destinação final.

O quadro 2.5 relaciona os componentes estruturais dos elementos combustíveis utilizados pelas usinas da CNAEA:

**Quadro 2.5 – Componentes dos Elementos Combustíveis de Angra I e II.**

Componentes	Angra I	Angra II
Tecnologia	Westinghouse	Siemens
Urânio Enriquecido (Total)	17 ton. U – 4,0%	35 ton. U – 4,5%
Nº de Elementos Combustíveis	121 Elementos Combustíveis	193 Elementos Combustíveis
Nº de Varetas por Elemento Combustível	235 Varetas (por elemento combustível) rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica.	236 Varetas (por elemento combustível) rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica.
Comprimento do Elemento Combustível	4 metros	5 metros
Partes da Estrutura Metálica	10 Grades Espaçadoras, 1 Grade Protetiva, 20 Tubos Guias 1 Tubo de Instrumentação 1 Bocal Inferior 1 Bocal Superior	9 Grades Espaçadoras, 1 Grade Protetiva, 20 Tubos Guias 1 Bocal Inferior 1 Bocal Superior
Nº de Pastilhas por Vareta	369 Pastilhas por Vareta	384 Pastilhas por Vareta
Peso Total de Elemento Combustível	600 Kg	840 Kg
Frequência de Recarga	Aprox. a cada 12 meses	Aprox. a cada 13 meses
Quantidade Substituída	Aprox. 33%	Aprox. 33%

Fonte: Adaptado de INB (2019) e Eletronuclear (2019).

### 2.3.2.5. Destinação Final

A decisão da destinação final do combustível nuclear também se relaciona diretamente com a escolha do reator nuclear e com o ciclo adotado – ciclo aberto (Open Cycle or Once-Through Cycle) ou ciclo fechado (Closed Cycle). Patarin (2002, p. 14) sintetiza o dilema do combustível usado e sua conexão com o ciclo do combustível nuclear:

O que pode ser feito com o combustível usado?

- declarar que o combustível usado é um resíduo global, e escolher a via do ciclo aberto ou direto;
- ou tratar de recuperar e reciclar os núcleos com núcleos pesados restantes, e escolher então o ciclo fechado<sup>61</sup>.

*(tradução nossa)*

Há três lógicas ou linhas de raciocínio ao se tratar do ciclo do combustível nuclear que estão profundamente relacionadas com a questão dos resíduos nucleares: A **lógica física** ou científica leva em consideração o desperdício do armazenamento, que impede o reaproveitamento de material radioativo ainda ativo. Neste particular, a reciclagem e a recuperação<sup>62</sup> se afiguram como uma solução lógica para o aproveitamento energético máximo, visto que o combustível usado ainda se encontra em atividade – inclusive gerando calor, o que obriga que instalações de armazenamento possuam piscinas para receber o material e acondicioná-lo, antes de transferi-lo (se for o caso) para tambores e armazenagem seca. Essa transferência tem como destino a estocagem geológica de barreiras múltiplas, uma combinação complexa de barreiras naturais (formações geológicas compostas de rochas profundas com diversas camadas geológicas) e barreiras artificiais (o recipiente, concreto, betume e resina) para armazenar “definitivamente” resíduos de meia-vida muito longa.

A **lógica econômica** relaciona-se diretamente com o preço de mercado do combustível, enquanto a **lógica ecológica**, quando favorável à energia nuclear, requer a reciclagem e recuperação mesmo a um custo superior. Em verdade, a polêmica em torno da destinação final do combustível usado se encontra no cerne das discussões sobre a energia nuclear. Portanto, a escolha do ciclo aberto sempre trará consigo a problemática do que fazer com o combustível usado e corresponde à lógica econômica. No caso do ciclo fechado, onde se procura recuperar

<sup>61</sup> *Que peut-on faire du combustible usé? – déclarer que le combustible usé est un déchet global, et choisir la voie du cycle “ouvert” ou direct; - ou bien le traiter pour récupérer et recycler les noyaux lourds restants, et choisir ainsi le cycle “fermé”.*

<sup>62</sup> O PUREX (Plutonium Uranium Recovery by Extraction) é um processo estudado há mais de 50 anos, e hoje é o estado-da-arte na separação de material nuclear de resíduos. A recuperação de plutônio pode chegar a 99,88% (PATARIN, 2002, p.109-110).

urânio e plutônio, a quantidade de resíduos é minimizada e alinha-se às lógicas científica e, consequentemente, ecologicamente corretas (PATARIN, 2002, p.15-16).

As usinas de Angra I e II atualmente operam em ciclo aberto, como a maioria das usinas no mundo. A questão de destinação final de resíduos gerados pela CNAAA faz parte do conjunto de projetos prioritários da Eletronuclear. Classificado com um dos “Eletronuclear’s Top Five Projects<sup>63</sup>”, uma Unidade de Armazenamento de Combustível Usado se destaca como o projeto de “Prioridade 2”. A Eletronuclear prevê a possibilidade de reaproveitamento no futuro. Segundo Crossland (2012), “reprocessar é difícil, caro e não é isento nem de riscos nem de proliferação”<sup>64</sup>. A composição dos resíduos destas usinas inclui, além do urânio empobrecido, uma grande variedade de nuclídeos transurânicos (TRU) incluindo isótopos de netúnio (Np) e de plutônio (Pu). Especificamente, a redução da quantidade de plutônio presente no combustível nuclear usado tem sido uma das principais razões do renovado interesse internacional pelo Ciclo do Combustível Tório – CCT, assim como a redução da produção deste elemento. No caso do consumo dos estoques provenientes de rejeitos radioativos, uma solução possível seria o reaproveitamento do combustível usado em um reator apropriado para consumi-lo. Esta é exatamente uma das motivações para o debate acerca da utilização de compostos à base de tório em reatores nucleares, assim como do Ciclo do Combustível Tório – CCT (Thorium [based] Fuel Cycle – TFC).

### **2.3.3.Ciclo do Combustível Tório (CCT) – Thorium [based] Fuel Cycle (TFC)**

Historicamente, as pesquisas após a Segunda Guerra Mundial envolvendo combustíveis nucleares concentraram-se no urânio e no plutônio. Houve um grande interesse no tório entre as décadas de 1950-1970, principalmente em países com escassez de reservas de urânio e abundância de tório. No mundo, o tório se manifesta na natureza em uma proporção de três a quatro vezes superior à de urânio, e amplamente distribuído no globo terrestre, sendo um recurso facilmente explorável em muitos países. Muitas são as razões apontadas para a renovação do interesse pelo tório, sendo consenso as preocupações sobre não-proliferação concernentes ao advento do final da Guerra Fria, principalmente devido à grande quantidade de plutônio produzido em reatores civis e militares, considerando-se tanto os estoques disponíveis como o volume presente em resíduos de combustíveis usados.

---

<sup>63</sup> Ver Guimarães (2019).

<sup>64</sup> *Reprocessing is difficult, expensive and not without risks, not least that of proliferation.*

Desde 1994, a Agência Internacional de Energia Atômica vem realizando encontros técnicos com especialistas de diversos países para reunir contribuições acerca das aplicações, dos benefícios econômicos e das vantagens percebidas referentes ao Ciclo do Combustível Tório – CCT. Os encontros técnicos anuais culminaram na formação, entre os anos 2000 e 2001, do INPRO – *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles* (Projeto Internacional em Reatores Nucleares e Ciclos de Combustível Inovadores), vinculado à AIEA, direcionado para as tecnologias nucleares do século XXI alinhadas com questões de sustentabilidade e não-proliferação, dentre outras. Em 2019, o INPRO possuía 42 membros, sendo 41 países mais a Comunidade Europeia.

Os encontros promovidos pela AIEA produziram um conjunto de publicações reunindo dados de P&D com tório com intercâmbio das experiências de sua utilização em diversos países e modelos de reatores. Desta forma, as vantagens e possíveis benefícios, bem como as dificuldades ou desafios presentes no Ciclo do Combustível Tório (CCT) reacenderam o debate quanto ao papel do tório como combustível ou suplemento. A operacionalidade do CCT ainda não se encontra plenamente estabelecida: há uma variedade de projetos e protótipos de reatores sendo desenhados e testados; por outro lado, os modelos já existentes também vem sendo testados para operar com tório, seja em misturas de combustíveis, seja no emprego do tório em materiais estruturais ou como componente em combustíveis. Assim sendo, o CCT será descrito em termos das informações mais recorrentes: a primeira parte do *Front End* do ciclo, mais precisamente Mineração e Beneficiamento do Tório; as questões técnicas e tecnológicas que permitem o uso em reatores, suscitando o debate; e o *Back End* do ciclo, em especial a Destinação Final.

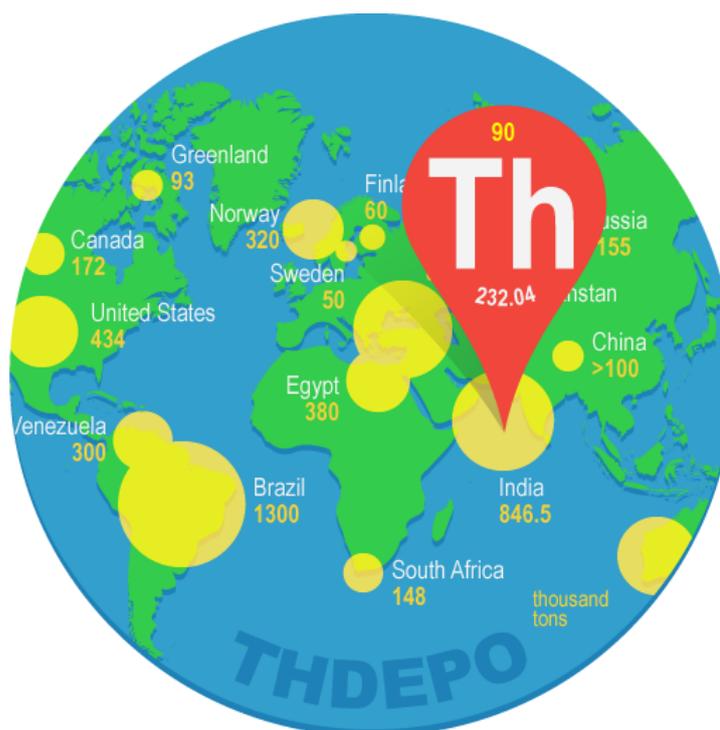
### **2.3.3.1. Mineração e Beneficiamento – Tório.**

Uma das primeiras linhas de argumentação quanto às vantagens do tório em relação ao urânio diz respeito à sua disponibilidade na natureza, em quantidade três a quatro vezes superior. Apresenta-se basicamente sob a forma de fosfatos, silicatos, carbonatos e óxidos minerais, sendo comum a associação de tório, urânio e terras raras, como no caso dos fosfatos conhecidos como monazita ou areias monazíticas. No Brasil, as exportações de areias monazíticas negociadas entre 1945 até o governo JK com os Estados Unidos visavam o fornecimento de urânio e tório para aquele país. Segundo a AIEA (2005, p. 7), a produção atual de tório provém basicamente das terras raras como subproduto, cuja mineração e beneficiamento operam de forma muito mais simplificada e, neste caso, a extração se dá a céu

aberto. Segundo a UNECE – *United Nations Economic Commission for Europe* (Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa), a própria monazita é muitas vezes um subproduto recuperado oriundo do processamento de areias de minerais pesados como de titânio e zircônio (UN, 2017, p. 7).

A AIEA mantém um banco de dados de depósitos mundiais de urânio (UDEPO) e de tório (ThDEPO), como parte do INFCIS – *Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System* (Sistema de Informações Integrado para o Ciclo do Combustível Nuclear). A figura 2.4 destaca o Brasil e a Índia como detentores das maiores reservas mundiais, muito embora nem mesmo o próprio Brasil disponha de dados oficiais, visto que apenas 1/3 (um terço) do território nacional foi pesquisado para minérios nucleares. Todavia, há disponibilidade de tório em todos os continentes, em quantidade mais do que suficiente para séculos de operação nuclear baseada no CCT, ainda mais se considerarmos tal operação em conjunto com os demais ciclos de combustível. Canadá, Noruega e Austrália são alguns dos países com vastas reservas em seus territórios e pesquisa consistente para aproveitamento do tório como combustível nuclear.

**Figura 2.4 – Distribuição Mundial de Reservas de Tório em Milhares de Toneladas.**



Fonte: ThDEPO – World Thorium Deposits and Resources (2019).

Disponível em: < <https://infcis.iaea.org/THDEPO/About.cshtml>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

Outro aspecto relevante refere-se a fatores operacionais da mineração e beneficiamento de minerais toríferos. Com relação aos resíduos radioativos da produção, sua magnitude é duas vezes menor do que no caso do urânio: não há necessidade de controle de ventilação no que diz respeito à exposição pública ao gás radônio, pois os níveis de inalação de torônio<sup>65</sup> (thoron, Rn-220, isótopo do gás radônio, Rn-222) trazem um baixo impacto graças à sua meia-vida curta de 55 segundos (IAEA, 2005, p. 7). Comparativamente ao urânio, a mineração do tório traz uma vantagem inquestionável: de todo o urânio extraído, busca-se recuperar para uso combustível apenas 0,7% do U-235 físsil contido no minério, ao passo que (*grosso modo*) 100% do tório extraído será destinado ao aproveitamento como combustível.

### 2.3.3.2. Tório: Vantagens e Desafios Operacionais.

Aspectos tecnológicos e econômicos vêm sendo analisados a fim de viabilizar reatores comerciais operando com o CCT. O quadro 2.6 sintetiza as vantagens e possíveis benefícios levantados em pesquisas confrontando-os com as dificuldades e desafios ao considerar o tório como principal combustível em um reator nuclear de potência.

**Quadro 2.6 – Vantagens e Desafios do Ciclo do Combustível Tório**

Vantagens / Possíveis Benefícios	Dificuldades / Desafios
Na etapa de mineração, o aproveitamento do tório é de praticamente 100% da extração do minério, enquanto o urânio aproveitável como combustível é da ordem de 0,7% do respectivo minério.	O tório não possui isótopo físsil, embora tenha boas propriedades como material fértil.
Aumento de recursos mundiais físsis através da regeneração (“breeding”) do <sup>233</sup> U a partir do tório. Como consequência direta, há redução da necessidade de enriquecimento de <sup>235</sup> U.	<sup>233</sup> U pode ser utilizado como material para armamento em quantidades similares ao Pu ou <sup>235</sup> U.
Melhora da utilização de combustível físsil em reatores térmicos, com o potencial de maior eficiência da queima / melhor rendimento do combustível ( <i>burnup</i> ).	A contaminação com o isótopo <sup>232</sup> U (urânio-232) complica consideravelmente a fabricação do combustível, que deve ser efetuada remotamente com proteção adequada (blindagem), fato que encarece a fabricação do combustível.
Redução de custos no ciclo do combustível em comparação com os ciclos baseados em urânio/U-Pu.	A indústria do ciclo do combustível tório precisa investir maciçamente para alcançar a mesma escala e status dos ciclos do urânio/U-Pu.

Fonte: IAEA (2000; 2005; 2012).

<sup>65</sup> Radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) are short-lived radioactive gases that originate as daughter products in the decay chains of the uranium and thorium present either in the soil or construction materials of the laboratory. Their concentration in the atmosphere can vary significantly<sup>8</sup> depending on the time of day and meteorological conditions (KNOLL, 2010, p 810).

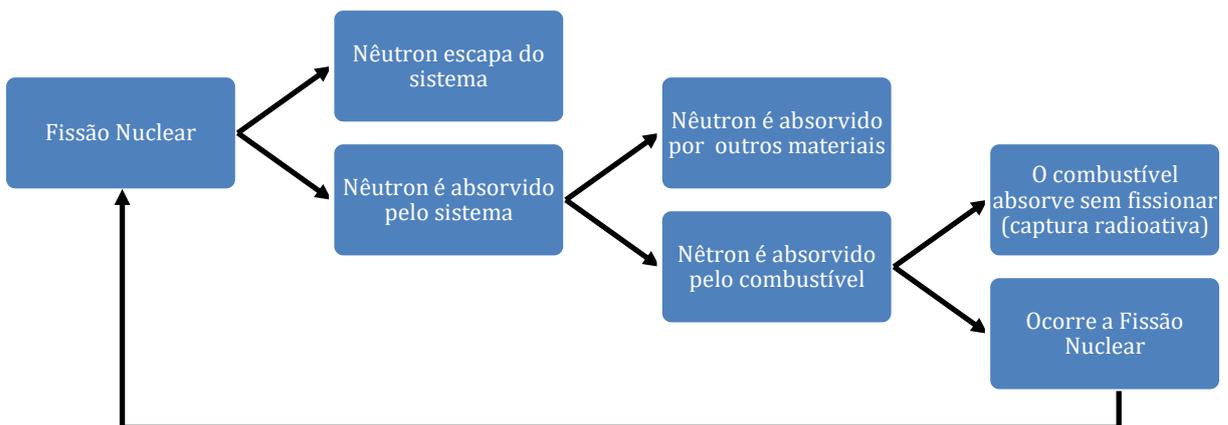
### 2.3.3.3. Destinação Final – Tório

O CCT pode ser adotado de forma aberta (Once-Through TFC), baseado na irradiação de tório-232 e na conversão no núcleo do reator em urânio-233, sem envolver a separação química de  $^{233}\text{U}$ ; ou, através do ciclo fechado (Closed TFC), baseado no reprocessamento do tório irradiado ou do combustível associado ao tório para recuperação do urânio-233, “refabricando” ou reciclando. Na comparação do ciclo aberto do combustível urânio ou U-Pu com o do tório, o CCT produz uma quantidade de plutônio muito menor, bem como de outros actínídeos de meia-vida longa, em especial nuclídeos de netúnio (Np), amerício (Am) e cúrio (Cm). As consequências diretas se exprimem pela minimização da toxicidade do resíduo – 30 vezes menor (IAEA, 2005, p. 10), bem como pela redução do calor produzido. Outro fator que contribui para retardar a migração de transurânicos dentro do depósito é a estabilidade do óxido de tório  $\text{ThO}_2$ . Já o ciclo fechado pode variar de desempenho conforme o reator utilizado e a escolha do método de reprocessamento e recuperação do combustível usado.

### 2.3.4. Demais Componentes e Materiais Principais de um Reator Nuclear

No processo de fissão nuclear dentro de um reator, os nêutrons podem ter quatro destinações distintas: Podem ser absorvidos pelo combustível ou não; neste último caso, podem ser absorvidos pelo moderador ou pela estrutura, numa captura não produtiva; e, ainda, alguns podem escapar do reator. Isto significa que nem todos os nêutrons gerados são aproveitados no processo de fissão. A figura 2.5 ilustra tais possibilidades:

**Figura 2.5 – O nêutron gerado na fissão nuclear**



Fonte: Adaptada de Duderstadt & Hamilton (1976).

Portanto, uma vez escolhido o combustível nuclear e o respectivo ciclo de combustível a ser utilizado, alguns elementos e materiais essenciais devem ser considerados, estando intrinsecamente conectados ao conceito tecnológico do reator: moderadores, refrigerantes, absorvedores e blindagem. Da combinação desses elementos derivam-se padrões tecnológicos que se tornam paradigmas para a escolha de um determinado modelo de reator.

#### **2.3.4.1.Moderador (Moderator)**

O processo de fissão nuclear gera naturalmente nêutrons rápidos. De forma simplificada, são os nêutrons lentos (ou térmicos) que podem iniciar a fissão do urânio-235. Como os nêutrons produzidos na fissão são nêutrons rápidos, possuem baixa probabilidade de induzir novas fissões, ou seja, de produzir novos nêutrons para manter um processo de fissão nuclear autossustentado (há ainda os chamados nêutrons intermediários, epitérmicos ou de ressonância). Por este motivo, há necessidade de desacelerar (termalizar / moderar) os nêutrons rápidos para que fiquem mais lentos.

Os moderadores são substâncias capazes de absorver nêutrons, desacelerando o processo de fissão. Reatores nucleares que trabalham com nêutrons lentos são chamados de reatores térmicos ou termais. No projeto destes reatores, são considerados como moderadores: água ( $H_2O$ ), água pesada (deutério;  $D_2O$ ), o gás hélio (He), o berílio (Be) e seu óxido berília ( $BeO$ ), o Boro (B), o carbono (C), geralmente sob a forma de grafite, sódio metálico (Na), dentre outros. Os moderadores também atuam como refletores na periferia do núcleo do reator (axiais e radiais), fazendo retornar tanto os nêutrons espalhados como aqueles em fuga (CNEN, 2019; INB, 2019).

#### **2.3.4.2.Refrigerante (Coolant)**

Como Madame Curie detectou no início do século passado, e Lise Meitner confirmou décadas depois, a radioatividade gerada seja pelo decaimento radioativo natural ou pelo processo de fissão gera calor, que precisa ser retirado do sistema. Os refrigerantes, como o próprio nome diz, são substâncias com boas propriedades de transferência de calor, utilizadas para retirar calor do sistema e utilizá-lo no reator. Segundo Perrotta (1999, p. 11):

[O refrigerante] deve ter densidade que minimize a força de bombeamento, bem como ter um baixo ponto de fusão que eliminaria a possibilidade de solidificação e um alto ponto de ebulição para minimizar a pressão do vapor e maximizar a temperatura de trabalho e eficiência térmica da planta de potência.

A água é o refrigerante mais comum, e uma das principais razões para a existência de piscinas, onde os reatores permanecem imersos durante a operação e mesmo desligados. Água pesada ( $D_2O$ ), gases – como hélio (He), gás carbônico ( $CO_2$ ) e vapor d'água; e metais líquidos (Na, NaK) ou sais fundidos de sódio misturado com outros componentes também são uma opção, dependendo do modelo de reator. O sistema de refrigeração faz parte do projeto de segurança de um reator nuclear, e a sua falha pode provocar acidentes, como o de Fukushima, ocorrido em 2011 no Japão.

#### **2.3.4.3. Absorvedores ou Controladores**

As varetas de controle, como o próprio nome diz, são elementos de controle e segurança (control rods) construídos com materiais de grande capacidade de absorver nêutrons. Da mesma forma, o veneno queimável é um material absorvedor que compensa a reatividade positiva do material físsil com uma reatividade negativa própria, auxiliando também na homogeneização da distribuição de potência no núcleo. Um dos efeitos colaterais do uso das varetas de controle é o de dispersão do fluxo de nêutrons, aumentando a sua perda, o que geralmente é compensado com o veneno queimável. O veneno queimável também pode ser gerado como subproduto de fissão.

Alguns dos principais materiais com essas características absorvedoras de nêutrons são: Boro (Natural, B-10), Cádmio (Natural, Cd-113), Prata (Natural, Ag-107, Ag-109), Índio (In-113, In-115), Samário (Sm-149, Sm-152,  $Sm_2O_3$ ), Háfnio (Hf-177 a Hf-180), Európio (Eu-151, Eu-153,  $Eu_2O_3$ ), Érbio (Er) e Gadolínio (Gd-155, Gd-157), dentre outros. Ligas de Ag-In-Cd na proporção (80-15-5), ligas ou dispersões de Boro, Carbetos de Boro ( $B_4C$ ) enriquecido ou não com B-10 em dispersões em aço inox (compactado em varetas/tubos de aço inox), em forma de pó compactado, em forma de pastilhas sinterizadas, pastilhas sinterizadas de  $Al_2O_3-B_4C$  encapsuladas em tubos de zircaloy-4, silicato de boro na forma vítrea, mistura de  $UO_2-Gd_2O_3$  (veneno queimável misturado com o combustível) e ácido bórico ilustram a grande variedade de opções de absorvedores.

#### **2.3.4.4. Blindagem**

A blindagem diz respeito ao material interposto entre as fontes de radiação e pessoas ou meio ambiente, com o intuito de reduzir a exposição à radiação. Grossas paredes de concreto fornecem uma camada de segurança nas centrais nucleares. As piscinas, além de retirar calor

da água, também fornecem proteção contra a radiação. A água deve ser desmineralizada e respeitar rigorosos controles de radiação, de pH, de condutividade, de presença de íons e de temperatura, sendo constantemente monitorada e trabalhando em circuito fechado para tratamento. A blindagem incorpora os requisitos dos moderadores e absorvedores, empregando materiais capazes de atenuar a energia de nêutrons rápidos, absorver nêutrons com energias baixas e intermediárias e atenuar a radiação gama. Além de compostos já citados como água, boro e seus compostos, os principais materiais utilizados são o concreto associado em Fe ou minério de ferro, chumbo (Pb), bismuto (Bi) e tungstênio (W) (PERROTTA, 1999, p. 12).

## 2.4. Tipos de Reatores Nucleares

O modelo predominante de reator nuclear no mundo é o PWR – Pressurized Water Reactor, ou Reator à Água Pressurizada, o mesmo utilizado na CNAEA. Embora Angra III ainda esteja em fase de construção, o projeto inicial já definiu que o reator a ser utilizado seria um PWR. Em 31 de dezembro de 2018 havia 451 reatores nucleares operacionais, dos quais 298 eram PWR; dos 55 em construção, nada menos do que 45 eram PWR (IAEA, 2019). Quando o objetivo do reator nuclear é a geração nucleoe elétrica, a potência deve ser definida conforme exemplificado nos quadros 2.7 e 2.8.

**Quadro 2.7 – Medidas de Potência e Eficiência de uma Planta Nuclear**

Unidade	Descrição	Referência da Unidade de Medição
MWt	Potência Térmica	Depende do projeto do reator nuclear e diz respeito à quantidade e qualidade <sup>66</sup> de vapor gerado.
MWe (Gross)	Potência Elétrica Bruta	Indica a potência elétrica produzida pelo vapor que aciona a turbina para geração de energia elétrica.
MWe (Net)	Potência Elétrica Líquida	Indica a potência elétrica transmitida da planta para a rede elétrica.
%	Rendimento Térmico Bruto	Medida de Eficiência de uma planta nuclear obtida pela fórmula: $\text{Rendimento Térmico (\%)} = \frac{\text{Potência Elétrica Bruta (MWe)}}{\text{Potência Térmica (MWt)}} \times 100$
%	Rendimento Térmico Líquido	Medida de Eficiência de uma planta nuclear obtida pela fórmula: $\text{Rendimento Térmico (\%)} = \frac{\text{Potência Elétrica Líquida (MWe)}}{\text{Potência Térmica (MWt)}} \times 100$

Fonte: Adaptado de Zohuri (2017).

<sup>66</sup> A qualidade do vapor é determinada pela quantidade de vapor seco numa mistura real de vapor úmido (água saturada, coexistindo na forma gasosa e na forma líquida, sob a forma de gotículas). O vapor totalmente seco é hipotético e tem qualidade  $x=1$  ou 100%. Quanto maior o percentual de vapor “seco”, maior a transferência de calor e maior será também a eficiência térmica do processo, ou seja, **o vapor mais seco é o de melhor qualidade** (CRUZ, 2016).

**Quadro 2.8 – Medidas de Potência e Eficiência da CNAEA. Os dados de Angra 3 são estimativas.**

Usina	Potência Térmica / Nuclear Thermal (MWt)	Potência Elétrica Bruta / Gross Electrical (MWe)	Potência Elétrica Líquida / Net Electrical (MWe)
Angra I	1.882	640	609
Angra II	3.771	1.350	1.280
Angra III	3.765	1.350 / 1.405	indisponível

Fonte: Eletronuclear (2019). Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Resende>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

A decisão sobre o modelo de um reator nuclear a ser adotado é um paradigma que cada País possui (conforme mencionado no item 2.3.4, p. 89) e poucos países e empresas dominam a tecnologia de fabricação de reatores nucleares. A EPE reconhece oficialmente a tendência internacional de desenvolvimento tecnológico de reatores nucleares a partir de 2050:

A IAEA em sua publicação “*Nuclear Technology Review, 2014*” (IAEA, 2015) considera que os reatores de Geração III deverão ser a principal tecnologia para geração de energia nuclear até 2050. Contudo, a partir de 2020 é esperado que a indústria nuclear lance em escala não comercial os Reatores de Pequeno e Médio porte (SMRs) da Geração III+ e de Geração IV (TOLMASQUIM, 2016, p.368).

Há quatro gerações de reatores nucleares (ou cinco, se considerarmos as Gerações III e III+ distintas). O precursor dos atuais reatores foi o Chicago Pile One – CP 01, reator construído dentro do Projeto Manhattan pela equipe de Enrico Fermi, no qual a primeira criticalidade foi atingida. Em outras palavras, a primeira reação nuclear controlada foi estabelecida, tornando-se um marco tecnológico. Podemos descrever o Chicago Pile One como sendo um reator que utilizava apenas material fértil com baixíssimo percentual de material físsil, o urânio natural. O combustível era composto por metal e óxido, em forma de varetas. Empregava grafite como moderador, era refrigerado a ar e operava em ciclo direto (sem reprocessamento dos resíduos).

Embora o CP 01 date de dezembro de 1942, como o conhecimento nuclear fazia parte do esforço de guerra para construção dos dispositivos atômicos (bombas), os primeiros reatores nucleares visando geração nucleoe elétrica só surgiram como alternativa energética a partir da década de 1950, com a 1ª Geração de Reatores Nucleares. Contextualizando historicamente, a URSS havia detonado sua 1ª bomba atômica em 1949; em oito de dezembro de 1953 (onze anos depois da criticidade do CP 01), Eisenhower lança o programa Átomos para a Paz, e os EUA passam a disponibilizar reatores de pesquisa, mediante determinadas contrapartidas dos países beneficiados, como o depósito de uma quantidade de urânio. No Brasil, o Almirante Álvaro Alberto representava o enfrentamento de resistências internas e externas para o estabelecimento dos alicerces de um futuro Programa Nuclear Brasileiro: em 1954, as ultracentrífugas encomendadas secretamente pelo almirante à Alemanha são retidas no porto da Antuérpia, no

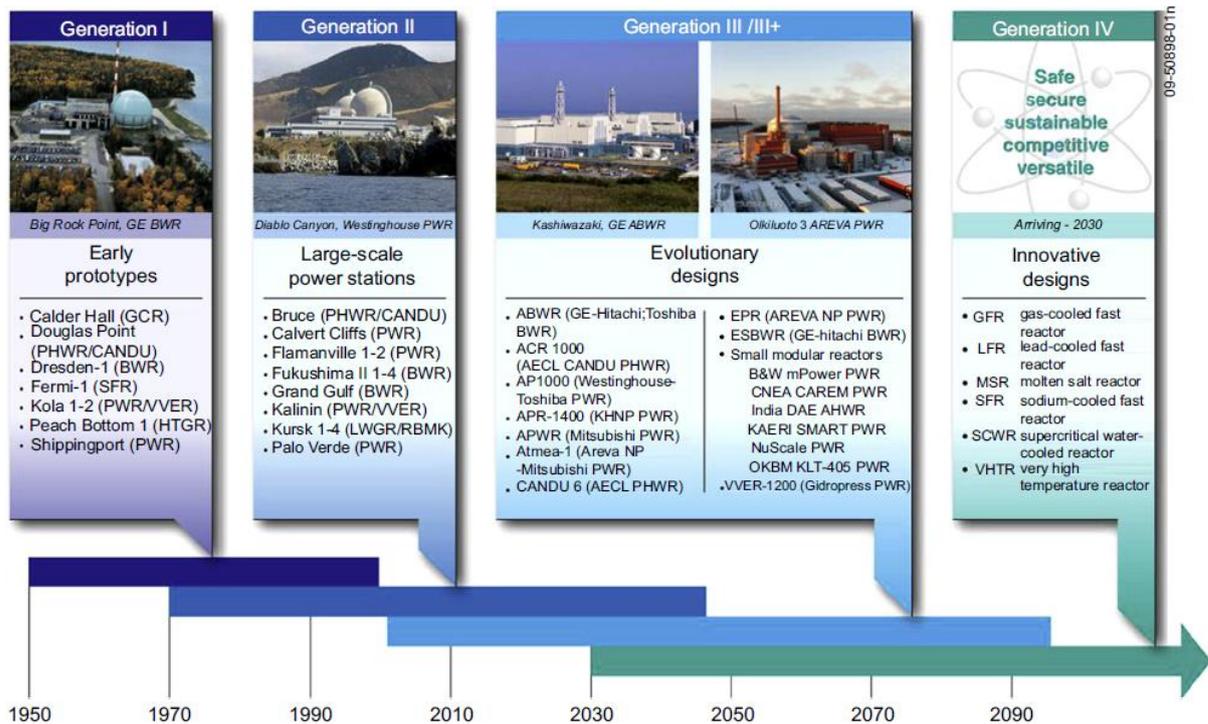
mesmo ano em que o Presidente Vargas se suicida. Ainda no mesmo ano, o primeiro submarino de propulsão nuclear, o USS Nautilus, adotando a tecnologia de reatores nucleares PWR, é lançado ao mar (CAMARGO, 2006; ROCHA FILHO, 2004). O quadro 2.9 e a figura 2.6 resumem as principais características dos reatores de cada geração:

**Quadro 2.9 – Principais características dos reatores de cada geração.**

GEN	Período de Desenvolvimento	Principais Reatores	Aplicação
I	Décadas 1950 e 1960	Shippingport, Dresden, Fermi I, Magnox	Primeiros protótipos. Modelos únicos. “Tentativa e erro”. Primeiros conceitos.
II	Décadas 1970 a 1990	LWR (BWR e PWR), CANDU, RMBK / VVER	Primeiros reatores comerciais. Muitos com vida útil estendida permanecem em operação.
III / III+	Final dos anos 1980 em diante	APWR, ABWR, VVER-1200, AP600/1000, GT-MHR, PBMR	Projetos avançados e de concepção evolutiva, estimulados pelos acidentes de Three Miles Islands – TMI (1979) e Chernobyl (1986).
IV	Pesquisa a partir do início dos anos 2000; previsão para 2030 (?)	VHTR, GFR, SFR, LFR, MSR, SCWR	Conceitos inovadores sustentáveis, econômicos, seguros e confiáveis, resistentes à proliferação e com maior proteção física.

Fonte: Adaptado de Comsan (2007) e GIF (2019).

**Figura 2.6 – As 4-5 Gerações de Reatores**



Fonte: GIF (2019).

Nesse trabalho, os reatores de pesquisa, propulsão naval, modulares e outros para fins específicos não serão explorados sendo citados ocasionalmente, uma vez que o escopo se conecta intrinsecamente a grandes reatores de potência pertencentes a centrais nucleares voltados para geração nucleoeleétrica.

#### **2.4.1. Os Reatores Nucleares de 1ª Geração – Geração I (GEN I)**

O crescimento do fascismo e do nazismo na Europa às vésperas da Segunda Guerra Mundial provocou uma verdadeira “fuga de cérebros”. Enrico Fermi, ao receber o Prêmio Nobel na Suécia em 1938, tinha saído da Itália decidido a nunca mais voltar. Seu destino final: Estados Unidos. Já em solo americano, fora convidado a se unir ao Projeto Manhattan, se tornando uma liderança na equipe que gerou o primeiro reator nuclear de 1ª geração “tipo pilha”. Dois meses e meio depois de alcançar a criticidade em dezembro de 1942, o CP-01 foi desmontado em 1943, refinado e modificado para tornar-se o CP-02 – Chicago Pile No. 2, consideravelmente maior que o seu antecessor, desta vez construído no Laboratório Nacional Argonne – Argonne National Lab (ANL). O CP-03 foi o primeiro reator moderado a água pesada, construído também em 1943, próximo ao CP-02 e atingiu a criticalidade em 1944. Foi idealizado como uma possível opção para produção de plutônio, caso o reator de Hanford não produzisse em quantidade satisfatória. Começou operando com urânio natural, tendo depois operado com urânio enriquecido, cuja tecnologia foi compartilhada com o Canadá, de onde saíram os projetos dos reatores canadenses NRX (1947) e os da linha CANDU. Em 1954, tanto o CP-02 quanto o CP-03 foram desligados; em 1956, todo o urânio, o grafite e a água pesada foram retirados destes dois reatores e o restante foi enterrado (ANL, 2019).

Efetivamente, pouco se menciona a decisão do Canadá de aderir à tecnologia nuclear em 17 de agosto de 1942. O Canadá entrou em acordo com o Reino Unido e adaptou o Montreal Laboratory (depois Chalk River Laboratory) para receber equipamentos de Cambridge e participar do Projeto Manhattan. A empresa Eldorado Gold Mining Company extraiu urânio canadense, que foi beneficiado junto com minérios de urânio oriundos de várias partes do mundo, em especial do Congo belga. Em setembro de 1945, cientistas britânicos, franceses e canadenses testaram o reator protótipo ZEEP – Zero Energy Experimental Pile para provar que urânio natural e água pesada poderiam produzir criticalidade, viabilizando um reator para produção de plutônio. Foi o primeiro reator nuclear a atingir a criticalidade fora do território estadunidense. O reator canadense NRX (1947) e o francês ZOÉ (1948) são derivados desta parceria. O reator NRX foi a base da bem-sucedida linha de reatores CANDU – CANada

Deuterium Uranium, um acrônimo onde deutério – D<sub>2</sub>O é o mesmo que água pesada (CNSC, 2012).

Em fevereiro de 1943, uma planta-piloto para produção de plutônio começou a ser construída em Oak Ridge na fábrica X-10 pela Argonne, bem maior que o CP-01. O reator Clinton atingiu a criticalidade em novembro de 1943 e, em abril de 1944, os primeiros lotes de 0,5 g de plutônio produzido começaram a ser enviados a Los Alamos, onde estavam sendo construídos os dois modelos do dispositivo. Mas o reator Clinton era refrigerado a ar e, para a produção de maiores quantidades de plutônio, seria necessário um modelo que fosse refrigerado a água. Assim sendo, a empresa DuPont foi contratada e recebeu autorização para projetar e construir uma grande planta em Hanford, Washington, para produção de plutônio, baseada nas experiências do CP-01 e do Clinton. Em 27 de setembro de 1944 o reator B construído em Hanford atingiu a criticalidade, utilizando urânio metálico oriundo do Canadá e grafite de alta pureza como moderador. O 1º lote de plutônio do reator B chegou a Los Alamos em fevereiro de 1945. Desde então, Hanford se tornou sua única fonte, praticamente produzindo todo o plutônio dos EUA durante a Segunda Guerra Mundial.

No imediato pós-guerra, reatores nucleares como o Clinton da usina X-10 receberam novas atribuições científicas e tecnológicas:

A usina X-10 (que, em 1948, ficou conhecida como Laboratório Nacional de Oak Ridge) começou a ampliar seu papel na pesquisa científica, notavelmente no campo dos radioisótopos. Em 2 de agosto de 1946, foi realizada uma cerimônia no reator de grafite de Oak Ridge em homenagem à remessa de um milicurie de carbono-14 de Oak Ridge para o Hospital do Câncer e da Pele Barnard Free, em St. Louis, no Missouri. Foi a primeira remessa de um radioisótopo para fins médicos.

Um dia antes, em 1º de agosto de 1946, o presidente Truman assinou o Ato de Energia Atômica, que descrevia o desenvolvimento e o regulamento do uso militar e civil de matéria nuclear e colocava sob o controle do governo o material fissil. “É razoável prever, no entanto”, dizia, “que o aproveitamento dessa nova fonte de energia provocará profundas mudanças em nosso modo de vida atual.” Esse ato também significava que uma nova comissão civil estava assumindo o Distrito de Engenharia de Manhattan, uma mudança que entrou oficialmente em vigor em 1º de janeiro de 1947 (KIERNAN, 2015, p.296).

Em 1946, o Instituto Kurchatov, fundado três anos antes em Moscou, obteve a criticalidade da sua versão do CP-01, o F-1. A URSS, com a ajuda de seus espões, desenvolveu logo cedo sua tecnologia de reatores nucleares, diferentemente da temida Alemanha. Embora os cientistas alemães Werner Heisenberg (1901-1976) e Walther Bothe (1891-1957) tivessem o *background* técnico necessário para projetar e construir um reator nuclear durante a Segunda Guerra havia certas limitações tecnológicas, como a obtenção de grafite de alta pureza e as restrições de acesso à água pesada, apesar da proximidade da produção norueguesa. Com tais impeditivos determinantes, a Alemanha não chegou a produzir nenhum plutônio durante a

Segunda Guerra nem em escala de laboratório, basicamente porque não possuíam cíclotrons; portanto, não puderam acompanhar o desenvolvimento científico envolvendo elementos transurânicos. Ainda, apesar de possuírem grande quantidade de minério de urânio (pechblenda), não dispunham da tecnologia para a separação isotópica. Houve algumas tentativas de se construir reatores nucleares, mas sem êxito. Na verdade, a Alemanha jamais teve a mais remota chance de construir uma bomba de urânio enriquecido ou de plutônio. (BERNSTEIN, 2007; CASSIDY, 2009; VON SCHIRACH, 2014).

Os reatores de primeira geração foram resultado da criatividade e engenhosidade dos cientistas de toda uma geração. Logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, vários conceitos surgiram e foram testadas diversas combinações de combustível, moderador, refrigerante etc. O intervalo entre o projeto, a construção e a operação eram relativamente curtos, pois havia baixa regulamentação e forte apoio governamental. Um protótipo levava ao seguinte e muitas vezes a escala aumentava drasticamente, sem tempo para correção dos erros – problemas de segurança eram solucionados à medida que apareciam. Enquanto a indústria buscava se estabelecer, não havia padronização. E havia um elevado nível de aceitação do público. Em geral, costuma-se classificar como de reatores nucleares de primeira geração aqueles que foram construídos entre até meados de 1970, com potência elétrica líquida entre 50 e 500 MWe. Os reatores de primeira geração relacionados no quadro 2.10 são algumas das principais referências desse período e, em sua grande maioria, utilizavam urânio natural como combustível, pois urânio enriquecido estava restrito a propósitos militares.

**Quadro 2.10 – Principais Referências de Reatores de Primeira Geração**

<b>Critica- lidade</b>	<b>Reator</b>	<b>Localidade</b>	<b>País</b>	<b>Capacidade (Líqu./Térm.)</b>	<b>Observações</b>
1951	EBR-1 (CP-04)	Idaho	EUA	150 kWe / 1400 kWt	Rápido, “breeder”, sódio (metal líq.), 50 kg de urânio altamente enriquecido
1954	LWGR Obninsk APS-1 – Atom Mirny (AM-1)	Obninsk	“URSS”	< 5 MWe / 30 MWt	Água leve e grafite
1954	USS Nautilus PWR (Submarino)	-	EUA	10 MWe	Água leve pressurizada, urânio enriquecido
1955	BORAX III	Idaho	EUA	2.000 MW	Água pesada
1956	GCR – Magnox Calder Hall (Proto-AGR)	Sellafield, Windscale	Reino Unido	35 MWe / 268 MWt	CO <sub>2</sub> (gás) e grafite, urânio natural, produziu plutônio para fins militares
1957	PWR – Westinghouse	Shippingport	EUA	60 MWe / 236 MWt	Água leve pressurizada, mistura urânio natural/HEU

1958	UNGG / GCR – G2 – Marcoule	Marcoule	França	36 MWe / 260 MWt	CO <sub>2</sub> (gás) e grafite, urânio natural, produziu plutônio para fins militares
1959	BWR – GE – Dresden I	Morris, Illinois, Dresden	EUA	192 MWe / 700 MWt	Água fervente.
1962	GCR – Windscale AGR	Windscale	Reino Unido	32 MWe / 120 MWt	Urânio enriquecido, resfriado à gás
1962	PHWR – CANDU – Rolphton NPD	Rolphton, Ontario	Canadá	17 MWe / 92 MWt	Água pesada pressurizada, urânio natural
1963	UNGG / GCR – Chinon A1 – EDF	Chinon	França	68 MWe / 300 MWt	CO <sub>2</sub> (gás), grafite, urânio natural
1963	RBMK (submarino / navio)	-	“URSS”	100 MWe	Água fervente, grafite, Urânio enriquecido 1,8%
1963	VVER V-210 – Novovoronezh-1	Voronezh	“URSS”	197 MWe / 760 MWt	PWR soviético
1963	FBR – Enrico Fermi Fermi I	Lagoona Beach, Michigan	EUA	65 MWe / 200 MWt	Rápido, “breeder”, sódio (metal líquido)
1963	PHWR – Agesta – R3	Agesta, Farsta, Estocolmo	Suécia	9 MWe / 80 MWt	Água pesada pressurizada, urânio natural
1966	HTGR – AVR Juelich Pebble bed reactor	Juelich (Jülich)	Alemanha	13 MWe / 46 MWt	Reator nuclear com leito de esferas de grafite, resfriado com gás hélio a 700-950 °C
1969	FBR – BOR-60	Dimitrovgrad	“URSS”	12 MWe / 60 MWt	“breeder”, resfriado a sódio, pesquisa, UO <sub>2</sub> –PuO <sub>2</sub> , urânio enriquecido a 45-90%
1972	FBR – BN-350 – Aktau	Mangystau, Cazaquistão	“URSS”	135 MWe / 1.000 MWt	“breeder”, resfriado a sódio, urânio enriquecido, dessalinização
1973	LWGR – EGP-6 – Bilibino 1	Bilibino	“URSS”	11 MWe / 62 MWt	LWGR – Mesmo modelo que Chernobyl
1973	FBR – PHENIX – PH-250	Marcoule	França	233 MWe / 345 MWt	“breeder”, sódio (metal líq.) urânio enriquecido ou plutônio
1977	FBR – Joyo	Ibaraki	Japão	50-75 MWt	“breeder”, sódio, MOX com urânio enriquecido a 18%.

Fonte: Elaboração própria (vide Referências).

O desenvolvimento da tecnologia dos reatores de água leve – LWR (Light Water Reactor) originou-se do programa militar para propulsão naval nuclear a partir de 1948, quando Oak Ridge transferiu seus estudos preliminares para o ANL. O STR – Submarine Thermal Reactor utilizado pelo primeiro submarino de propulsão nuclear – *Nautilus I*, lançado ao mar em 21 de janeiro de 1954, é resultado dos esforços tecnológicos do Argonne Lab e da Westinghouse. A Westinghouse foi a responsável pelo desenvolvimento tecnológico do reator para geração nucleoeétrica mais utilizado no mundo: o PWR – Pressurized Water Reactor, reator de água leve pressurizada. Já o BWR – Boiling Water Reactor, modelo desenvolvido pela General Electric – GE, representa outra opção tecnológica de LWR, cujo conceito remonta

à linha de reatores BORAX – Boiling Water Reactor Experiment (No. 1 a 5), desenvolvida pela Argonne (ANL, 2019). Entre 1953 e 1955, cinco reatores moderados a água pesada foram construídos na Carolina do Sul, em Savannah River Site e, até 1963, nove reatores para produção de plutônio tinham sido construídos pela DuPont (BERNSTEIN, 2007; DOE, 1982; KIERNAN, 2015).

Os principais países que estabeleceram os primeiros Programas Nucleares com Fins Pacíficos para a produção de energia elétrica foram exatamente aqueles que, gradativamente, também efetuaram testes nucleares e que compõem hoje o Clube Atômico: Estados Unidos, Reino Unido, França e a ex-URSS (posteriormente China). Canadá, Suécia, Japão e Alemanha também são países pioneiros na tecnologia nuclear. Os reatores desenvolvidos nessa época foram basicamente protótipos ou equipamentos para comprovação da viabilidade de um conceito tecnológico – o que justifica o intervalo de baixa potência (5 – 500 MWe). A equipe de cientistas franceses liderada por Frédéric Joliot-Curie obteve a criticalidade do ZOÉ – *la première pile atomique française*<sup>67</sup> em 15 de dezembro de 1948. A data de 20 de dezembro de 1951 marca o registro da primeira vez em que a energia elétrica proveniente de um reator nuclear acendeu uma lâmpada – na verdade quatro. O EBR I – *Experimental Breeder Reactor-I* (originalmente CP-04) do Laboratório Argonne em Idaho, EUA, pode ser considerado o primeiro reator nuclear (e “breeder”) de 1ª geração. Entretanto, em termos comerciais, o primeiro reator nuclear a ser conectado a uma rede elétrica foi o da cidade de Obninsk, na antiga URSS. Com 5 MWe, o reator atingiu a criticalidade em cinco de maio de 1954; foi conectado à rede em 26 de junho e tornou-se comercialmente operacional em 30 de novembro, sendo desligado permanentemente somente em 28 de abril de 2002. Era um Reator de Água Leve e Grafite – LWGR, modelo AM-1<sup>68</sup>.

Em 1955, em plena Guerra Fria e como resposta ao reator soviético, o BORAX III da Argonne entrou em operação fornecendo 2.000 W para cidade de Arco, estado de Idaho, EUA; foi a primeira cidade a ser inteiramente atendida pela energia nucleoeleétrica, e assim vem sendo desde então. Em 1956, a Rainha Elizabeth II inaugurou a primeira central nucleoeleétrica com escala industrial em Calder Hall, no Reino Unido, com o reator nuclear comercial denominado Magnox<sup>69</sup> por razões técnicas. Este modelo de 50 MWe tinha um duplo propósito inicial: gerar energia elétrica para fins pacíficos e produzir plutônio com destinação militar. O reator teve

---

<sup>67</sup>ZOÉ – *pour puissance Zéro, Oxide d’uranium et Eau lourde*, é o nome do primeiro reator francês tipo “pilha” como o CP01, cujo acrônimo significa “para potência zero, óxido de urânio e água pesada”.

<sup>68</sup>LWGR – *Light Water Graphite Reactor*; AM-1 de *Атом Мирный* ou *Atom Mirny*, em russo “Átomos para a Paz”; também chamado de APS-1 Obninsk, *Atomic Power Station 1 Obninsk*.

<sup>69</sup>Magnox vem de *magnesium non-oxidising*, liga utilizada para cobrir o urânio natural combustível.

uma vida útil de 47 anos, tendo sido desligado definitivamente em 2003. Foi o primeiro reator refrigerado a gás carbônico GCR<sup>70</sup>. Em meados da década de 1950, a URSS colaborou para que a China treinasse estudantes e construísse um reator e uma planta de difusão gasosa para separar isótopos de urânio. A China começou a produzir plutônio em 1960 (ANL, 2019; HAROLDSEN, 2008; IAEA, 2004; 2012; WNA, 2019).

### Quadro 2.11 – Reactores de Primeira Geração de Água Leve (LWR) Produzidos pelo Laboratório Nacional Argonne<sup>71</sup>.

Reator	Observações
ZPR-1 (Zero Power Reactor 1)	Reator de Pesquisa para propulsão naval.
STR (Submarine Thermal Reactor)	Reator para propulsão naval do submarino USS Nautilus, lançado ao mar em 21 de janeiro de 1954, desenvolvido com a Westinghouse.
BORAX-I (Boiling Water Reactor Experiment No. 1)	BWR para pesquisa construído em 1953 e destruído em 1954.
BORAX-II (Boiling Water Reactor Experiment No. 2)	BWR para pesquisa construído em 1954 para repor o BORAX-I. Testes com urânio enriquecido em vários percentuais e sob pressão de 300 psi, aprox. 20,4 atm / 20,6 bar.
BORAX-III (Boiling Water Reactor Experiment No. 3)	BWR construído em 1955 para abastecer a cidade de Arco, no estado de Idaho, EUA. Gerou 2.000 W (500 W para a cidade) até 1956.
BORAX IV (Boiling Water Reactor Experiment No. 4)	BWR sucessor do BORAX III. Início da operação em 1956, com 20 MWt (2,5 MW de eletricidade), operando à pressão atmosférica. Em 1957, passou a operar a 300 psi, até 1958. Realizou teste com cerâmicas de urânio e <b>tório, produzindo <sup>233</sup>U a partir do <sup>232</sup>Th.</b>
BORAX-V (Boiling Water Reactor Experiment No. 5)	BWR que operou a partir de 1958. De 1962 a 1964, operou com sistema suplementar de superaquecimento. 489 °F (253,94 °C) no núcleo e 850 °F (454,4 °C) no vapor seco, a 300 psi.
EBWR (Experimental Boiling Water Reactor) ou CP-07	Planta experimental construída em 1952, que operou até 1967, com um núcleo de plutônio.
ALPR (Argonne Low Power Reactor, or Stationary Low-Power Reactor)	Projetado em 1954-1955 para fornecer energia (3 MWt, 200-400 kW de calor ambiente, operando a 300 psi e com <sup>235</sup> U 90% enriquecido numa liga de U-Al) em estações de radar localizadas áreas remotas no Ártico. Destruído em um acidente em 1961.

Fonte: Argonne National Laboratory (2019).

Disponível em: <<https://www.ne.anl.gov/About/reactors/lwr3.shtml>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

#### 2.4.2. Os Reactores Nucleares de 2ª Geração – Geração II (GEN II)

Os conceitos gerados em inúmeros protótipos foram dando subsídios para determinadas escolhas tecnológicas. A água como elemento moderador e refrigerante tornou-se a base da segunda geração de reatores nucleares, que passou a ser comercializada internacionalmente. A

<sup>70</sup>GCR – Gas Cooled-Reactor.

<sup>71</sup> O Laboratório Argonne construiu ainda os seguintes reatores de pesquisa: MTR – Materials Testing Reactor (1952), ASTR – Argonne Thermal Source Reactor ou ZPR-4 – Zero Power Reactor-4 (1953); AFSR – Argonne Fast Source Reactor (1958), Juggernaut (1962) e Janus (1960). Também construiu protótipos a água pesada e grafite, e reatores rápidos (ANL, 2019).

partir da década de 1970, a busca pela competitividade da energia nuclear em relação ao combustível fóssil, principalmente após os dois choques do petróleo – 1973 e 1979 – promoveram um *boom* na construção de usinas nucleares pelo mundo. A 2ª Geração de reatores ainda é responsável por grande parte das plantas nucleares em operação, principalmente aqueles que obtiveram licença para renovar o período de operação. Este é o caso de Angra I, que está se preparando para pleitear extensão de vida útil. Uma característica importante dos reatores GEN II é o sistema de segurança ativo, que envolve comando e operação mecânica ou elétrica por controle humano, e que só pode operar enquanto houver disponibilidade de energia elétrica. Muitos sistemas passaram por melhorias tecnológicas, incorporando sistemas passivos de segurança e mecanismos para minimizar o impacto de acidentes. Os quadros 2.12 a 2.14 apresentam os modelos de reatores nucleares em 1982, segundo a IAEA:

**Quadro 2.12 – Sistemas de Reatores Nucleares Comprovados e Disponíveis Comercialmente para Exportação (ref.: 01/01/1982).**

Sigla	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Em Operação	% em 1982	Em Construção
PWR	<i>Pressurized light-water-moderated and cooled reactors.</i>	Reatores refrigerados e moderados à água leve pressurizada.	122	57%	145
BWR	<i>Boiling light-water-cooled and moderated reactors.</i>	Reatores moderados e refrigerados à água leve fervente.	62	25%	50
PHWR	<i>Pressurized heavy-water-moderated and cooled reactors.</i>	Reatores refrigerados e moderados à água pesada pressurizada.	15	4%	22
<b>% do Total das Plantas em Operação em 1982</b>			<b>199</b>	<b>86%</b>	<b>217</b>

Fonte: IAEA (1982).

O conceito PWR, uma tecnologia originalmente estadunidense (derivados dos sistemas de 1ª geração STR – Nautilus / Shippingport), foi replicado em outros países e possui diversas nomenclaturas: A linha VVER designa os PWR russos, assim como a linha CPR dos chineses. Depois dos modelos VVER-210 e VVER-365, de primeira geração, o VVER-440 foi o primeiro PWR russo de 2ª geração adotado em países como Armênia, Eslováquia, Hungria, Bulgária e Finlândia. No quadro 2.12, percebe-se nitidamente a preferência por essa tecnologia, tanto na quantidade de plantas operacionais quanto nas unidades em construção. Reportando-nos à decisão do governo brasileiro em optar por essa mesma tecnologia para Angra I e, posteriormente, para Angra II e III, verificamos que o País seguiu a tendência dominante à época. Os países exportadores eram a França, a Alemanha Ocidental, os EUA e a “URSS”. Como tecnologia alternativa aos PWR e de funcionamento similar, os BWR foram reatores desenvolvidos e exportados pelos EUA, Suécia e Alemanha Ocidental. Tanto os reatores PWR

e BWR empregam urânio levemente enriquecido, ao passo que os reatores PHWR empregam o urânio natural. O Canadá, com o CANDU, e o modelo Atucha da Alemanha Ocidental foram os principais representantes. Diferentemente do Brasil, a Argentina optou por reatores Atucha, o primeiro operando desde 1974. A Índia baseou-se no modelo CANDU para desenvolver seus próprios reatores.

**Quadro 2.13 – Outros Sistemas de Geração Nucleoelétrica Plenamente Desenvolvidos (ref.: 01/01/1982)**

Sigla	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Em Operação	% em 1982	Em Construção
LWGR	<i>Light-water-cooled, graphite moderated reactors.</i>	Reatores moderados a grafite e resfriados à água leve.	35	6%	-
GCR	<i>Gas-cooled, graphite moderated reactors.</i>	Reatores moderados à grafite e resfriados a gás.	5	5%	9
AGR	<i>Advanced gas-cooled, graphite moderated reactors.</i>	Reatores avançados moderados à grafite e resfriados a gás.	21	2%	8
<b>% do Total das Plantas em Operação em 1982</b>			<b>61</b>	<b>13%</b>	<b>17</b>

Fonte: IAEA (1982).

Os reatores GCR são conhecidos também como sistemas Magnox, desenvolvidos e exportados pela França e pelo Reino Unido (derivados do Marcoule G2 e do Calder Hall de Windscale), utilizam como combustível o urânio natural. A tecnologia AGR pode ser considerada uma inovação incremental britânica derivada do GCR, utilizando urânio levemente enriquecido, assim como os reatores LWGR soviéticos (derivados do Obninsk APS-1). Tanto os AGR quanto os LWGR não estavam disponíveis para exportação em 1982.

No quadro 2.14, temos modelos capazes de gerar energia, mas sem competitividade comercial, não sendo oferecidos para exportação. Em 1982, havia muita expectativa no avanço tecnológico dos reatores FBR e HTR. Os modelos FBR de 1982 utilizam o sódio líquido como refrigerante e o plutônio como combustível, por esse motivo sendo também conhecidos como LMFBR. Havia em 1982 protótipos operando na França, Alemanha Ocidental, Japão, Reino Unido e “URSS”, e o modelo *Superphénix* francês estava em construção. Pode-se considerar o HTGR como um modelo evolutivo oriundo das tecnologias GCR e AGR, no qual se substituiu o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) pelo gás hélio (He) como refrigerante. EUA, Alemanha Ocidental e Reino Unido são os países que investiram nessa tecnologia, com destaque para o Projeto do Reator Dragon, da Comunidade Europeia. O Reino Unido testou um modelo de SGHWR, que viria a abandonar em 1990. O Canadá e o Japão, por sua vez, testaram um modelo HWLWR cada um, desligando-os definitivamente em 1977 (Canadá) e 2003 (Japão). Três modelos de HWGCR

foram testados: pela Alemanha Ocidental até 1974; pela Eslováquia (“Tchecoslováquia” à época), até 1977; e pela França, até 1985.

**Quadro 2.14 – Sistemas de Reatores Nucleares Avançados ou Parcialmente Desenvolvidos (ref.: 01/01/1982)**

Sigla	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Em Operação	% em 1982	Em Construção
FBR ou LMFBFR	<i>Fast breeder reactors or Liquid Metal Fast Breeder Reactor</i>	Reatores regeneradores / procriadores rápidos (resfriados por metal líquido)	5	0,7%	3
HTGR	<i>High-temperature gas-cooled, graphite moderated reactor.</i>	Reatores à alta temperatura moderados à grafite, resfriados a gás.	2	0,2%	1
HWLWR + SGHWR	<i>Heavy-water-moderated, light-water-cooled reactors / Steam-generating heavy-water reactors.</i>	Reatores resfriados à água leve, moderados à água pesada / Reatores geradores de vapor à água pesada	3	0,3%	1
HWGCR	<i>Heavy-water-moderated, gas-cooled, reactors.</i>	Reatores resfriados à gás, moderados à água pesada.	1	0,1%	-
<b>% do Total das Plantas em Operação em 1982</b>			<b>11</b>	<b>1%</b>	

Fonte: IAEA (1982).

O status do desenvolvimento nuclear dos reatores de tecnologia de segunda geração mostra o pioneirismo de cinco países/comunidades: Canadá, França, Reino Unido, EUA e “URSS”:

Com relação à introdução da energia nuclear em um país, a experiência tem mostrado que apenas cinco países (Canadá, França, Reino Unido, EUA e URSS) desenvolveram domesticamente seu primeiro projeto de energia nuclear.

[...]

Os outros 25 países que introduziram a energia nuclear até agora importaram seu primeiro projeto. Posteriormente, alguns deles desenvolveram sua própria capacidade ao ponto de se tornarem independentes (Alemanha Ocidental, Índia, Japão, Suécia), enquanto outros aumentaram a participação nacional em graus diferentes, conforme os objetivos e capacidades internas<sup>72</sup>.

### 2.4.3. Os Reatores Nucleares de 3ª Geração – Geração III / III+ (GEN III / III+)

A terceira geração representa a “era da otimização” dos modelos da Geração II, carregando a responsabilidade de elevar a tecnologia dos reatores nucleares para um novo patamar, no qual a segurança ganha destaque (CEA, 2016). Os eventos de Three Miles Island

<sup>72</sup> Regarding the introduction of nuclear power in a country, experience has shown that only five countries (Canada, France, United Kingdom, USA and USSR) have developed domestically their first nuclear power project. [...]. The other 25 countries that have introduced nuclear power up to now acquired their first nuclear power plant from abroad. Some of them later developed their own nuclear power capability to the point where they no longer depend on foreign supply (Federal Republic of Germany, India, Japan, Sweden), while the others have increased their national participation to different degrees according to their national aims and capabilities.

– TMI (1979), Chernobyl (1986) e o atentado nos EUA 9/11 (2001)<sup>73</sup> trouxeram complexos desafios, exigindo projetos mais simples e robustos, mais fáceis de operar e menos vulneráveis a falhas e imprevistos operacionais, com menores riscos ao meio-ambiente.

### Quadro 2.15 – Reatores Nucleares de 3ª Geração:

Sigla	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Exemplos de Reatores em Operação Comercial
ABWR	<i>Advanced Boiling Water Reactor</i>	Reator avançado de água fervente	Kashiwazaki-Kariwa-6 e 7, Japão, 1996-7 Hamaoka-5, Japão, 2005 Shika-2, Japão, 2006
APWR	<i>Advanced Pressurized Water Reactor</i>	Reator avançado de água pressurizada	AP600. Não houve encomenda.
ACPR – ACPR-1000	<i>Advanced China Pressurized Reactor</i>	Reator avançado chinês (de água) pressurizada	Yangjiang-5 e 6, China, 2018-9
APHWR – CANDU6 – EC6	<i>Enhanced CANDU 6</i>	CANDU 6 aprimorado/melhorado	Cernavoda 1 e 2, Romênia, 1996, 2007 Qinshan 3-1 e 3-2, China, 2002-3
VVER-1000 – V-428(M), V-412, V-466	<i>Water-Water Energy Reactor</i>	Reator de Energia Água-Água	Tianwan 1 a 4, China, 2007-18 Kundakulam 1 e 2, Índia, 2014-7 Bushehr 1, Irã, 2013
AHWR – AHWR300- LEU	<i>Advanced Heavy Water Reactor</i>	Reator avançado de água pesada	Bhabha Atomic Research Centre (BARC) Mumbai, Trombay, Índia, com combustível LEU-Th MOX. Somente protótipo.

Fonte: IAEA e NEA/OECD.

Incorporam melhorias “evolucionárias” na tecnologia de combustível, na eficiência térmica, nos sistemas passivos de segurança e na padronização, visando redução de custos de capital e de manutenção, além da diminuição do tempo de construção. Consequentemente, o horizonte de operação se estende de 20-40 anos para 50-60 anos, sendo economicamente mais competitivos.

A usina japonesa Kashiwazaki-Kariwa-6 foi, em 1996, a primeira usina do mundo a operar comercialmente com um reator evolucionário de 3ª geração, um ABWR com 1.315 MWe (líquido) e 3.926 MWt<sup>74</sup>. No ano seguinte, a Kashiwazaki-Kariwa-7, de mesma capacidade, também entrou em operação. O AP600 foi um modelo de PWR avançado – APWR, cujos sistemas de segurança incorporavam as lições aprendidas com o acidente de TMI<sup>75</sup>. Como

<sup>73</sup> *Three Miles Island* e *Chernobyl* representam os clássicos exemplos de acidentes nucleares no período em questão, predecessores do de *Fukushima* (2011). O ataque às torres gêmeas de 2001 (9/11) levantou a discussão sobre um possível ataque aéreo terrorista sobre centrais nucleares e suas consequências. Disponível em: < [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2001/011101\\_nuclear1.shtml](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2001/011101_nuclear1.shtml)>. Acesso em: 22 set. 2019.

<sup>74</sup> Disponível em: < <https://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/KASHIWAZAKI%20KARIWA-6>> e < <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=383>>. Acesso em: 22 set. 2019.

<sup>75</sup> Detalhes podem ser encontrados em: *Westinghouse AP600 Advanced Nuclear Plant Design*. Disponível em: < [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/31/007/31007051.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/007/31007051.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2019.

o modelo era de apenas 600 MWe e não recebeu nenhuma encomenda, a Westinghouse aumentou a capacidade e desenvolveu a versão “plus” AP1000. Os ACPR-1000/HPR-1000, o APR-1400 e o VVER-1000 são as versões chinesas, sul-coreana e russa, respectivamente, do APWR. A versão III+ do CANDU (PHWR avançado) é o ACR-1000. Já o HC-BWR – High Conversion BWR (Alta Conversão), o SWR-1000 (“Siedewasserreaktor” = BWR em alemão), assim como o ESBWR – Economical Simplified BWR, uma versão econômica e simplificada, são conceitos concorrentes competindo neste mercado. O AHWR pertence à fase final do Programa Nuclear Indiano de Três Estágios/Etapas. O AHWR300-LEU opera com urânio enriquecido a 19,75% e ThO<sub>2</sub> (óxido de tório), utilizando o Ciclo de Combustível do Tório.

**Quadro 2.16 – Reatores Nucleares de 3ª Geração Plus (GEN III+):**

<b>Sigla</b>	<b>Descrição em Inglês</b>	<b>Descrição em Português</b>	<b>Ex. de Reatores em Construção / Operação Comercial</b>
EPR – EPR-1750	<i>European Pressurized Reactor</i>	Reator avançado de água fervente	Taishan-1 e 2, China, 2018-(?) Olkiluoto-3, Finlândia, (?) Flamanville-3, França, (?)
APWR – AP1000	<i>Advanced Pressurized Water Reactor</i>	Reator avançado de água pressurizada	Sanmen-1 e 2, China, 2018 Haiyang-1 e 2, China, 2018-9 Vogtle 3 e 4, EUA, (?)
APWR – ACPR-1000	<i>Advanced Pressurized Water Reactor</i>	Reator avançado de água pressurizada	Yangjiang-5 e 6, China, 2018-9
APWR – HPR-1000	<i>Advanced Pressurized Water Reactor</i>	Reator avançado de água pressurizada	Fangchenggang-3 e 4, China, (?)
APWR – APR-1400	<i>Advanced Pressurized Water Reactor</i>	Reator avançado de água pressurizada	Shin-Kori-3 e 4, Coreia (Sul), 2019 Shin-Kori-5 e 4, Coreia (Sul), (?) Shin-Hanul-1 e 2, Coreia (Sul), (?)
VVER-1200 – V-392M, V-491	<i>Water-Water Energy Reactor</i>	Reator de Energia Água-Água	Novovoronezh-2-1, Rússia, 2017 Leningrad-2-1, Rússia, 2018 Belarusian 1 e 2, Bielorrússia, (?)
ABWR II	<i>Advanced Light Water Reactor / Advanced Boiling Water Reactor</i>	Reator avançado de água fervente	Shimane-3, Japão, (?) Ohma-1, Japão, (?)

**Fonte:** IAEA e NEA/OECD.

Ao longo do desenvolvimento tecnológico das três primeiras gerações de reatores nucleares, muitos modelos foram testados para utilização do tório como combustível. Instalado em uma área densamente povoada 40 km ao norte de New York, o reator Indian Point I alcançou a criticidade em dois de agosto de 1962. Após um período utilizando tório como revestimento em alguns elementos combustíveis, optou-se por mudar do ciclo do combustível tório – CCT para o ciclo do combustível urânio por razões puramente econômicas<sup>76</sup> (IAEA, 1963).

<sup>76</sup> G. B. SCURICINI: *Can you tell me why you changed your plant over from a thorium to a uranium cycle? Is the reason purely economical or did you expect trouble from the use of thorium? Have you considered the cost penalties involved in changing the type of fuel?* W. BEATTIE: *The reason is purely economical and we did not expect to have any trouble with the thorium cycle* (IAEA, 1963).

**Quadro 2.17 – Exemplos de Pesquisa do Uso do Tório em Reatores de Potência**

País	Nome do Reator	Tipo	Potência (MW)	Início da Operação / Crítica-idade	Combustível	Observações
EUA	Indian Point I	PWR	265 MWe	1962	ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Potência inclui 104 MWe de um super aquecedor a óleo.
EUA	Elk River	BWR	22 MWe	1964	ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Potência inclui 5 MWe provenientes de super aquecedor a carvão. Tório carregado apenas no primeiro núcleo.
EUA	Shippingport	PWR	60 MWe	1957	ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	Usou U-235 e Pu como material físsil inicial. Demonstração bem-sucedida de “breeding” térmico usando o conceito “seed/blanket” (Th/U-233).
EUA	Peach Bottom	HTR	40 MWe	1967	ThC <sub>2</sub> -UC <sub>2</sub>	Partículas de combustível Th-HEU revestidas em blocos prismáticos de grafite.
EUA	Fort St. Vrain	HTR	330 MWe	1976	ThC <sub>2</sub> -UC <sub>2</sub>	Partículas de combustível Th-HEU revestidas em blocos prismáticos de grafite.
<b>EUA</b>	<b>MSRE</b>	<b>MSR</b>	<b>10 MWt</b>	<b>1965</b>	<b>ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub></b>	<b>Operou com U-233 desde out/1968. Sem produção de eletricidade</b>
RU	Dragon	HTR	20 MWt	1964	ThC <sub>2</sub> -UC <sub>2</sub>	Partículas de combustível revestidas. Sem produção de eletricidade. Muitos tipos de combustível irradiados.
Alema- nha	AVR	HTR	15 MWe	1967	ThC <sub>2</sub> -UC <sub>2</sub>	Partículas de combustível Th-HEU revestidas em esferas (pebbles). Máximo burn-up atingido: 150 GWd/t.
Alema- nha	THTR	HTR	300 MWe	1985	ThC <sub>2</sub> -UC <sub>2</sub>	Partículas de combustível Th-HEU revestidas em esferas (pebbles). Máximo burn-up atingido: 150 GWd/t.
Alema- nha	Lingen	BWR	60 MWe	1968	Th/Pu	Th/Pu foi carregado apenas em alguns testes de elemento-combustível.
Índia	Kakrapar (KAPS) 1-2	PHWR	200 MWe	Maió/1993 (1); Set/1995 (2)	UO <sub>2</sub> -ThO <sub>2</sub>	Feixe de 19 elementos-combustível com um total de 500 kg de Tório.
Índia	Kaiga 1-2	PHWR	200 MWe	2000-2003	UO <sub>2</sub> -ThO <sub>3</sub>	Feixe de 19 elementos-combustível. Tório utilizado apenas como retificador de energia.
Índia	Rajasthan (RAPS) 3-4	PHWR	200 MWe	2000	UO <sub>2</sub> - ThO <sub>4</sub>	Feixe de 19 elementos-combustível. Tório utilizado apenas como retificador de energia.
Índia	KAMINI	Fonte de Nêutrons	30 KWe	-	U-233	Reator experimental utilizado para radiografia com nêutrons

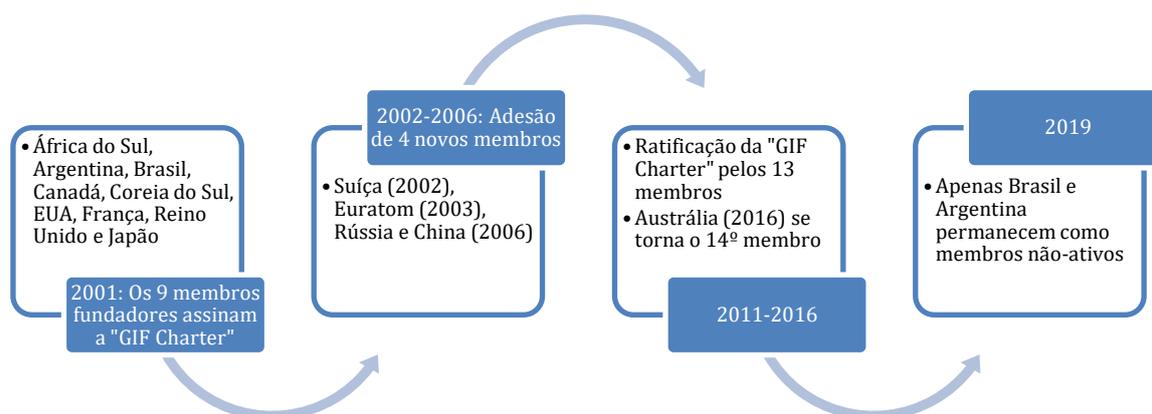
Fonte: Adaptado de Crossland (2012, p. 183)

No quadro 2.17, temos uma amostra dos modelos pesquisados em diversos países, assim como os compostos combustíveis à base de tório utilizados. O debate em torno do tório com o combustível para reatores de potência comerciais e da adoção do ciclo do combustível tório tomou um novo rumo a partir de meados do ano 2000, quando foi idealizado e formalizado o Fórum Internacional para Reatores de Quarta Geração – GIF.

#### 2.4.4. Os Reatores Nucleares de 4ª Geração – Geração IV (GEN IV)

O parque nuclear mundial executa três movimentos paralelamente: enquanto busca estender a vida útil de reatores de segunda geração, constrói plantas incorporando as tecnologias de terceira geração (Gen III/III+). O terceiro movimento envolve o Fórum Internacional de Quarta Geração – *Generation IV International Forum – GIF*. Similar à iniciativa estadunidense do Programa Átomos para a Paz de 1953, tal iniciativa almeja o desenvolvimento tecnológico cooperativo no âmbito internacional de seis conceitos de reatores nucleares de quarta geração, selecionados por especialistas dentre mais de cem propostas tecnológicas para desenvolvimento colaborativo (GIF, 2019; PIORO, 2016).

**Figura 2.7 – Histórico e Status dos Membros do GIF.**



**Fonte:** Adaptado do GIF (2019)

O compromisso de cada membro do GIF é o compartilhamento dos avanços tecnológicos. A NEA/OECD coordena o GIF e gere o repositório de conhecimentos acumulados. Após se tornar membro do GIF, o passo seguinte é a assinatura do Acordo-Quadro, explicitando as tecnologias que pretende desenvolver e compartilhar os avanços tecnológicos. Cada tecnologia apresenta distintamente suas vantagens e desafios tecnológicos. Há uma expectativa de que os primeiros

modelos comerciais estejam disponíveis a partir de 2030. De qualquer modo, são tecnologias para o futuro, que devem ser pensadas estrategicamente. Infelizmente, o Brasil optou por não assinar o Acordo-Quadro e, por este motivo, não participa desta oportunidade de compartilhamento de *expertise* na área nuclear (GIF, 2019). O quadro 2.18 sumariza os conceitos e os grupos/países empenhados na pesquisa.

**Quadro 2.18 – Tecnologias de Reatores GEN IV x Membros do GIF.**

Sigla	Descrição em Inglês	Descrição em Português	Países Pesquisando
VHTR	Very High Temperature Reactor	Reator de Temperatura Muito Alta	África do Sul, Canadá, China, Coreia do Sul, EUA, Euratom <sup>a</sup> , França, Suíça e Japão
SCWR	Supercritical Water-cooled Reactor	Reator Resfriado à Água Supercrítica	Canadá, Euratom, Rússia e Japão
MSR	Molten Salt Reactor	Reator à Sal Fundido	Euratom, França e Rússia
GFR	Gas-cooled Fast Reactor	Reator Rápido Resfriado à Gás	Euratom, França, Suíça e Japão
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor	Reator Rápido Resfriado à Sódio	China, Coreia do Sul, EUA, Euratom, França, Rússia e Japão
LFR	Lead-cooled Fast Reactor	Reator Rápido Resfriado à Chumbo	Euratom, Rússia e Japão

<sup>a</sup> Euratom – European Atomic Energy Community (Comunidade Europeia de Energia Atômica).

Fonte: Adaptado de GIF IV (2019).

Todas as tecnologias descritas no quadro 2.18 foram selecionadas de acordo com estritos critérios, conforme apresentado no quadro 2.19:

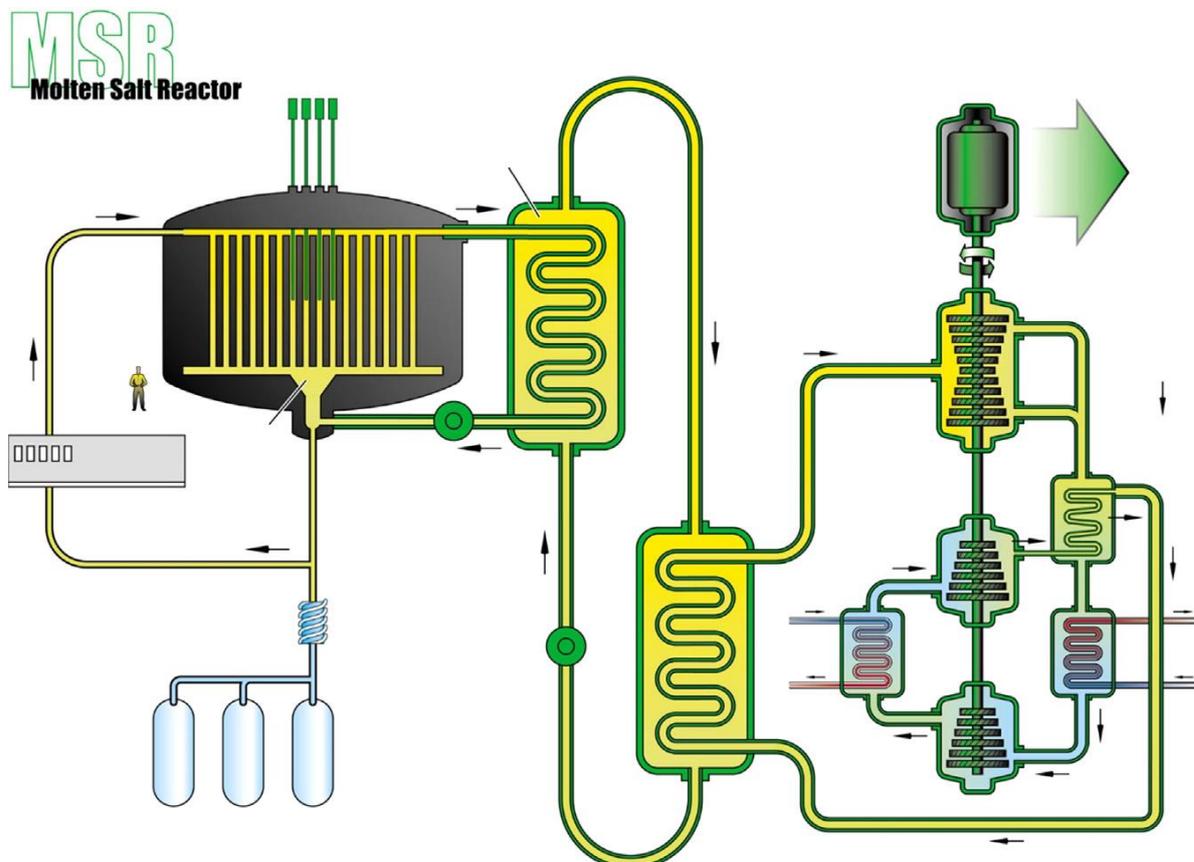
**Quadro 2.19 – Metas para os sistemas de energia nuclear de IV geração**

Metas para os sistemas de energia nuclear de IV geração	
Sustentabilidade-1	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV fornecerão geração de energia sustentável que irá de encontro às metas de ar limpo e proverá a disponibilidade no longo prazo de sistemas e a utilização de combustível efetiva para a produção de energia mundial.
Sustentabilidade-2	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV minimizarão e gerenciarão os rejeitos nucleares e notavelmente reduzirão a sobrecarga de gerenciamento no longo prazo, deste modo melhorando a proteção para a saúde pública e para o meio-ambiente.
Economia-1	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV terão uma clara vantagem no ciclo de vida perante outras fontes de energia.
Economia-2	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV terão um nível de risco financeiro comparável com outros projetos de energia.
Segurança e Confiabilidade-1	As operações dos sistemas de energia nuclear do GIF IV excederão em segurança e confiabilidade.
Segurança e Confiabilidade-2	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV terão uma probabilidade e um grau de danos do núcleo do reator muito baixos.
Segurança e Confiabilidade-3	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV eliminarão a necessidade de resposta emergencial externa.
Resistência à Proliferação e Proteção Física	Os sistemas de energia nuclear do GIF IV aumentarão a garantia que eles serão muito pouco atrativos e uma rota menos desejável para o desvio ou furto de materiais úteis para armas, e proverão crescente proteção física contra atos de terrorismo.

Fonte: Traduzido e adaptado de GIF (2019) e Piro (2016).

Ainda, dentre os conceitos de reatores nucleares encontra-se o Reator a Sal Fundido (Molten Salt Reactor – MSR), atualmente uma das tecnologias mais discutidas de reatores que podem utilizar o tório como combustível – “reatores de tório”, operando com o CCT.

**Figura 2.8 – Conceito do Molten Salt Reactor como Reatores de Quarta Geração.**



Fonte: Pioro (2016, p. 48).

Dois seminários *online* (*webinars*) realizados em 2017 pelo GIF IV colocaram em perspectiva as reais possibilidades tecnológicas do Ciclo do Combustível Tório e do Reator a Sal Fundido. Suas conclusões demonstram que a versão de reator de nêutrons rápidos (MSFR – Molten Fast Salt Reactor) como uma tecnologia tangível e promissora (MERLE, 2017). Críticas severas são mantidas com relação ao tório, devido aos desafios tecnológicos (MICHEL-SANDIS, 2017). Entretanto, há um enorme espectro de possibilidades e combinações de elementos no desenvolvimento de um novo reator nuclear, justificando a opção pelo MSR/MSFR – inclusive para pequenos reatores modulares (SMR – Small Modular

Reactors)<sup>77</sup>. A figura 2.8 traz o conceito-referência do Molten Salt Reactor adotado pelo GIF IV, atualmente uma das tecnologias mais discutidas de “reatores de tório”, ou seja, reatores nucleares que utilizam o tório como combustível – ou adotam o CCT.

Considerando o interesse do país em desenvolver tecnologia nuclear de última geração e manter pleno abastecimento de energia elétrica a custos competitivos, como no caso de reatores de tório, uma apresentação apropriada de uma proposta para adoção desta tecnologia no Brasil deve ser elaborada. O formato desta apresentação deve contemplar o público ao qual se destina formado, em sua grande maioria, por pessoas leigas cuja principal fonte de conhecimento deste assunto advém do ensino médio regular e dos meios de comunicação – mídia não especializada. Espera-se o desconhecimento de grande parte dos conceitos até aqui explorados. Assim sendo, o capítulo 3 se encarregará da elaboração de um mapa tecnológico a partir de premissas estritamente relacionadas com a geopolítica e a tecnologia nuclear, avalizadas pela AIEA, com o objetivo de inserir este item no *agenda setting* (ambiente público e político de discussão) para viabilizar a criação de uma política pública específica para construção de um reator de tório no Brasil.

---

<sup>77</sup> O projeto de avaliação de segurança do reator rápido a sal fundido denominado SAMOFAR – Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor da EURATOM (<http://samofar.eu/>) e o projeto de avaliação e viabilidade do sistema de reator rápido de combustível líquido denominado EVOL – Evaluation and Viability of Liquid Fast Fuel Reactor System (<https://cordis.europa.eu/project/id/249696>) contribuíram para demonstrar a viabilidade do MSFR.

### 3. MAPA TECNOLÓGICO PARA CONSTRUÇÃO DE UM REATOR DE TÓRIO NO BRASIL

#### 3.1. Introdução ao Mapa Tecnológico – Technology Roadmap (TRM)

A definição veiculada no dicionário Oxford (2015, p. 1347), cujo compêndio separa as palavras “road” e “map”, limita-se a traduzir o vocábulo composto como “mapa rodoviário”. Já no dicionário MacMillan (2007, p. 1289, *tradução nossa*) o mesmo termo, também separando as palavras, pode ser identificado como “**1** um mapa que mostra todos as principais estradas e rodovias em uma região ou país; **2** um plano ou um conjunto de instruções que facilita alguém a fazer algo<sup>78</sup>”. A definição “2” do dicionário MacMillan já contempla a metáfora envolvendo o termo *roadmap*, que costuma ser escrito em livros e publicações acadêmicas como uma só palavra e traduzido com o mapa ou roteiro, como ideia de guia. Da palavra “roadmap” surgiu “roadmapping”, que vem a ser o seu processo de elaboração. Para Cosner (2007):

*Roadmapping* é um processo estruturado para documentação da evolução antecipada dos mercados de uma empresa e dos planos de desenvolvimento de produto e tecnologia voltados para esses mercados no futuro.

[...]

*Roadmapping* é um dos elementos do processo de planejamento estratégico da empresa<sup>79</sup> (*tradução nossa*).

O Technology Roadmap – TRM, ou Mapa Tecnológico foi primeiramente idealizado em empresas privadas com o objetivo de estabelecer diretrizes menos arriscadas para o desenvolvimento de produtos cada vez mais complexos contendo alta tecnologia, em um ambiente de rápidas transformações tecnológicas, muitas indefinições na padronização e intensa concorrência mercadológica. Hill (2012, p. 355) descreve um Technology Roadmap<sup>80</sup> como:

Uma técnica utilizada por muitas organizações empresariais e de pesquisa para planejar o futuro de uma tecnologia específica de processo ou de produto. O objetivo

<sup>78</sup> *1 a map that shows all the main roads and motorways in a region or country 2 a plan or set of instructions that makes it easier for someone to do something.*

<sup>79</sup> *Roadmapping is a structured process for documenting the anticipated evolution of a company’s markets and the product and technology development plans to address those future markets. [...] Roadmapping is one element of the enterprise strategic planning process.*

<sup>80</sup> *A technique used by many businesses and research organizations to plan the future of a particular process or product technology. The goal of a technology roadmap is to anticipate externally driven technological innovations by mapping them on a timeline. The technology roadmap can then be linked with the research, product development, marketing, and sourcing. Some of the benefits of technology roadmapping include: Support the organization’s strategic planning processes with respect to new Technologies; Plan for the integration of new technologies into current products; Identify business opportunities for leveraging new technologies in new products; Identify needs for technical knowledge; and, Inform sourcing decisions, resource allocation, and risk management decisions.*

do mapa tecnológico é antecipar inovações tecnológicas promovidas fora da organização através do seu mapeamento numa linha de tempo. O mapa tecnológico pode então estar associado com a pesquisa, o desenvolvimento de produto, o marketing e compras/suprimentos. Alguns dos benefícios do mapeamento tecnológico incluem: apoiar os processos de planejamento estratégico das organizações relacionado a novas tecnologias; planejar a incorporação de novas tecnologias nos atuais produtos; identificar oportunidades de negócios para aproveitar ao máximo novas tecnologias em novos produtos; identificar a necessidade de conhecimentos técnicos; e, informar decisões de fornecimento, de alocação de recursos e de gerenciamento de risco (*tradução nossa*).

O Mapa Tecnológico para a Construção de Reatores de Tório no Brasil servirá para orientar tanto atores governamentais quanto empresas e membros da sociedade civil, interessados em conhecer essa via alternativa na geração nucleoeletrônica. Considerando o estado da arte desta tecnologia e a conjuntura nuclear internacional envolvendo as pesquisas de reatores nucleares de quarta geração, este mapa tecnológico visa contribuir para a tomada de decisão quanto a investimentos para retomada do desenvolvimento científico e tecnológico do ciclo de combustível tório no Brasil, desta vez em um MSR – Molten Salt Reactor (reator a sal fundido). Entretanto, a elaboração propriamente dita do mapa tecnológico não pode prescindir de uma etapa de avaliação e escolha do modelo a ser utilizado.

### 3.1.1. Modelos de Mapas Tecnológicos

A literatura acadêmica faz referência às empresas estadunidenses Corning e Motorola como precursoras do uso de mapas tecnológicos. Segundo Willyard (1987), a motivação por detrás da criação desta técnica pela Motorola foi uma solicitação interna dos dirigentes para o *staff* da empresa<sup>81</sup>:

Nossos tomadores de decisão para assuntos tecnológicos nos solicitaram a previsão de mudanças na tecnologia, a antecipação de novas maneiras de fazer as coisas [...] Uma vez que nossos produtos e processos estavam se tornando muito mais complexos com o passar dos anos, nós percebemos o perigo que seria negligenciar alguns elementos tecnológicos importantes. Esse perigo potencial deu origem aos processos corporativos chamados “Mapas Tecnológicos” (*tradução nossa*).

A Motorola desenvolveu dois tipos de mapa tecnológico. O primeiro lida com apenas uma tecnologia, sendo denominado “Emerging Technology Roadmap” e mantido constantemente atualizado por um grupo multidisciplinar de especialistas internos, cujo foco era manter um acompanhamento permanente da capacidade tecnológica da Motorola, comparando-a com a de

---

<sup>81</sup> *Our technological decision-makers have been required to forecast changes in technology, to anticipate new ways of doing things [...] Because our products and processes were becoming much more complex over the years, we realized there was the danger that we could neglect some important element of technology. This potential danger gave rise to corporate-wide processes we call the "Technology Road maps."*

seus concorrentes com o intuito de antever os rumos do progresso tecnológico. O outro foi apelidado de “Product Roadmap Technology<sup>82</sup>”:

O resultado de um Mapa Tecnológico de Produto bem sucedido é um plano estratégico de produto bem delimitado que vai sendo documentado, monitorado e atualizado conforme os desdobramentos envolvendo os desenvolvimentos tecnológicos e o mercado (WILLYARD, 1987, *tradução nossa*).

Os Mapas Tecnológicos de Produto da Motorola eram compostos de oito sessões: 1) Descrição do Negócio, incluindo missão, estratégias, participação no mercado (*market-share*), histórico e previsão de vendas, curvas do ciclo de vida do produto, plano de produto, curva de experiência e a concorrência; 2) Previsão Tecnológica contendo a evolução de características nos produtos futuros; 3) Matriz do Mapa Tecnológico resumindo requisitos tecnológicos para produtos futuros; 4) Qualidade; 5) Alocação de Recursos Técnicos; 6) Portfólio de Patentes; 7) Descrições do Produto, Relatório de Status (situação) e Gráfico Sintético, descrevendo para cada produto o nome do projeto, gestor responsável, objetivos, pessoas-chave, bem como orçamento e alocação de pessoal, atuais e previstos; 8) Breve Relatório (Minority Report) com a opinião de um ou mais especialistas acerca de um produto ou processo que mereça atenção por parte da empresa, seja uma oportunidade ou ameaça. Todo esse esforço culminava em uma ferramenta fundamental para permitir uma melhor avaliação das tecnologias da empresa, contribuindo para melhores decisões estratégicas (WILLYARD, 1987).

O Mapa Tecnológico pode ser descrito como parte de um Planejamento Técnico que integra um conjunto de mapas, conforme o quadro abaixo:

**Quadro 3.1 – Estruturação de Mapas segundo Cosner (2007).**

Type of Roadmap	Tipo de Mapa	Principais Características
Strategic Roadmap	Mapa Estratégico	Objetivos de longo prazo da alta administração.
Market Roadmap	Mapa Mercadológico	Análise de mercado, necessidade dos clientes, aspectos regulatórios, produtos complementares e substitutos etc.
Product Roadmap	Mapa de Produto	Evolução das características e do desenvolvimento de produtos da empresa e dos produtos novos para a empresa e para o mercado e além.
Technology Roadmap	Mapa Tecnológico	Foco em Pesquisa e Desenvolvimento de Novos Produtos, expectativas de lançamentos, datas etc.
Enterprise Roadmap	Mapa da Empresa	A integração dos mapas acima descritos pela empresa.

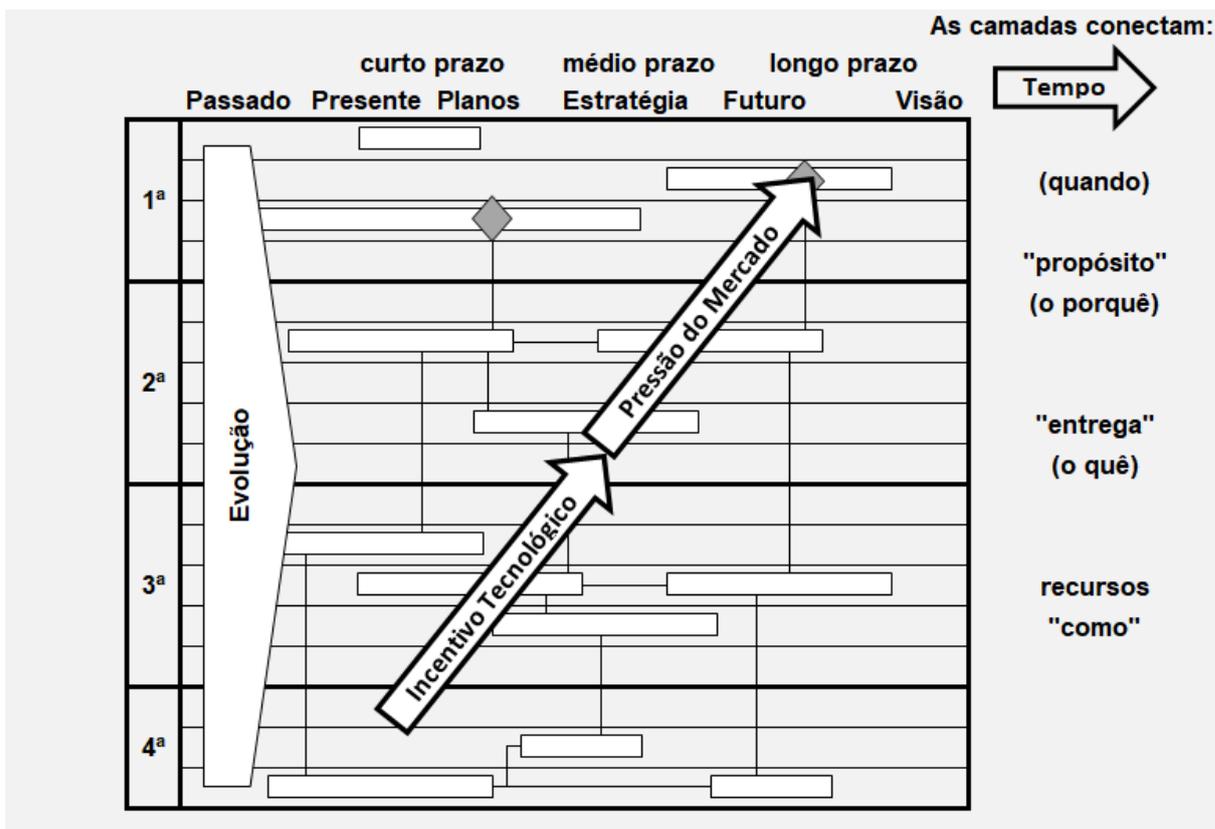
Fonte: Adaptado de Cosner (2007).

<sup>82</sup> *The result of a successful Product Technology Roadmap is a clearcut, strategic product plan which is documented, tracked and updated as the relationship between developing technologies and the marketplace unfolds.*

Para fins de simplificação e unificação dos termos utilizados neste trabalho, Technology Roadmaps (Mapas Tecnológicos) ou simplesmente Roadmaps serão tratados indistintamente como ferramentas gráficas utilizadas para condensar informações estratégicas, vinculadas a um campo específico ou grande área tecnológica, num período de tempo determinado, projetando expectativas e/ou necessidades e/ou ações a serem tomadas em datas futuras.

A variabilidade na densidade de informações que podem estar contidas em um Mapa Tecnológico permite que o resultado seja apresentado em muitos formatos. O esquema genérico apresentado na figura 3.1 ilustra a divisão por camadas e subcamadas, por meio das quais são disponibilizadas as informações da empresa num determinado horizonte temporal. A flexibilidade desta ferramenta permite adaptações que podem levar a uma hierarquização alinhada às particularidades de cada objeto explorado, seja um portfólio de uma empresa, um setor econômico de interesse governamental, uma ou mais tecnologias, produtos ou serviços.

**Figura 3.1 – Formato de um TRM genérico.**



Fonte: Adaptado de Phaal (2005), Lopes Júnior *et al* (2011) e Coelho *et al* (2012).

As camadas ordenadas à esquerda em níveis representam determinado conjunto de perspectivas funcionais, conforme sugere o quadro 3.2:

### Quadro 3.2 – Descrição das camadas do TRM genérico.

Camada	Perspectivas Funcionais	Descrição
1ª	Comerciais e estratégicas	Mercado, consumidores, competidores, ambiente, indústria, negócios, ameaças, tendências, objetivos, marcos, estratégia etc.
2ª	Processo e produção	Produtos, serviços, aplicações, habilidades, desempenho, características, componentes, processos, sistemas, plataformas, oportunidades, requisitos, riscos etc.
3ª	Tecnologia	Tecnologia, competências, conhecimento etc.
4ª	Pesquisa, Gestão e Suporte	Outros recursos: parcerias, finanças, fornecedores, instalações, infraestrutura, normas, ciência, projetos de P&D etc.

Fonte: Adaptado de Phaal (2005), Lopes Júnior *et al* (2011) e Coelho *et al* (2012).

O Formato de TRM Genérico ilustrado na figura 3.1 e complementado pelo quadro 3.2 pode ser considerado um modelo multicamadas. A literatura costuma denominar o Formato de TRM Multicamadas como a expressão do desenvolvimento típico de um produto, estabelecendo como camadas as Características do Produto, o Módulo/Componente e os Processos de Manufatura. A partir de então, derivam-se os Formatos de Barras e o de Mesas, meras adaptações gráficas. Registram-se também Formatos Gráficos e as conhecidas Árvores Tecnológicas. Para este trabalho, o Formato Genérico Multicamadas será o Modelo do Mapa Tecnológico Preliminar para a Construção de um Reator de Tório no Brasil.

#### 3.1.2. Benchmarking de Technology Roadmap.

Alguns exemplos visuais de *Roadmaps* contribuem para ilustrar os seus autores e usos, tanto por pesquisadores brasileiros quanto por governos e entidades internacionais.

##### 3.1.2.1. Pesquisa da EQ – UFRJ<sup>83</sup>

O trabalho de Cardoso *et al* (2017) intitulado “Elaboração de Roadmap Tecnológico para a Produção de Biogás a partir de Vinhaça” passou previamente por um processo taxonômico, conforme apresentado no quadro 3.3, onde Meso e Micro correspondem ao nível de detalhamento das informações, que se refletirão nas camadas e subcamadas dos *Roadmaps*. Neste trabalho, foram desenvolvidos quatro TRMs, desde o denominado “Ponto Zero”, passando pelos de “Curto Prazo”, “Médio Prazo” e “Longo Prazo”. A figura 3.2 apresenta o modelo de Longo Prazo elaborado pelos autores.

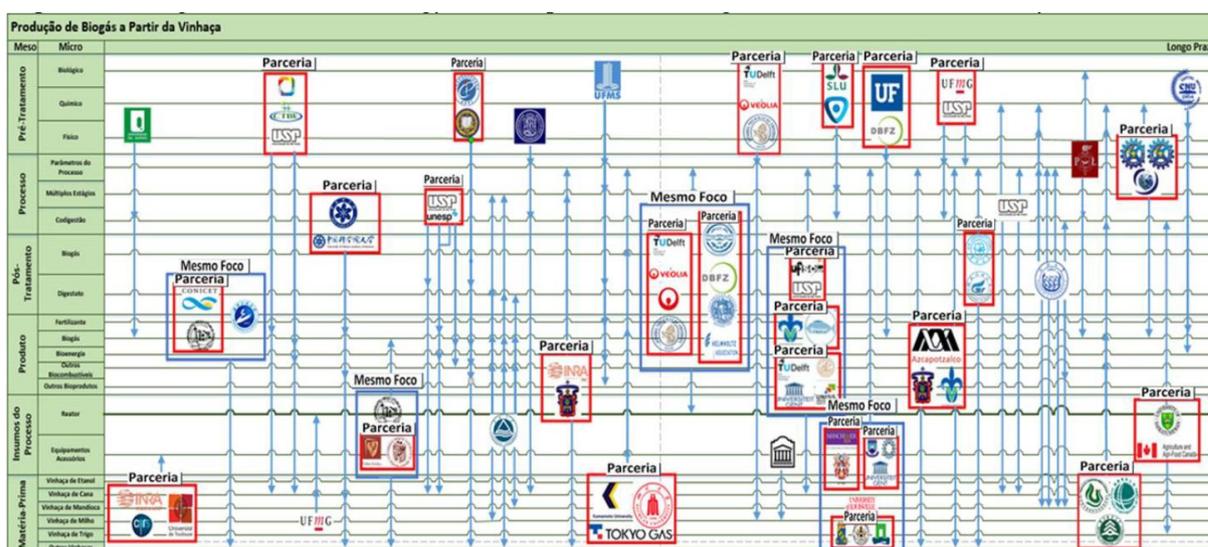
<sup>83</sup> Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Quadro 3.3 – Taxonomia para Elaboração de TRM para a Produção de Biogás a partir de Vinhaça.**

Meso – Nível Intermediário	Micro – Detalhamento
Pré-tratamento	Biológico, Químico, Físico.
Processo	Parâmetros do Processo, Múltiplos Estágios, Codigestão.
Pós-tratamento	Biogás, Digestato.
Produto	Fertilizante, Biogás, Bioenergia, Outros Biocombustíveis, Outros Bioprodutos.
Insumos do Processo	Reator, Equipamentos Acessórios.
Matéria-Prima	Vinhaça de Produção de Etanol.

Fonte: Adaptado de Cardoso *et al* (2017).

**Figura 3.2 – TRM de Longo Prazo referente à Digestão Anaeróbica de Vinhaça**



Fonte: Cardoso *et al* (2017).

### 3.1.2.2. Roadmaps da Academia Chinesa de Ciências - CAS

A Academia Chinesa de Ciências (Chinese Academy of Science – CAS), que se apresenta como o *think tank*<sup>84</sup> oficial do governo chinês para a ciência, publicou a série “Roadmaps 2050” elencando dezoito setores estratégicos considerados como áreas prioritárias, incluindo: energia, petróleo e gás, recursos hídricos, minerais, marinhos e de biomassa, meio-ambiente, população e saúde, agricultura, desenvolvimento regional, espaço, informação, manufatura e materiais avançados, nanociência, instalações para “big science”, pesquisa interdisciplinar e de fronteira e segurança pública e nacional.

<sup>84</sup> *think tank* são instituições que procuram fazer a ponte entre o conhecimento científico e as políticas públicas, através de pesquisas aplicadas aos problemas da sociedade. Produzem análises e sugestões que geram recomendações e caminhos a seguir, com o objetivo de influenciar a tomada de decisão tanto na esfera pública quanto na privada. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/sao-think-tanks>>. Acesso em: 27 out. 2019.

O quadro 3.4 destaca três destas publicações efetuadas pelo governo chinês a partir de 2010, das quais extraímos Roadmaps a título de exemplo, bem como destacamos como o tório é tratado nesses documentos.

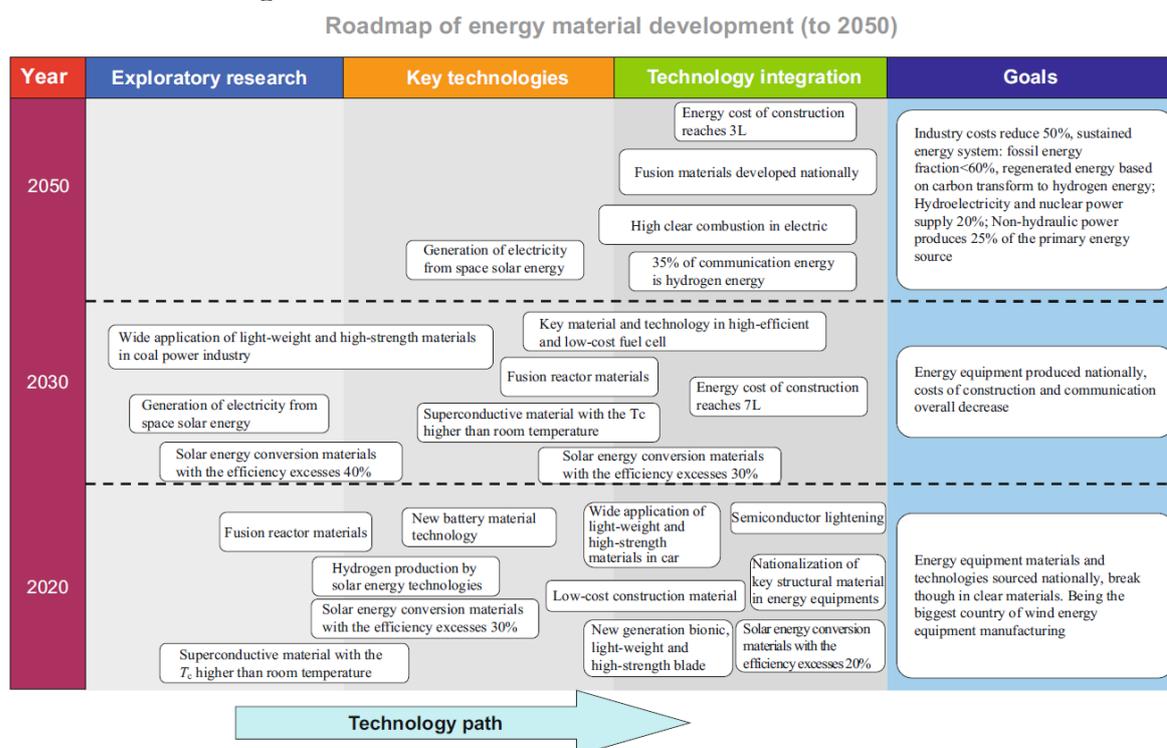
**Quadro 3.4 – Publicações selecionadas da série “Roadmap to 2050” da Academia Chinesa de Ciências.**

Nº	Publicação	Ano
1	Advanced Materials Science & Technology in China: A Roadmap to 2050	2010
2	Energy Science & Technology in China: A Roadmap to 2050	2010
3	Large Research Infrastructures Development in China: A Roadmap to 2050	2011

Fonte: (LU, 2010; CHEN, 2010; CHEN, 2011)

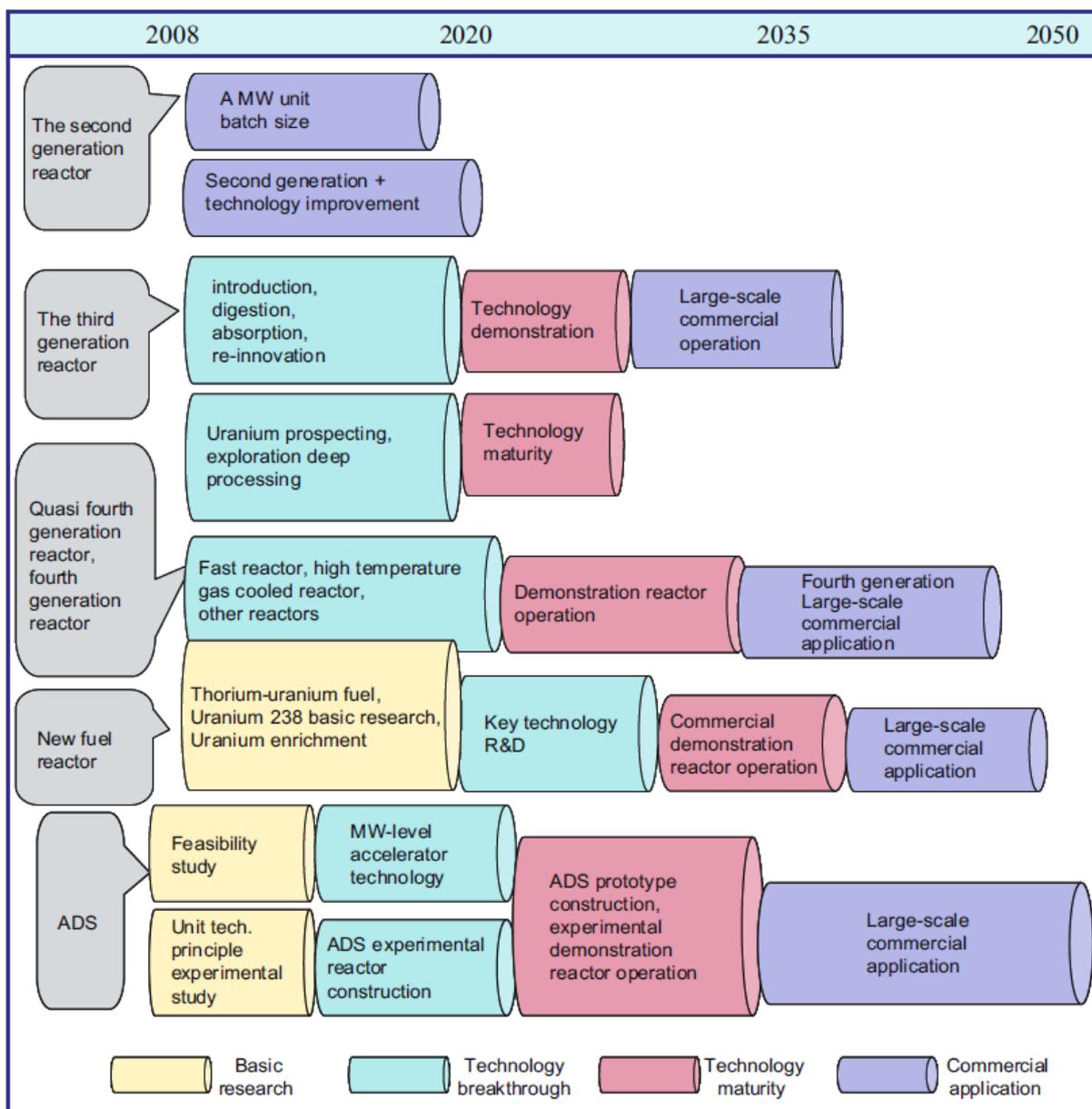
Na publicação sobre Ciência e Tecnologia para Energia, são mencionados os reatores de quarta geração – incluindo o MSR, dos quais a China selecionará um ou vários modelos para a construção de protótipos até 2025.

**Figura 3.3 – Roadmap elaborado pela CAS para o Desenvolvimento de Materiais relacionados à Energia.**



Fonte: (LU, 2010, p.78)

**Figura 3.4 – Roadmap elaborado pela CAS para Novas Plantas Nucleares e Tecnologia de Tratamento de Resíduos Nucleares.**



Fonte: (CHEN, 2010, p. 87).

Ao tratar do Desenvolvimento de Grandes Infraestruturas de Pesquisa, a CAS afirma a importância do tório no sistema ADS<sup>85</sup>:

ADS também pode utilizar como matéria-prima para a energia de fissão nuclear as reservas naturais muito ricas em tório. Devido ao fato de poder evitar o problema da proliferação nuclear, o sistema de fissão do ciclo Tório-Urânio é propício para o

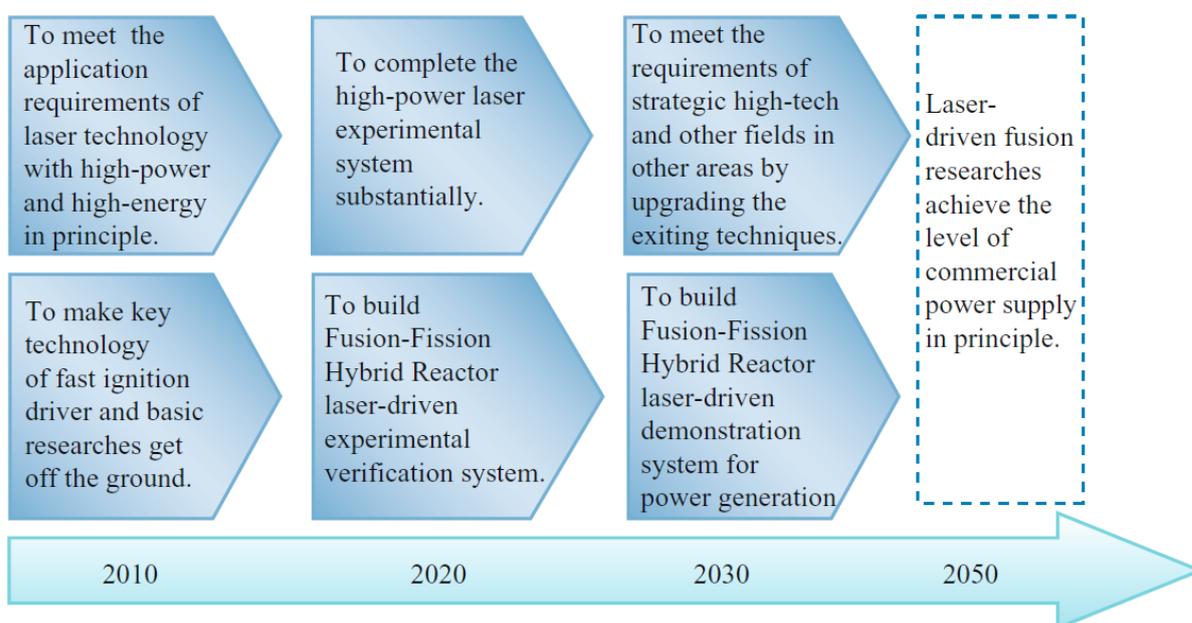
<sup>85</sup> Os Accelerator Driven Systems (ADS) são sistemas híbridos em que partículas carregadas produzidas por um acelerador são usadas para induzir reações em algum material alvo, resultando na produção de nêutrons que são usados em um núcleo de reator para manutenção das fissões nucleares.

desenvolvimento do seu uso em energia nuclear de fissão (CHEN, 2010, p. 38, *tradução nossa, grifos nossos*<sup>86</sup>).

Novamente, destaca o sistema ADS – Accelerator Driven System como forma de aproveitamento das suas reservas de tório.

Os sistemas de energia nuclear de quarta geração tratam como alvo prioritário de P&D seis tipos de reatores: [...] (6) MSR: reator a sal fundido [molten salt reactor]. [...] Por volta de 2020, nós vamos selecionar um ou vários reatores e, em 2025, montar as demonstrações de um sistema composto por um grupo de protótipos inovadores. [...] O processo de P&D do sistema ADS exercerá um papel muito importante no desenvolvimento de tecnologias avançadas em áreas afins. Paralelamente, também prevê a possibilidade de produção de materiais nucleares e abrem as portas para um futuro promissor para a utilização das reservas de tório. (CHEN, 2010, p. 84-85, *tradução nossa, grifos nossos*<sup>87</sup>).

**Figura 3.5 – Roadmap elaborado pela CAS para Instalações para Grandes Comunidades Científicas no campo de alta tecnologia com laser.**



Fonte: (CHEN, 2011, p. 134).

A importância que o governo chinês atribui à ferramenta TRM, inclusive associado ao desenvolvimento científico e tecnológico na área nuclear envolvendo reatores de terceira e

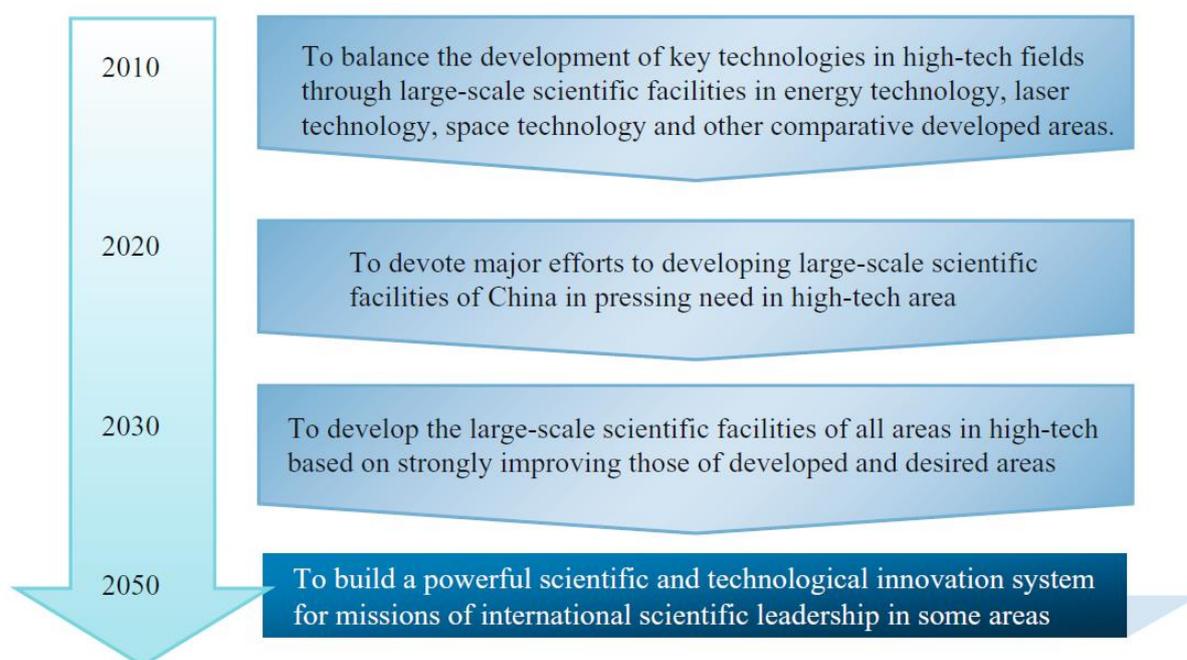
<sup>86</sup> ADS may also use the very rich Thorium resources in nature as the raw material of nuclear fission energy. Because the Thorium-Uranium cycle fission system can avoid the problem of nuclear proliferation, it is conducive to the development of using fission nuclear energy.

<sup>87</sup> The fourth-generation nuclear energy system takes six kinds of reactors as priority target for research and development: [...] (6) MSR: molten salt reactor. [...] We will select one or several reactors around 2020 and build innovative prototype group system demonstration around 2025. [...] The research and development process of ADS system will play an important role in greatly driving technology development in related fields. At the same time, it also provides a possibility of producing the nuclear materials and it opens up a promising future for the thorium resources utilization.

quarta geração, pode ser identificada dentro dos próprios documentos, ao mencionar o Roadmap 2040 francês:

Tomando como exemplo a energia nuclear, em média, normalmente leva cerca de 20 anos ou mais desde o plano inicial até se alcançar avanços tecnológicos essenciais, bem como o seu posterior emprego em larga escala e a sua comercialização. Se perdermos a oportunidade de fazermos planos prospectivos agora, no futuro ficaremos muito para trás. A França já elaborou o seu mapa de 2040 a 2050 para o desenvolvimento de reatores de fissão nuclear de 3ª e 4ª gerações, respectivamente, enquanto a China ainda não tomou nenhuma medida séria nessa direção. Nestas circunstâncias, em defesa do interesse nacional, esse é o momento para a CAS tratar esse assunto com seriedade e dar início à pesquisa prospectiva concernente a esse assunto (CHEN, 2011, p. viii, *tradução nossa*<sup>88</sup>).

**Figura 3.6 – Roadmap elaborado pela CAS no campo de alta tecnologia.**



Fonte: (CHEN, 2011, p. 142).

### 3.1.2.3. Publicações da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA em parceria com a Organização Mundial da Saúde – OMS

A Agência Internacional de Energia Atômica tem utilizado a nomenclatura Technology Roadmap para intitular publicações descritivas ao invés dos Roadmaps gráficos contidos nestas.

<sup>88</sup> *Taking the nuclear energy as an example, it usually takes about 20 years or more from its initial plan to key technology breakthroughs, so does the subsequent massive application and commercialization. If we lose the opportunity to make foresighted arrangements, we will be lagging far behind in the future. France has already worked out the roadmap to 2040 and 2050 respectively for the development of the 3rd and 4th generation of nuclear fission reactors, while China has not yet taken any serious actions. Under this circumstance, it is now time for CAS to take the issue seriously, for the sake of national interest, and to start conducting a foresighted research in this regard.*

A publicação de 2019 elaborada em parceria com a Organização Mundial de Saúde – OMS (World Health Organisation – WHO) intitulada “Roadmap towards a National Cancer Control Programme” (Mapa para um Programa Nacional de Controle do Câncer) demonstra claramente essa abordagem. A figura 3.7 descreve os *milestones* (marcos) a serem alcançados nas quatro fases pré-estabelecidas no documento: 1) Pré-planejamento; 2) Planejamento; 3) Trabalho Preparatório para Implementação; e, 4) Implementação.

**Figura 3.7 – Roadmap elaborado pela AIEA em parceria com a OMS para as quatro fases de um Programa Nacional para Controle do Câncer.**

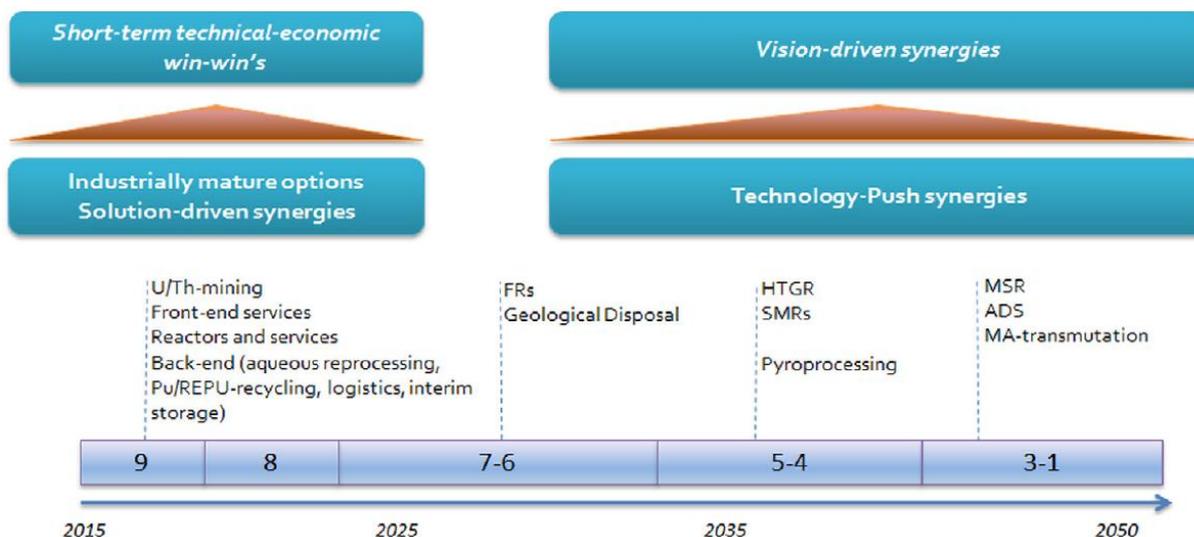


Fonte: IAEA/WHO (p. 4-5).

O grupo International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles – INPRO (Projeto Internacional sobre Reatores Nucleares e Ciclos de Combustível Inovadores), criado em 2000 nos EUA e que em 2019 contava com 41 países-membros (dentre eles o Brasil) mais a Comunidade Europeia, desenvolveu colaborativamente o projeto SYNERGIES – Synergistic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability. O objetivo de tal iniciativa concentra-se no desenvolvimento de propostas sustentáveis de emprego da energia nuclear para atendimento das demandas energéticas do século XXI. A figura 3.8 apresenta um Mapa Tecnológico com as sinergias a serem exploradas em estudos de caso para viabilizar o

aumento da sustentabilidade em reatores nucleares e nos ciclos de combustível nuclear adotados, que também incluem o sistema ADS.

**Figura 3.8 – Roadmap elaborado pelo INPRO / IAEA – SYNERGIES.**



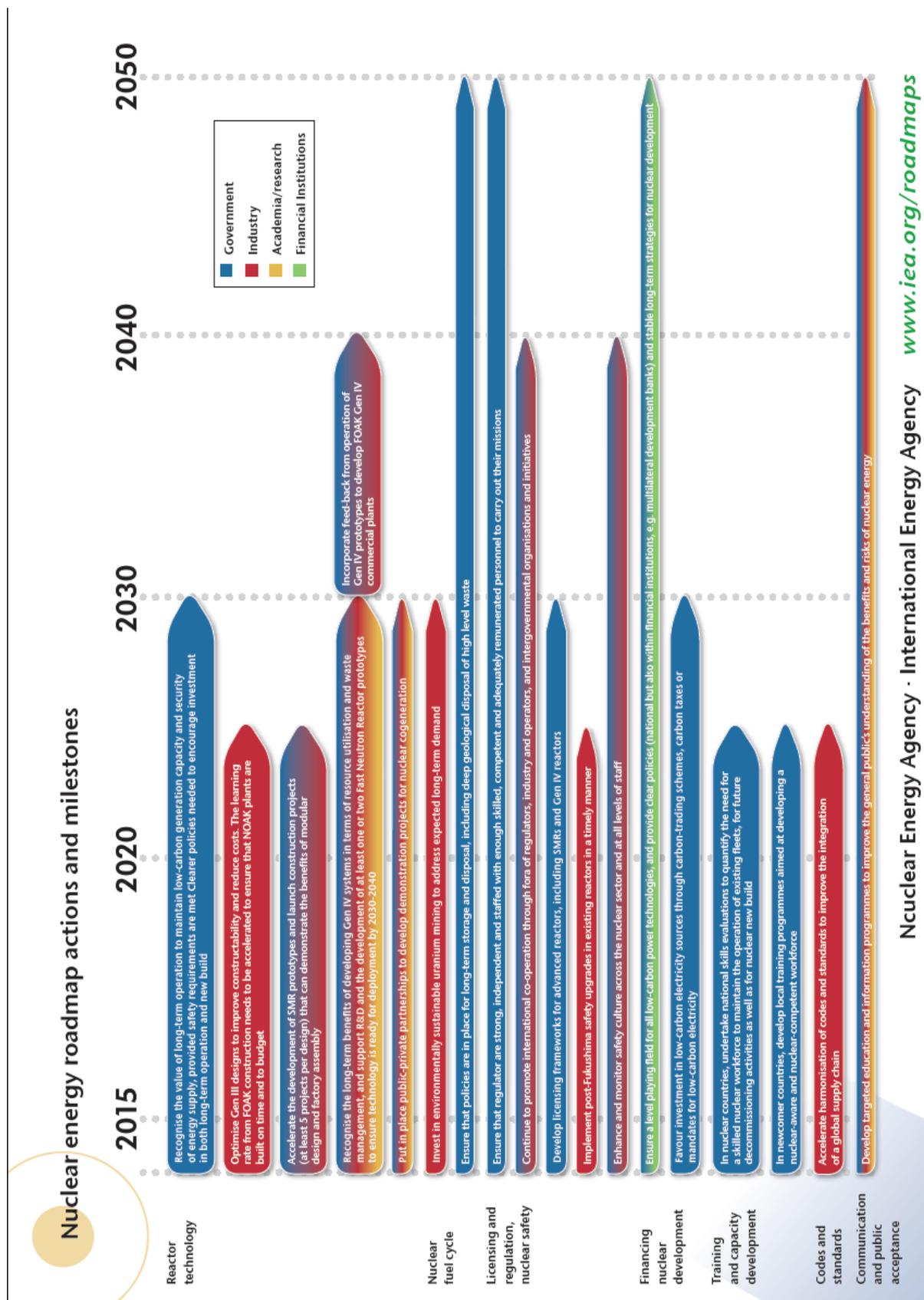
Fonte: IAEA/INPRO/SYNERGIES (p. 11).

A AIEA não se refere efetivamente às imagens gráficas como Roadmaps. Entretanto, as figuras 3.7 e 3.8 representam efetivamente Mapas Tecnológicos, pois atingem o objetivo de, sucintamente, e dentro de uma linha do tempo, sumarizar as tecnologias (Fig. 3.7) ou etapas de um processo tecnológico (Fig. 3.8) cujo detalhamento pode ser encontrado ao longo das respectivas publicações.

### 3.1.2.4. Publicações da Agência Internacional de Energia – IEA/NEA/OECD

A Agência Internacional de Energia da OCDE (IEA/OECD) possui em seu catálogo dezenas de publicações intituladas Technology Roadmaps, não só para as diversas formas de tecnologia energética (Nuclear, Solar, Eólica, etc.) como também aborda diretrizes sustentáveis, apresentando os documentos inclusive em edições escritas em chinês e árabe. A Agência de Energia Nuclear da OCDE (NEA/OECD), em parceria com a IEA, produziu duas edições do “Technology Roadmap: Nuclear Energy”, nos anos 2010 e 2015. Curiosamente, nenhuma das publicações apresenta o Mapa Tecnológico em sua forma gráfica. Entretanto, a figura 3.9 que apresenta um Roadmap de elaboração conjunta IEA/NEA/OECD descreve ações a serem desenvolvidas e marcos a serem alcançados por diversos atores, identificados por cores: governo, indústria, academia (representando a pesquisa) e instituições financeiras.

Figura 3.9 – Roadmap elaborado pelo NEA / OECD para a Energia Nuclear



Fonte: IEA (2015a, p. 4).

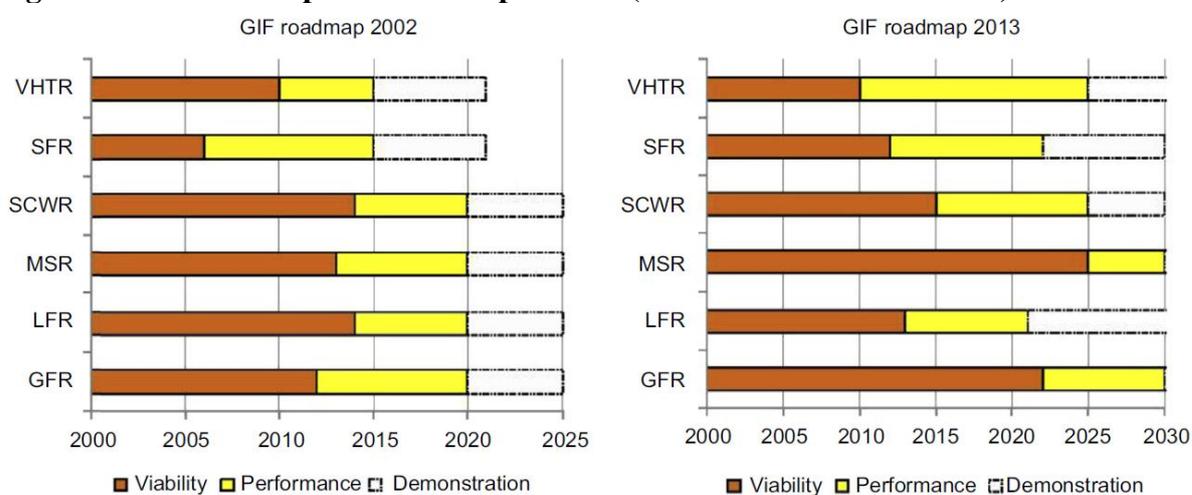
As camadas identificam as áreas sensíveis, a saber: tecnologia de reatores, ciclo do combustível nuclear, segurança nuclear – licenciamento e regulação, financiamento do desenvolvimento nuclear, treinamento e capacitação, códigos e padrões, comunicação e aceitação pública. Esta é uma apresentação de Mapa Tecnológico alinhada com a proposta do presente trabalho.

### 3.1.2.5. Fórum Internacional de Quarta Geração – GIF

O Fórum Internacional de Quarta Geração (*Generation IV International Forum – GIF*) também publica Mapas Tecnológicos. O “A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems” é uma publicação que recebe periodicamente atualizações (*updates*). As figuras 3.10 e 3.11 ilustram a atualização constante do Technology Roadmap, como um acompanhamento *pari passu* de cada objetivo. No caso destes TRMs do GIF, é a evolução das tecnologias dos conceitos de reatores de quarta geração que está sendo monitorada.

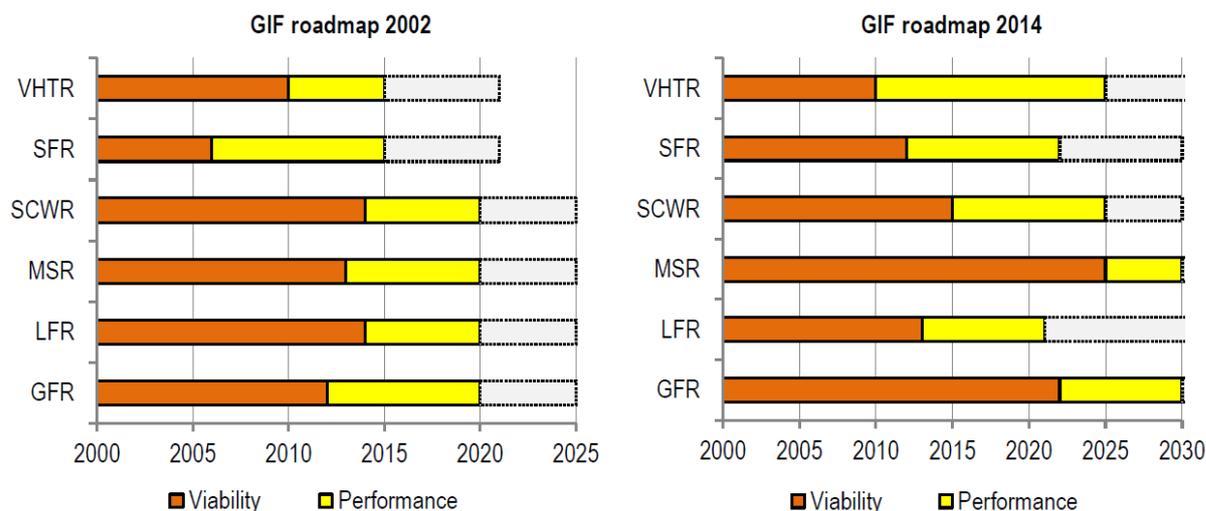
A escolha da ferramenta Technology Roadmap para propor a construção de um reator nuclear usando o tório como combustível no Brasil visa alcançar um conjunto de atores que possa contribuir para a viabilização de uma política pública específica para este fim. Assim sendo, o tópico seguinte busca resgatar os fundamentos das políticas públicas, seu ciclo e seus principais componentes, bem como defender a utilidade de um TRM para enfrentar este desafio.

**Figura 3.10 – Roadmaps elaborados pelo GIF (2002 e atualizado em 2013).**



Fonte: GIF (2016, p. 40; 254).

**Figura 3.11 – Roadmaps elaborados pelo GIF (2002 e atualizado em 2014).**



Fonte: GIF (2014, p. 15).

### 3.2. Políticas Públicas

Políticas Públicas representam um vasto campo de estudos dentro da grande área da Ciência Política. A figura 3.12, baseada em Grigsby (2009), procura posicionar a subárea de Políticas Públicas perante seus pares. Por vezes, se torna complexo adentrar as especificidades referentes à política, pois a língua portuguesa, embora rica em outros aspectos, dispõe de apenas uma palavra para inferir uma série de conceitos subjetivos associados à política. Segundo Frey (2000, p. 216), utiliza-se a política como “polity” para denominar as instituições políticas, “politics” para os processos políticos e “policy” para o conteúdo material ou concreto da política.

A Enciclopédia de Ciência Política organizada por Kurian (2011, p. 1299-1301) atribui ao termo “politics” dois principais conceitos: política como uma esfera de atuação ou espaço, e como uma atividade:

O conceito espacial de política diz respeito à demarcação da esfera da política. [...] ambas difusas em seus limites e vaga no seu núcleo. [...]

A distinção entre as esferas pública e privada forma o núcleo tradicional do conceito espacial de política. [...]

Considerar a política como uma arena, fórum, palco ou teatro estabelece uma distinção entre os conceitos fluidos de esfera e atividade, porque essas metáforas também fazem alusão ao desempenho de uma atividade<sup>89</sup> [...] (*tradução nossa*).

<sup>89</sup> *The spatial concept of politics concerns the demarcation of the sphere of politics. [...] both diffuse in its borders and vague at its core.[...] The distinction between the public and the private sphere forms the traditional core of the spatial concept of politics.[...] Regarding politics as an arena, forum, stage, or theatre renders the distinction between the sphere and activity concepts fluid, because these metaphors also allude to performing an activity. [...]*

E introduz o termo “policy” como um desdobramento de “politics”:

Política pública se refere a uma concepção de política enfatizando a continuidade de simples medidas. Isso permite que alguns autores façam a distinção entre as políticas ou denunciem todo o oportunismo. O núcleo da política pública reside no equilíbrio entre a conveniência teleológica e as exigências normativas. [...]

Estágios diferentes do processo político – incluindo deliberação, comprometimento ou contestação – também oferecem um tema alternativo para a conceituação de política<sup>90</sup> (*tradução nossa*).

**Figura 3.12 – Principais Subáreas da Ciência Política.**



**Fonte:** Adaptado de Grigsby (2009).

A distinção entre *polity*, *politics* e *policy* se faz relevante, pois o objeto de estudo deste trabalho são as Políticas Públicas de CT&I para Reatores de Tório, ou seja, *public policy*.

Segundo Grigsby (2009, p. 14):

A ciência política possui uma variedade de subáreas. Cada subárea se concentra em um conjunto particular de questões. As maiores subáreas incluem [...]

Políticas públicas, estudando como leis, regulamentos e outras políticas públicas são formuladas, implementadas e avaliadas. Esta subárea direciona seu olhar para questões como, O que faz com que uma nova política pública seja necessária? Como as políticas públicas podem ser construídas para irem de encontro a necessidades

<sup>90</sup> *Policy refers to a conception of politics emphasizing the continuity between single measures. This allows some authors to distinguish between politics or to denounce all opportunism. The core of a policy lies in the balancing of teleological expediency and normative demands. [...] Different stages of the political process – including deliberation, commitment, or contestation – also offer alternative topoi for conceptualizing politics.*

específicas de forma efetiva? O que contribui para a efetividade de uma política pública? Por que às vezes certas políticas públicas que não são efetivas não são descontinuadas? Quais deveriam ser os critérios para se avaliar políticas públicas?<sup>91</sup> (*tradução nossa*)

### 3.2.1.O Ciclo das Políticas Públicas

O resultado esperado para uma Política Pública de CT&I para Reatores de Tório bem-sucedida inclui o êxito no desenvolvimento tecnológico nacional, culminando no domínio do ciclo de combustível do tório, ou de uma combinação urânio-tório, e permitindo a construção de um reator nuclear com tecnologia autóctone. O desafio reside no processo de elaboração desta política pública. Segundo DiNitto (2011, p. 13-17), o Processo de Formulação de Políticas Públicas (*The Policymaking Process*) envolve a combinação de cinco processos, a saber: Identificação do Problema (*Identifying Policy Problems*), Formulação de Propostas (*Formulating Policy Proposals*), Legitimação (*Legitimizing Public Policy*), Implementação (*Implementing Public Policy*) e Avaliação (*Evaluating Policy*).

**Figura 3.13 – O Processo de Formulação de Políticas Públicas – Policymaking.**



Fonte: Adaptado de DiNitto (2011, p. 13-17).

**Figura 3.14 – Elementos do Processo de Formulação de Políticas Públicas.**



Fonte: Adaptado de DiNitto (2011, p. 13-17).

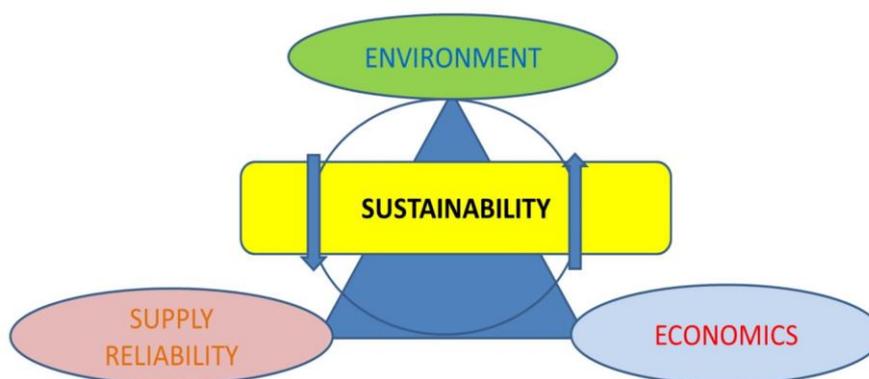
<sup>91</sup> *Political science has a variety of subfields. Each subfield focuses on a particular set of questions. The major subfields include [...] Public policy, studying how laws, regulations, and other policies are formulated, implemented, and evaluated. This subfield looks closely at such questions as, What makes a new policy necessary? How can policies be designed to meet specific needs effectively? What contributes to a policy's effectiveness? Why are ineffective policies sometimes continued rather than discontinued? What should be the standards for evaluating policies?*

Um dos fundamentos deste trabalho consiste em apresentar os reatores de tório como alternativa aos reatores nucleares de urânio enriquecido importados, bem como suas vantagens multissetoriais, para serem incluídos na agenda nacional via formulação e a implementação de uma política pública específica. O processo de identificação do problema político (questões de sustentabilidade, crescente demanda energética, custos etc.) está intimamente ligado ao processo de elaboração da agenda, o *agenda setting*. A área nuclear precisa chamar a atenção dos *policymakers* suficientemente para ser priorizada perante as diversas demandas da sociedade, ou de soluções já incorporadas que competem por esse espaço de negociação e diálogo. A solução do problema político pode trazer oportunidades para o País, seja pela questão geopolítica de segurança e defesa nacional, pelo viés da otimização da matriz energética, pela oportunidade de mercado e promoção da base industrial nacional, pelo interesse em produzir patentes e inovações tecnológicas, pela implementação de políticas externas de cooperação técnica com outros países ou por uma combinação destes e outros fatores não mencionados. Desta forma, é imprescindível dar visibilidade ao assunto. Segundo o CNEN (2016),

A política nacional de atividades nucleares tem como objetivos gerais assegurar o uso pacífico e seguro da energia nuclear, desenvolver ciência e tecnologia nuclear e correlatas para medicina, indústria, agricultura, meio ambiente e geração de energia e atender ao mercado de equipamentos, componentes e insumos para indústria nuclear e de alta tecnologia.

Na década de 1970, quando foi firmado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, a energia nuclear estava na agenda nacional. Assim, foi possível viabilizar o Programa de Recursos Humanos para o Setor Nuclear (PRONUCLEAR), implantado em 1976 e desativado gradativamente a partir de 1983, através do qual foi possível formar aquela geração de profissionais na área (PATTI, 2014).

**Figura 3.15: Triângulo das Políticas Públicas em Energia**



Fonte: GIF (2018, p. 79).

A energia nuclear compete com outras propostas de fontes energéticas. Não faz parte do escopo deste trabalho argumentar comparativamente os prós e contras envolvendo a energia nuclear e suas concorrentes. Como apresentado na figura 3.15 (GIF, 2018), a centralidade da sustentabilidade energética deve ser considerada sob os aspectos críticos, tais como a confiabilidade de fornecimento, a economicidade e os aspectos ambientais. Partimos da premissa de que a energia nuclear avança na otimização dos vértices do triângulo da sustentabilidade, diante do qual os reatores de tório apresentam vantagens ainda maiores, principalmente a médio e longo prazo. Entretanto, para se atingir esse patamar potencial e ir além, torna-se de fundamental importância acompanhar os desdobramentos tecnológicos do presente e incorporá-los na agenda brasileira de “policy” em Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I). Conforme citado no Capítulo 1, a Estratégia de CT&I da Marinha do Brasil inclui o desenvolvimento da área nuclear e de energia de forma conjunta, em harmonia com as políticas públicas nacionais (cuja filosofia de execução baseia-se na Tripla Hélice do Conhecimento Científico). Portanto, a proposta da construção de Mapas Tecnológicos para Políticas Públicas (Technology Roadmaps for Policy) converge para atender os interesses da Marinha do Amanhã (MA) e da Marinha do Futuro (MF).

### 3.2.2. Mapas Tecnológicos para Políticas Públicas

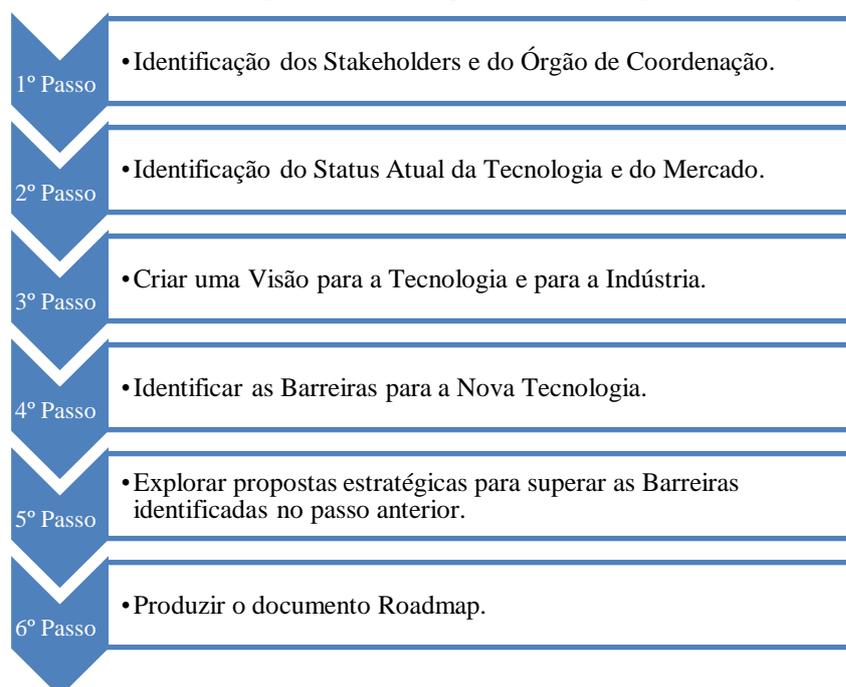
A ferramenta Mapa Tecnológico costuma ser utilizada dentro de empresas, como nas propostas iniciais da Motorola. Evoluíram para ambientes de pesquisa e de negócios, cujo público-alvo notadamente conhece, ao menos em parte, as questões intrínsecas ao objeto do mapa, sejam produtos, serviços ou processos. O desafio da utilização de Mapas Tecnológicos para Políticas Públicas reside exatamente no destinatário, pois em sua maioria serão atores e agentes pouco familiarizados com o conteúdo, por vezes sequer com o contexto. Alguns dos benefícios da confecção de Mapas Tecnológicos para o processo de elaboração de políticas públicas foram listados por Mureddu *et al* (2012):

- Detectar e entender problemas antes que eles se tornem insolúveis;
- Gerar alto envolvimento de cidadãos no processo de elaboração de políticas públicas;
- Identificar “boas ideias” e soluções inovadoras;
- Reduzir incertezas com relação aos possíveis impactos das políticas públicas;
- Incentivar a mudança comportamental e a captação de recursos;
- Detectar não conformidades e o desperdício de recursos;
- Compreender o impacto das políticas públicas<sup>92</sup> (*tradução nossa*).

<sup>92</sup> *Detect and understand problems before they become unsolvable; Generate high involvement of citizens in policy-making; Identify “good ideas” and innovative solutions; Reduce uncertainty on the possible impacts of*

Ahlqvist *et al* (2012) traz a proposta do mapeamento de políticas públicas de inovação como um instrumento sistêmico para projetos prospectivos de políticas públicas. Yasunaga *et al* (2008) aplica mapas tecnológicos em políticas governamentais de inovação para promover a convergência tecnológica no Japão, citando o envolvimento pessoal e ativo do então Ministro da Economia, Comércio e Indústria daquele país no processo de mapeamento tecnológico. O mesmo autor cita que uma das principais características específica dos Mapas Tecnológicos “Governamentais” seria a de que o objetivo ou produto final não poderia ser tão claramente definido. Todavia, tais mapas potencializariam o diálogo com a indústria, a academia / institutos de pesquisa e com setores privados, funcionando como uma engrenagem conectando setores heterogêneos. Winebreak (2004) propõe o processo de elaboração descrito na figura 3.16:

**Figura 3.16 – Plano de 6 Passos para Elaboração de um Mapa Tecnológico.**



**Fonte: Adaptado de Winebrake (2004).**

O autor introduz questionamentos imediatamente aplicáveis aos reatores de tório, tais como:

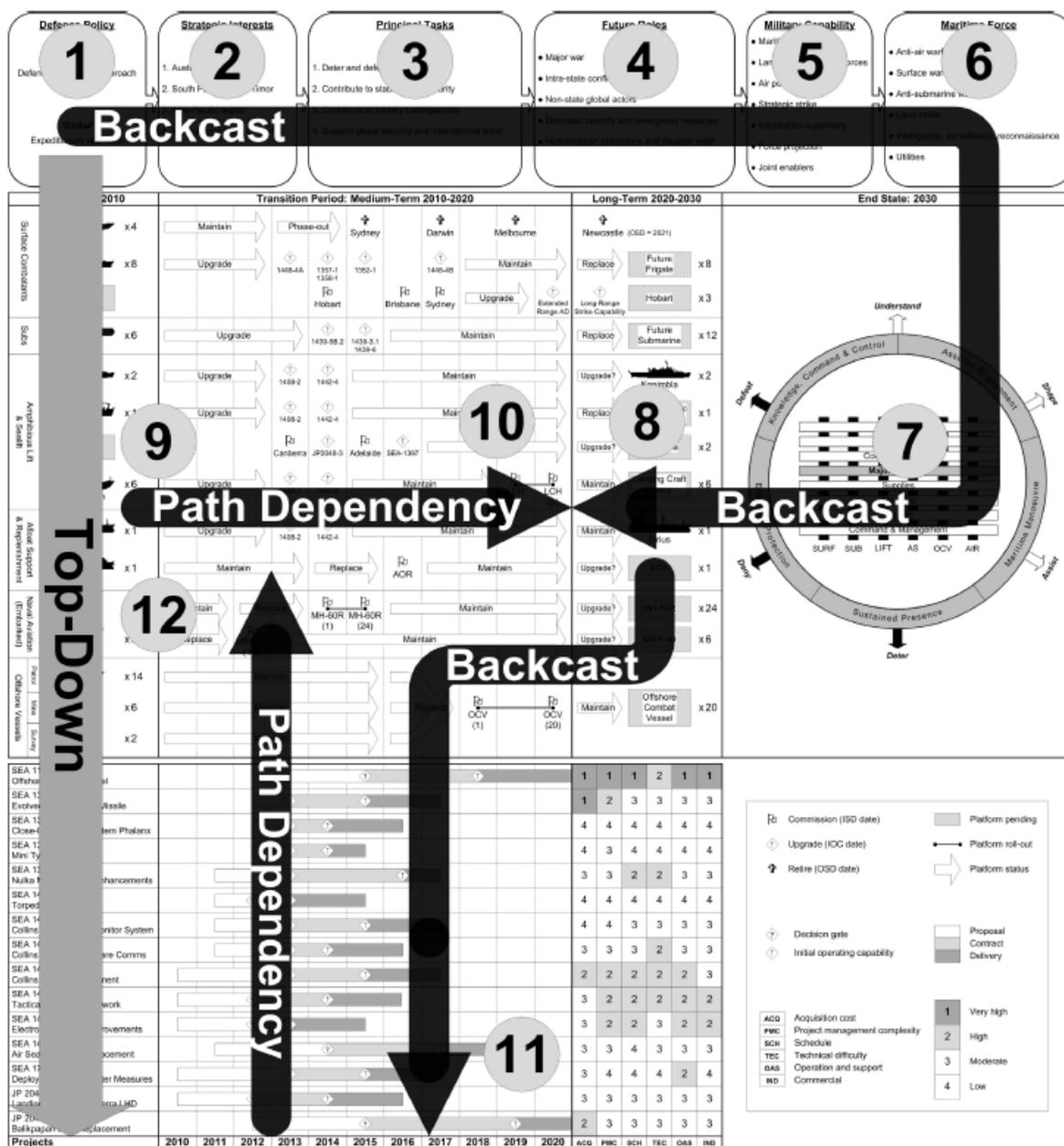
- Quando uma tecnologia estará pronta para o mercado?
- Quando as atividades de pesquisa proporcionarão uma tecnologia que represente um avanço mercadológico?
- Como as políticas públicas podem ser elaboradas de modo a estimular o desenvolvimento e a difusão de tecnologias?

---

*policies; Encourage behavioural change and uptake; Detect non-compliance and mis-spending; Understand the impact of policies [...] In a nutshell, technology roadmaps are designed to identify key goals, barriers, and strategies for advancing a particular technology amidst technical, political, and market constraints and uncertainty.*

- Como podemos coletar informações acerca do estado-da-arte da tecnologia e de como se parecerá no futuro?  
[...]  
Em resumo, mapas tecnológicos são elaborados para identificar objetivos-chave, barreiras e estratégias para fazer avançar uma tecnologia particular em meio a restrições e incertezas técnicas, políticas e mercadológicas<sup>93</sup> (tradução nossa).

Figura 3.17 – Processo de Roadmapping para o TRM da Marinha Real Australiana.

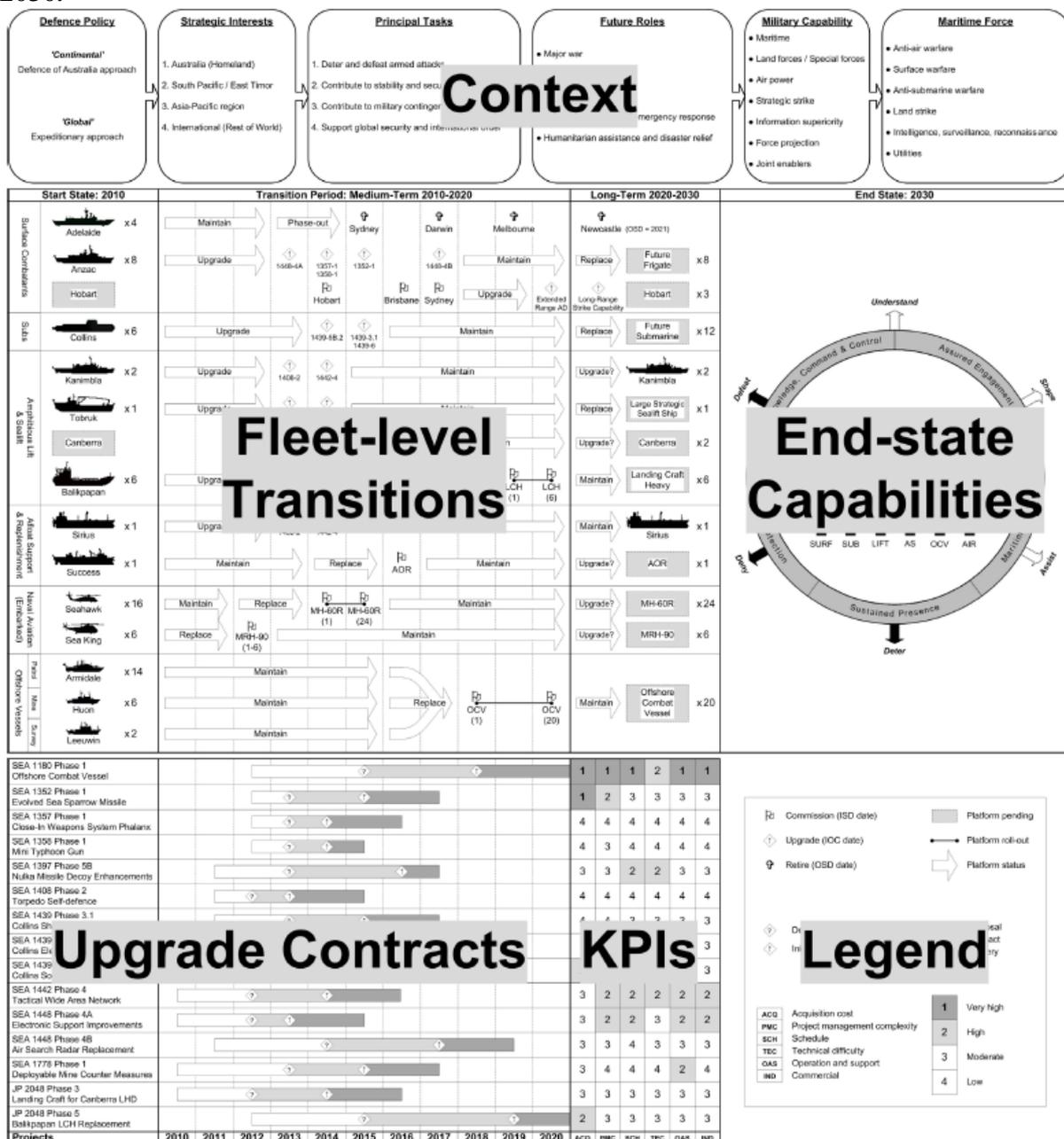


Fonte: Moherle, Isenmann & Phaal (2013, p. 73).

<sup>93</sup> When will a technology be market ready? What research activities will allow a technology to achieve a market breakthrough? How can policies be formulated to encourage technology development and deployment? How can we collect information about the current state of the technology and its likely future? [...] In a nutshell, technology roadmaps are designed to identify key goals, barriers, and strategies for advancing a particular technology amidst technical, political, and market constraints and uncertainty.

As figuras 3.17 e 3.18 ilustram, respectivamente, um processo específico e customizado para construção de um mapa tecnológico para políticas públicas na área de defesa e sua versão final.

**Figura 3.18 – Technology Roadmap da Marinha Real Australiana para o Período 2010-2030.**



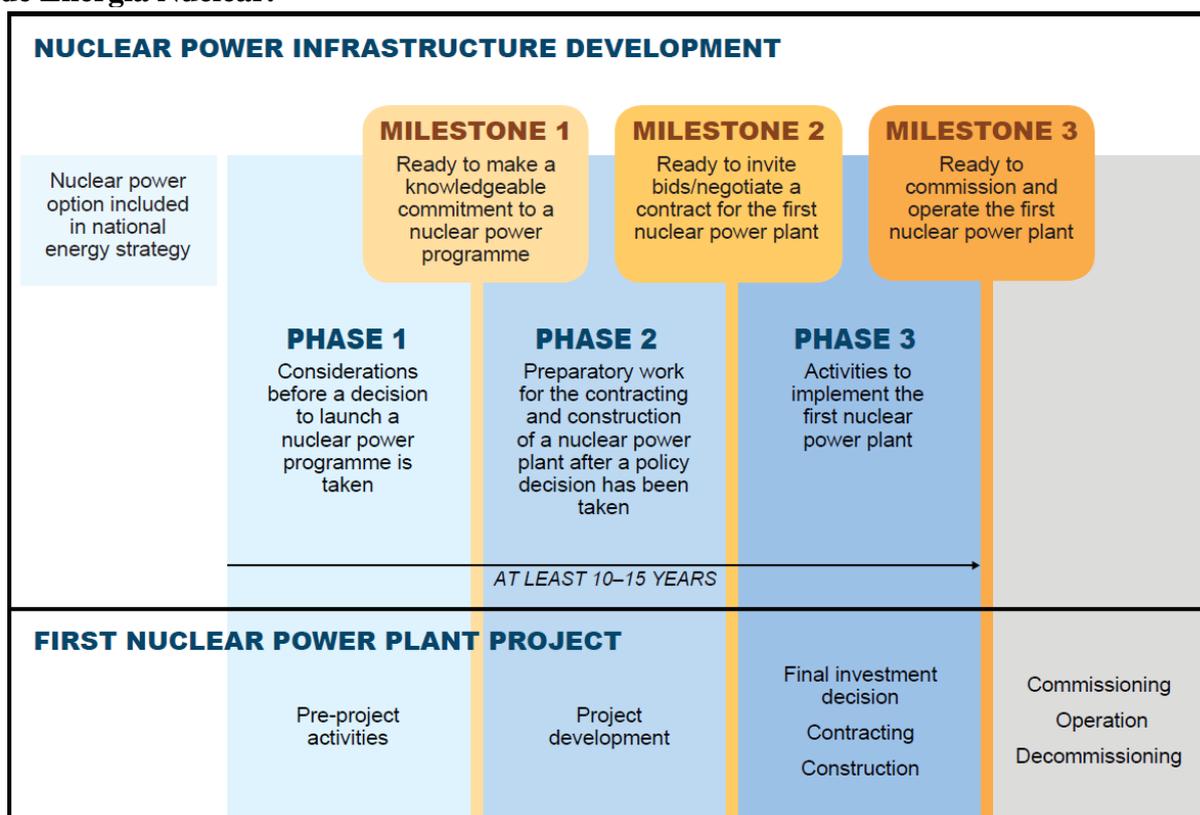
Fonte: Moherle, Isenmann & Phaal (2013, p. 72).

### 3.2.3.Insumos para Construção do Mapa Tecnológico

Há um consenso no setor nuclear quanto à autoridade e senioridade das orientações técnicas divulgadas pela Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA. Mediante a inexistência de um padrão para construção de mapas tecnológicos, tomamos por referência duas

publicações da referida agência. A primeira, intitulada “Marcos para o Desenvolvimento da Infraestrutura Nacional de Energia Nuclear – NG-G-3.1 (1ª Revisão)”, publicada em 2015; e a segunda, intitulada “Análise do Status do Desenvolvimento da Infraestrutura Nuclear Nacional – NG-T-3.2 (1ª Revisão)”, publicada em 2016<sup>94</sup> (IAEA, 2015; 2016, *tradução nossa*). Tais publicações visam prover os países-membros da compreensão acerca dos compromentimentos e obrigações envolvidos ao se tomar a decisão de desenvolver um Programa Nacional de Energia Nuclear. A figura 3.19 apresenta os três marcos propostos por ambas as publicações, conectando-os às respectivas fases de cada programa:

**Figura 3.19 – Marcos e Fases Necessárias para o Desenvolvimento de uma Infraestrutura de Energia Nuclear.**



Fonte: IAEA (2015, p. 5)

Esta escolha se justifica pelo fato de estarmos propondo um modelo de reator totalmente novo e inédito no País. Desta forma, atuando de maneira conservadora, com base nas suas diretrizes, optamos por elencar os tópicos sugeridos como se estivéssemos “partindo do zero” para viabilizar o desenvolvimento nuclear nacional.

<sup>94</sup> *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power* (IAEA, 2015); *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development* (IAEA, 2016).

Em primeiro lugar, destacamos o horizonte temporal: um processo bem-sucedido de implementação de um Projeto de uma Primeira Planta de Energia Nuclear pode demorar de 10-15 anos para iniciar a operação. Ou seja, precisa fazer parte de uma Política de Estado, que deve ser suportada independente do viés político no governo. Caso contrário, haverá atrasos e perda de continuidade, com consequentes prejuízos. O Brasil possui experiência em tais situações, dado os atrasos e percalços para conclusão das usinas de Angra II e Angra III.

A EPE reconhece oficialmente a tendência internacional de desenvolvimento tecnológico de reatores nucleares a partir de 2050:

A IAEA em sua publicação “*Nuclear Technology Review, 2014*” (IAEA, 2015) considera que os reatores de Geração III deverão ser a principal tecnologia para geração de energia nuclear até 2050. Contudo, a partir de 2020 é esperado que a indústria nuclear lance em escala não comercial os Reatores de Pequeno e Médio porte (SMRs) da Geração III+ e de Geração IV (TOLMASQUIM, 2016, p. 368).

Portanto, partimos da premissa de que a opção nuclear e, neste caso particular, a decisão pela construção de um reator de tório no Brasil (de Geração IV) deve ser considerada na estratégia nacional de energia. O atual marco regulatório do setor nuclear no Brasil, mais recente e abrangente, é o Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018, que consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira. Nele, atribui-se ao Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro – CDPNB as prerrogativas de fixar, por meio de Resolução, diretrizes e metas para o desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro (e supervisionar a sua execução). Ou seja, cabe ao CDPNB a decisão de incluir um projeto de reator nuclear de tório no *Agenda Setting*, dentro das Políticas Públicas de CT&I, de Energia e, especificamente, do Setor Nuclear Nacional. É claro que outros agentes podem provocar o debate acerca desta proposta, e este é um dos papéis do TRM a ser elaborado – dar suporte às discussões e propostas. Todavia, convém desde já esclarecer quem será o principal tomador de decisão neste processo.

Cada marco (*milestone*) está claramente associado a uma fase de desenvolvimento envolvendo três organizações-chave: o Governo, o Proprietário/Operador da Planta que conterà o reator de tório e o Órgão Regulador. Cada qual possui um conjunto de papéis e responsabilidades que vão se adequando conforme o avanço do projeto. As publicações da AIEA supracitadas assumem que o Governo criará os mecanismos de coordenação entre as organizações-chave e toda a rede de organismos envolvida no projeto. Ainda, cada marco deve considerar 19 tópicos de infraestrutura. O quadro 3.5 apresenta os 19 tópicos e classifica-os como “abrangentes” ou “específicos”. Os tópicos classificados como abrangentes já se encontram estabelecidos no País devido à experiência nacional do PNB; já os itens identificados como específicos necessitam ser explorados e desenvolvidos para atender às exigências

específicas do desenvolvimento de Reatores de Tório e do Ciclo do Combustível Tório. Tais itens específicos serão devidamente representados por camadas no Mapa Tecnológico para Reatores de Tório (TRM-RT).

O primeiro filtro excluiu do Technology Roadmap apenas cinco itens: 2) Segurança Nuclear; 8) Proteção contra a Radiação; 9) Rede elétrica; 13) Proteção Ambiental; e 15) Segurança Nuclear. O segundo critério de classificação levará em consideração as fases do Projeto de Construção do Reator de Tório. Para cada fase e cada item, um ou mais marcos específicos devem ser alcançados.

### Quadro 3.5 – Classificação dos Tópicos Relevantes para Inclusão no TRM-RT.

N	Tópico	Abrangente	Relevante	Justificativa
1	Posição Nacional		x	Embora o PNB já esteja estabelecido, é imprescindível que o governo brasileiro assegure via marco regulatório o compromisso do desenvolvimento de reatores de tório.
2	Segurança Nuclear (Safety)	x		Os reatores de tório são mais seguros que os PWR atuais no Brasil. Portanto, os critérios utilizados hoje já atendem neste quesito.
3	Gerenciamento		x	Atualmente há uma concentração de responsabilidades na CNEN, que regula e fiscaliza parte das atividades nucleares. É preciso debater o formato de gestão de um novo projeto separadamente.
4	Fundos Governamentais e Recursos Privados para Financiamento e Operação (Proprietário Operador)		x	O modelo prioritariamente de investimento estatal sufoca o desenvolvimento do parque nuclear nacional e limita a sua diversificação tecnológica. Este é outro assunto que deve ser tratado isoladamente, até para não competir com os projetos nacionais em curso.
5	Arcabouço Legal / Jurídico		x	O Brasil já aderiu aos Tratados Internacionais que julgou conveniente. A princípio, não há instrumentos internacionais específicos para o tório ou desenvolvimento de reatores de quarta geração – apenas fóruns como o INPRO e o GIF <sup>95</sup> , dos quais o Brasil já faz parte. Quanto ao Protocolo Adicional <sup>96</sup> , está em estudo, e envolve questões de salvaguardas <sup>97</sup> que vão muito além do tório, como a tecnologia do submarino nuclear e de enriquecimento de urânio. Este assunto é tratado no item (6).
6	Salvaguardas		x	Cada nova tecnologia precisa ser submetida à AIEA para avaliação e cumprir suas diretrizes estabelecidas nos acordos e tratados dos quais o País é signatário,

<sup>95</sup> O Brasil é signatário do GIF e do INPRO desde 2011.

<sup>96</sup> Protocolo Adicional é um aditivo ao TNP que amplia os poderes da AIEA quanto à fiscalização concernente às questões nucleares, bem como aplicação de salvaguardas adicionais. Criado em 1997, segundo a AIEA até 16/10/2019 o Brasil não fazia parte da lista dos países signatários. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/10/sg-ap-status-16-october-2019.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

<sup>97</sup> Salvaguardas – Conjunto de medidas destinadas à proteção e ao controle de material nuclear, existente em qualquer planta ou instalação do ciclo do combustível nuclear. Atividade que permite identificar, em tempo hábil, eventuais desvios de material nuclear, de forma a impedir sua utilização para fins não autorizados (CNEN, 2019).

				em especial o TNP. O Brasil deve analisar o papel da ABACC <sup>98</sup> perante esta nova tecnologia, bem como avaliar a conveniência e oportunidade de adesão ao Protocolo Adicional, ou reforçar o seu posicionamento em oposição.
7	Arcabouço Regulatório		x	Caso se flexibilize o Gerenciamento e as Fontes de Recursos para Financiamento, a legislação nacional deve ser renovada para contemplar tais alterações e redefinir papéis e responsabilidades. A princípio, os marcos regulatórios pertinentes ao setor nuclear no Brasil já contemplam o emprego da tecnologia nuclear <i>lato sensu</i> . Entretanto, convém verificar a necessidade de adequação. O foco deste item é em segurança (security & safety) e em salvaguardas.
8	Proteção contra Radiação	x		O comprometimento com a proteção de trabalhadores e das pessoas presentes na planta e no entorno permanecem no mais alto grau.
9	Rede Elétrica	x		Indiferente.
10	Desenvolvimento de Recursos Humanos		x	Políticas Públicas para a criação e manutenção de um corpo técnico competente e dedicado devem ser pensadas. Intensa cooperação técnica com outros países deve ser estabelecida e sustentada.
11	Envolvimento dos Públicos de Interesse (Stakeholders)		x	Este é um processo contínuo de gestão de relacionamentos, construção de pontes para diálogo e comunicação pró-ativa e efetiva.
12	Local e Instalações de Apoio		x	Por não necessitar de água para resfriamento, podem ser considerados locais inviáveis para os modelos de PWR.
13	Proteção Ambiental	x		Equivalente. O comprometimento com a proteção ambiental permanece no mais alto grau e com menores riscos.
14	Plano de Emergência		x	Embora deva ser adequado para a nova tecnologia, não possui desafios fora do domínio do corpo técnico já formado.
15	Segurança Nuclear (Security)	x		Seguirá basicamente os mesmos critérios das demais plantas nucleares nacionais, assegurando sua proteção contra ações externas não autorizadas. Uma localização mais remota da planta final não deveria trazer maior insegurança, dependendo do modelo do reator.
16	Ciclo do Combustível Nuclear		x	Parte do Ciclo do Combustível Nuclear Tório é bem diferente do Ciclo do Urânio.
17	Gerenciamento de Resíduos Radioativos		x	Embora as características dos resíduos não sejam exatamente as mesmas, os critérios de manuseio e destinação serão similares, não apresentando diferenças significativas. A escolha do local de instalação pode afetar a logística dos resíduos.
18	Envolvimento da Indústria		x	Intensa participação, seja para exploração do tório ou no desenvolvimento e fornecimento de materiais, equipamentos e componentes.
19	Compras / Suprimentos		x	A proposta deste trabalho prevê o desenvolvimento autóctone. Entretanto, esse caminho (aquisição externa) não pode ser descartado de imediato.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IAEA (2015, p. 5).

<sup>98</sup> ABACC – Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares, criada em 1991 para atender às exigências de salvaguardas da AIEA. Parte do Acordo Quadripartite, que envolve os governos do Brasil, da Argentina, a AIEA e a própria ABACC, de controle de materiais nucleares para fins pacíficos (CROSSLAND, 2012, PATTI, 2014).

O quadro 3.6 relaciona os 14 tópicos remanescentes, agrupando-os em 4 categorias ou camadas, que comporão o Mapa Tecnológico.

**Quadro 3.6 – Agrupamento dos 14 Tópicos Selecionados para compor as Camadas do TRM-RT.**

Nome da Camada	Descrição da Camada	Itens Reunidos
Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas (7 Tópicos ajustados para 5)	Ações que envolvem basicamente questões políticas, jurídicas, regulatórias, normativas e organizacionais com entidades internas do país ou externas, bem como incluem entidades privadas com questões administrativas e financeiras.	1) Posição Nacional; 3) Gerenciamento; 4) Fundos Governamentais e Recursos Privados para Financiamento e Operação (Proprietário / Operador); [5] Arcabouço Legal / Jurídico; 6) Salvaguardas; 7) Arcabouço Regulatório – <b>Tratar em Conjunto</b> ; 11) Envolvimento dos Públicos de Interesse (Stakeholders)
Ações Intermediárias (3 Tópicos ajustados para 2)	Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas com forte componente técnica / tecnológica.	10) Desenvolvimento de Recursos Humanos; 18-19) Envolvimento da Indústria / Compras / Suprimentos
Ações Primordialmente Técnicas (4 Tópicos ajustados para 3)	Ações cujas questões técnicas e/ou tecnológicas sobressaem fortemente sobre outros aspectos.	12) Local e Instalações de Apoio; 14) Plano de Emergência; 16-17) Ciclo do Combustível Nuclear / Gerenciamento de Resíduos Radioativos

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IAEA (2015, p. 5).

Os quadros a seguir – numerados de 3.7 a 3.9 – aplicam os conceitos de IAEA (2015) para cada agrupamento definido no quadro 3.6. Dentro de cada agrupamento, os tópicos selecionados serão desdobrados nas três fases, descrevendo o(s) marco(s) correlacionado(s) com cada fase, respectivamente.

**Quadro 3.7 – Tópicos Agrupados em Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas – Considerações Iniciais.**

N	Tópico	1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase
-	Projeto de Construção no Brasil de um Reator utilizando o Ciclo do Combustível Tório.	Considerações anteriores à decisão de construção do reator de tório.	Preparação p/ contratação e construção do reator de tório após Política Pública estabelecida.	Atividades de construção / efetiva implementação da nova planta com o reator de tório.
		Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
		Comprometimento com a decisão de construção do reator de tório.	Organização para negociar e comprar / contratar a compra e construção ou o desenvolvimento autóctone do reator de tório.	Organização para o comissionamento / início de operação comercial da nova planta com o reator de tório.
N	Tópico	Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
1	Posição Nacional	Declaração clara e firme da decisão de construção do Reator de Tório estabelecendo uma Política Pública para este fim.	Proposta de Licitação para Compra, Decisão Unilateral para Desenvolvimento Autóctone ou Proposta de Convênio / Parceria.	Comissionamento e Entrada em Operação da 1ª Planta Nacional Operando um Reator de Tório.

3	Gerenciamento	Definição da Entidade Gestora do Estudo do Projeto.	Coordenação do Processo de Escolha do Proprietário / Operador.	Coordenação do Processo de Comissionamento e Acompanhamento da Entrada em Operação.
4	Fundos Governamentais e Recursos Privados para Financiamento e Operação (Proprietário / Operador)	Definição do Modelo Econômico para o Projeto, com regras claras para o aporte de recursos, responsabilidades e garantias, provando segurança jurídica.	Detalhamento Econômico-Financeiro para Viabilidade do Projeto, Avaliação das Propostas e Assinatura de Contrato.	Acompanhamento da gestão financeira tanto para o Comissionamento quanto para a Gestão de Resíduos e para o Descomissionamento.
5-6-7	Arcabouço Legal / Jurídico / Regulatório / Salvaguardas	Posicionar-se estrategicamente perante tratados e acordos internacionais (Protocolo Adicional) p/ evitar gargalos futuros. Adequar regulamentação das questões ref. ao CCT.	Prover segurança jurídica para os processos dos itens 1, 3, e 4, assim como demais pertinentes.	Assegurar condições jurídicas e regulatórias p/ o efetivo Comissionamento, a Operação e todas as etapas até o Descomissionamento.
11	Envolvimento dos Públicos de Interesse (Stakeholders)	Efetuar uma pesquisa entre os diversos stakeholders para estabelecer o diálogo, prover esclarecimentos e criar um canal de comunicação eficaz.	Disponibilizar, manter e aprimorar continuamente sistemas de comunicação, incluindo questões técnicas, tecnológicas, regulatórias e normativas presentes nos demais itens.	Manter e aprimorar continuamente sistemas de comunicação, incluindo a rotina operacional e os eventos referentes ao comissionamento, operação, tratamento de resíduos etc.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IAEA (2015, p. 5).

### Quadro 3.8 – Tópicos Agrupados em Ações Intermediárias – Considerações Iniciais.

N	Tópico	1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase
-	Projeto de Construção no Brasil de um Reator utilizando o Ciclo do Combustível Tório.	Considerações anteriores à decisão de construção do reator de tório.	Preparação p/ contratação e construção do reator de tório após Política Pública estabelecida.	Atividades de construção / efetiva implementação da nova planta com o reator de tório.
		Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
		Comprometimento com a decisão de construção do reator de tório.	Organização para negociar e comprar / contratar a compra e construção ou o desenvolvimento autóctone do reator de tório.	Organização para o comissionamento / início de operação comercial da nova planta com o reator de tório.
N	Tópico	Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
10	Desenvolvimento de Recursos Humanos	Fazer um inventário dos recursos humanos disponíveis para atuar com a tecnologia de reatores de tório, do CCT, das questões de comissionamento, salvaguardas etc. ou seja, as lacunas e necessidades de formação e treinamento.	Ter desenvolvido recursos humanos próprios e em quantidade suficiente com expertise em áreas como engenharia, operacionais, legais, contratuais e de suprimentos / compras e no trato com stakeholders, para que possam dar suporte e atender de forma bem-sucedida todas as demandas apresentadas.	Ter desenvolvido recursos humanos próprios com senioridade para lidar com as questões de comissionamento, operacionais, de tratamento de resíduos capazes de lidar com as situações que vierem a surgir ao longo da operação, mantendo alto nível de qualidade e constante renovação.
18-19	Envolvimento da Indústria /	Verificar a capacidade e os gargalos da ind.	Assegurar sustentabilidade de uma cadeia de	Viabilizar o aprimoramento contínuo e dar suporte para

Compras / Suprimentos	nacional e fomentar o interesse para desenvolver, junto com ICTs, todas as etapas do CCT; especificação de pré-requisitos técnicos e questões econômicas sobre fornecimento e emprego de m-p, materiais, equipamentos, processos e serviços.	suprimentos nacional capaz de fornecer m-p, materiais, itens, peças, componentes e equipamentos com know-how relacionados direta e indiretamente com todas as etapas de construção, testes e posterior operação.	o desenvolvimento de recursos humanos e a manutenção de ICTs e da indústria para inovação; apoiar as atividades operacionais, trabalhando junto com o Operador / Proprietário p/ a manutenção de uma cadeia de suprimentos nacional confiável que inclua situações imprevistas.
-----------------------	--	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IAEA (2015, p. 5).

### Quadro 3.9 – Tópicos Agrupados em Ações Primordialmente Técnicas – Considerações Iniciais.

N	Tópico	1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase
-	Projeto de Construção no Brasil de um Reator utilizando o Ciclo do Combustível Tório.	Considerações anteriores à decisão de construção do reator de tório.	Preparação p/ contratação e construção do reator de tório após Política Pública estabelecida.	Atividades de construção / efetiva implementação da nova planta com o reator de tório.
		Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
		Comprometimento com a decisão de construção do reator de tório.	Organização para negociar e comprar / contratar a compra e construção ou o desenvolvimento autóctone do reator de tório.	Organização para o comissionamento / início de operação comercial da nova planta com o reator de tório.
N	Tópico	Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
12	Local e Instalações de Apoio	Analisar os possíveis locais para a nova planta, pelo fato desta possivelmente não sofrer tantas restrições como as que operam com PWR.	Ter o local definido mediante envolvimento do futuro Proprietário / Operador no processo de escolha e avaliação.	Confirmar a adequação e a finalização da construção no local determinado, mantendo monitoramento contínuo para assegurar a permanência das condições físicas previstas em projeto.
14	Plano de Emergência	Estabelecer os parâmetros do Plano de Emergência da nova planta e incluir no SIPRON / GSI <sup>99</sup> .	Disponibilizar o Plano de Emergência da nova planta e incluir no SIPRON / GSI.	Estar alinhado com as melhores práticas internacionais ref. ao Plano de Emergência, que deve estar plenamente funcional no comissionamento e na entrada em operação comercial.
16-17	Ciclo do Combustível Nuclear / Gerenciamento de Resíduos Radioativos	Estudar os meios para domínio completo do Ciclo do Combustível Nuclear Tório, como foi feito com o urânio. Inclui reprocessamento de resíduos e a gestão dos novos resíduos.	Ter desenvolvido o domínio completo do CCT no momento da abertura do processo licitatório ou equivalente e consequente gestão de resíduos.	Assegurar um estoque de segurança de combustível para atendimento contínuo, bem como a gestão e/ou tratamento de resíduos, com suporte para inovações e melhoria contínua de processos.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IAEA (2015, p. 5).

<sup>99</sup> SIPRON / GSI - Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro / Gabinete de Segurança Institucional.

### 3.3. Elaboração do Mapa Tecnológico

#### 3.3.1. Proposta Inicial de Mapa Tecnológico

A figura 3.20 ilustra uma proposta inicial de TRM. Em primeiro lugar, se definiram três camadas, conforme as orientações da IAEA anteriormente descritas. Em seguida, estabeleceu-se o horizonte de 2050 como referência do mapa tecnológico.

A proposta inicial de mapa tecnológico inclui detalhes que o mapa final não terá. Visa dar um panorama visual inicial e proporcionar uma crítica prévia antes da confecção do mapa definitivo. Cada célula pode ser expandida e gerar um submapa próprio, assim como cada camada pode se tornar um mapa parcial. Entretanto, essa opção retira do mapa tecnológico uma de suas principais vantagens, que é a visão geral do projeto.

As cores utilizadas foram adotadas tendo em vista facilitar a leitura. O padrão adotado segue a orientação descrita no quadro 3.10:

**Quadro 3.10 – Legenda de cores do Mapa Tecnológico**

Cor	Significado
VERDE	1ª Camada: Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas (5 Tópicos)
AMARELA	2ª Camada: Ações Intermediárias (3 Tópicos)
CÁQUI	3ª Camada: Ações Primordialmente Técnicas (4 Tópicos)
TERRA	Pontos que requerem atenção e podem interromper, atrasar ou inviabilizar a execução do projeto.
<b>VERMELHO ESCURO</b>	<b>Pontos que são gargalos críticos e devem ser tratados com prioridade, sem os quais o projeto não pode nem iniciar.</b>

Fonte: Elaboração do autor.

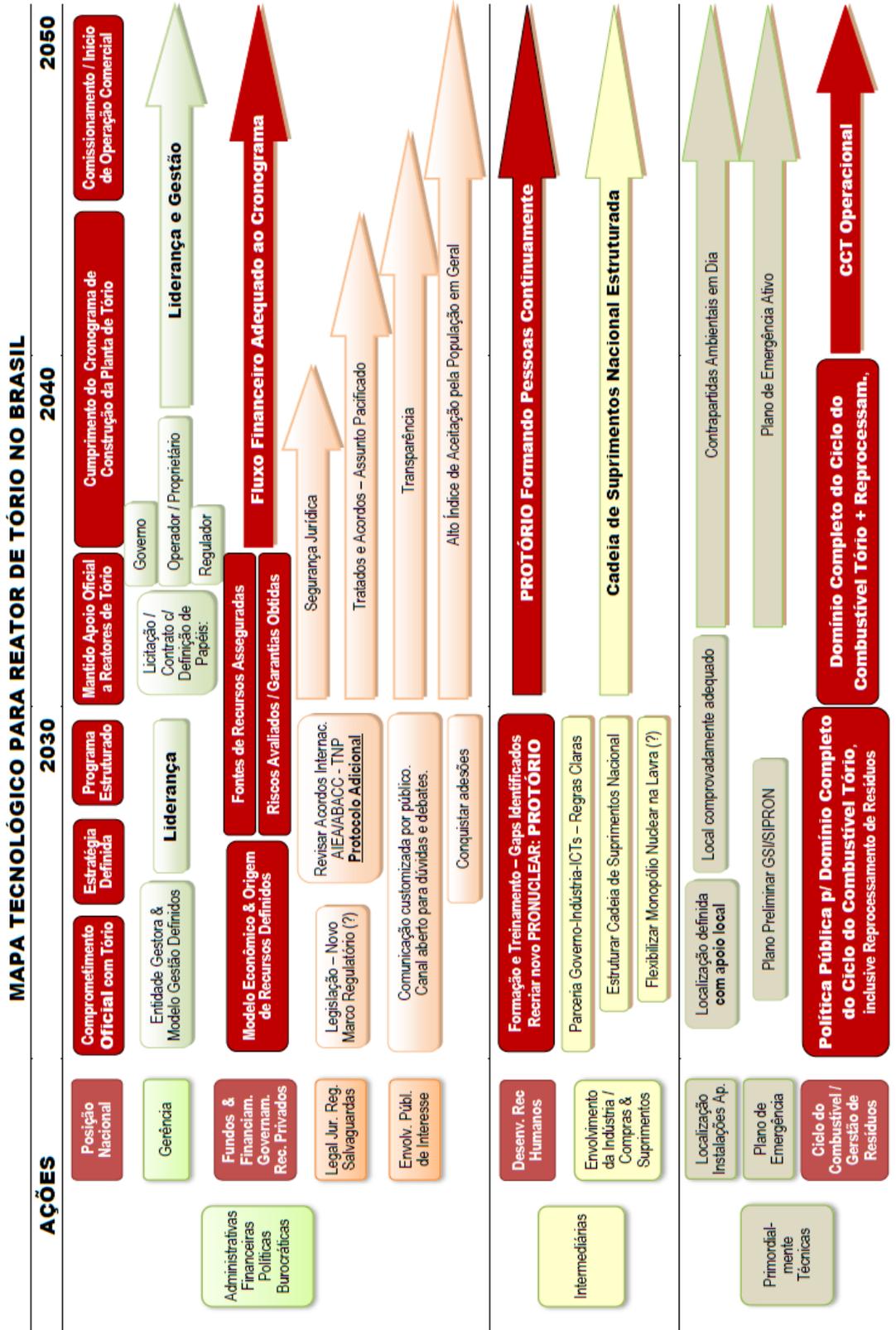
As escolhas adotadas no Mapa Tecnológico são apresentadas nas Considerações Finais, acompanhadas de discussões pertinentes. Embora haja certa discricionariedade na construção do mapa, procurou-se respeitar o padrão original fornecido pela AIEA, principalmente quanto ao escopo do conteúdo de cada linha, apontando-se oportunamente as sinergias consideradas relevantes. Merece destaque o verbete PROTÓRIO, uma proposta de Programa de Recursos Humanos, inspirada no PRONUCLEAR da década de 1980, para formação e capacitação de profissionais da área nuclear para atuarem com Reatores de Tório e com o Ciclo do Combustível Tório – CCT.

Figura 3.20 – Proposta Inicial de Mapa Tecnológico

Ações	Áreas de Atuação	1ª Fase (até 2030)	2ª Fase (até 2040)	3ª Fase (até 2050)
Administrativas-Financeiras-Políticas-Burocráticas	1) Posição Nacional	Incluir Reatores de Tório na Política Nacional & Definir Estratégia.	Colocar estratégia em prática: Licitação x Desenvolvimento Autóctone x Parceria.	Comissionamento, Testes e Entrada em Operação.
	3) Gerenciamento	Definir / Criar Entidade Gestora e Modelo de Gestão.	Definir Proprietário / Operador & Assegurar <i>Compliance</i> – Estabelecer cronograma.	Cumprir cronograma p/ Comissionamento / Operação.
	4) Fundos Governam. e Rec. Privados p/ Financiamento e Operação	Debater, definir e divulgar modelo econômico e fontes de recursos.	Assegurar viabilidade econômica do empreendimento dentro do cronograma.	Operação economicamente viável.
	5-6-7) Arcabouço Legal / Jurídico / Regulatório / Salvaguardas	Posicionar-se estrategicamente perante tratados e acordos internacionais p/ evitar gargalos futuros. Adequar regulamentação das questões ref. ao CCT. Papéis e responsabilidades claramente definidas com marcos regulatórios que reflitam o item 1; orientem 3, 4 e 6; respeitem 5 e viabilizem 10, 18 e 19.	Prover segurança jurídica para os processos dos itens 1, 3, e 4, assim como demais pertinentes.	Assegurar condições jurídicas e regulatórias p/ o efetivo Comissionamento, a Operação e todas as etapas até o Descomissionamento.
	11) Envolvimento dos Públicos de Interesse	Criar GTs, ampliar a discussão, comunicar cada etapa, esclarecer dúvidas, discutir trade-offs.	Executar cada etapa de forma transparente, mantendo canal de comunicação aberto, ser reconhecido como confiável.	Manter e ampliar canais de comunicação com alto nível de transparência e confiabilidade.
Intermediárias	10) Desenv. RH	Elaborar um planejamento de RH para todas as áreas sensíveis, identificar lacunas e definir estratégias e metas p/ suplantá-las; inclui aspectos legais, jurídicos e regulatórios.	Atingir as metas propostas e manter um fluxo contínuo.	Assegurar formação e renovação de quadros de forma perene.
	18-19) Envolvimento da Indústria / Compras / Suprimentos	Convidar a indústria para o diálogo (GT) e definir estratégias e metas para as tecnologias envolvidas. Analisar gargalos e criar estratégias de acesso a materiais e tecnologias na cadeia de abastecimento; inclui aspectos legais, jurídicos e regulatórios também para mineração e beneficiamento da m-p.	Construir e manter uma cadeia de suprimentos sustentável economicamente, competitiva para atender o projeto. Definir especificações de itens a serem adquiridos e dispor de pessoal capacitado para assegurá-los.	Viabilizar e suportar a sustentabilidade da cadeia no LP e o aprimoramento contínuo. Garantir fornecimento em situações de normalidade e eventuais crises, desenvolvendo alternativas no MP/LP.
Primordialmente Técnicas	12) Local e Instalações de Apoio	Definir localização após amplo debate com os públicos de interesse.	Atender a todas as exigências quanto às questões ambientais e garantir segurança jurídica para operador / proprietário.	Monitoramento contínuo das condições do local com cumprimento das contrapartidas estabelecidas.
	14) Plano de Emergência	Instituir e executar trabalho em GT GSI / SIPRON com especificidades do Plano.	Implementar e divulgar Plano desde o início das obras.	Estar em conformidade com as melhores práticas internacionais.
	16-17) Ciclo do Combustível / Gerenciamento de Resíduos Radioativos	Estudar os meios para domínio completo do Ciclo do Combustível Nuclear Tório, como foi feito com o urânio. Inclui reprocessamento de resíduos e a gestão dos novos resíduos.	Ter dominado o CCT e provar sua viabilidade econômica ANTES de iniciar o processo de definição do proprietário / operador. Estabelecer a logística no caso do reaproveitamento de resíduos da CNAAB, juntamente com itens 18 e 19, atualizando as demais esferas afetadas.	Assegurar um estoque de segurança de combustível para atendimento contínuo no momento da entrada em operação, bem como a gestão e/ou tratamento de resíduos, com suporte para inovações e melhoria contínua de processos.

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 3.21 – Mapa Tecnológico para Reator de Tório no Brasil



Fonte: Elaboração Própria

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Mapa Tecnológico desenvolvido representa o ponto de partida nos debates para formulação de políticas públicas. É uma ferramenta que traz concisão. Portanto, o seu usuário deve estar preparado para esclarecer cada ponto do mapa. Para tanto, buscou-se discutir cada ponto crítico do mapa, como se segue.

As Camadas: A separação em três camadas procurou agrupar assuntos pela pertinência quanto ao desenvolvimento e tomada de decisão. Existe uma hierarquização subliminar nessa divisão. A 1ª Camada envolve atores governamentais, notoriamente a classe política. Na 1ª Linha da 1ª Camada temos a Posição Nacional. Fica bem claro que dificilmente, para a tecnologia nuclear, haverá possibilidade de um desdobramento de políticas públicas sem o referendo da autoridade superior. Um Programa de Estado precisa da manifestação explícita em um país democrático. Uma incontestável evidência pode ser colhida da experiência de anos de esforços de setores da sociedade em prol da energia nuclear cuja agenda tem sido constantemente suplantada por outras prioridades nacionais. As idas e vindas do posicionamento nacional se refletem em atrasos e custos para o setor. Como a área nuclear vincula-se estrategicamente à Marinha, o seu explícito comprometimento com o desenvolvimento de reatores de tório poderia criar uma onda de propagação que viesse a atingir positivamente outros atores relevantes. Antes de alcançar a harmonia ambicionada para explorar e otimizar estímulos oriundos de políticas públicas, é preciso que tais políticas existam.

Ainda na 1ª Camada, destaca-se a questão de Liderança na Gerência. Assim como na Administração Privada, a Administração Pública também necessita de representantes de órgãos da administração direta e indireta capazes de levar à frente os compromissos de cada entidade. Esse papel não pode ser delegado para uma “mão invisível”, como se o processo se desenvolvesse organicamente. Existem etapas e cronogramas que são pré-requisitos imprescindíveis para as fases seguintes. Portanto, mais do que uma simples ideia, indica a necessidade de se prover os meios para que cada ator possa exercer o papel esperado a contento. No caso da Gerência, equivale ao Gestor de Projetos, mas como alicerce institucional, implementando a parte da política pública que lhe cabe e fazendo o monitoramento constante dos elementos que podem constituir gargalos para a completa efetivação da proposta contida no mapa.

Os paradigmas do passado estão sendo questionados e, dentre eles, o monopólio estatal. Esse redesenho afeta diretamente a estrutura de capital para financiamento, e caminha paralelamente com a consolidação de um arcabouço jurídico. Literalmente, a mudança nas

“regras do jogo” no meio do projeto pode trazer insegurança jurídica indesejada. E, se por um lado lamentavelmente esses debates costumam se estender por meses e anos, por outro lado é desejável que se esgotem as dúvidas e que se compreenda que escolhas foram feitas, e qual a sua repercussão no projeto. Até aqui, o racional por detrás das premissas perpassa o próprio setor nuclear e constitui uma linha de condução genérica coerente. Todavia, a questão de Comunicação precisa de uma atenção especial, pois abarca toda a população – não só a sociedade civil organizada, mas cada cidadão. Em um País democrático, políticas públicas se constroem com a participação popular. Tal ponto não deve ser negligenciado – política, voto e população estão por definição presentes no *agenda setting* para os formuladores de políticas públicas e, principalmente, para os tomadores de decisão.

Na 2ª Camada, lidamos com dois elementos que precisam dos insumos da 1ª Camada. De acordo com as decisões tomadas e políticas públicas construídas, será possível viabilizar o desenvolvimento de recursos humanos. O setor nuclear brasileiro é numericamente pouco expressivo, e atualmente o mercado não consegue absorver a pouca mão-de-obra oriunda de cursos especializados. O resultado disso é perda de capital humano e falta de pessoal potencialmente qualificado para reposição. Os cursos técnicos e as universidades são apenas o ponto-de-partida: somente através da experiência de anos trabalhando diretamente no setor nuclear, seja num ICT, num órgão regulador, na indústria, comércio ou na prestação de serviços, é possível acumular expertise para os desafios de um setor tão sensível. O PROTÓRIO, verbete sugerido inspirado no seu predecessor PRONUCLEAR, encampa um conjunto de iniciativas que devem ter continuidade para assegurar uma formação sólida de RH voltada para uma efetiva construção e gestão de conhecimento setorial, transformando conhecimento tácito em explícito e permitindo, na “passagem de bastão”, a transferência de experiência.

A Cadeia de Suprimentos e as Compras (*Procurement*) relacionadas também precisam ser analisadas. Neste caso, indústria, academia/ICTs e governo precisam firmar acordos e convênios que garantam o desenvolvimento de tecnologias e mercado para absorvê-las; que sejam identificados materiais e processos sob o regime de patente ou que sofram restrição de acesso por parte de exportadores. Avaliar o *trade-off* entre fazer e comprar, ou seja, a conveniência e oportunidade do desenvolvimento nacional frente à oferta externa. A análise não deve ser meramente econômico-financeira, pois deve pautar-se no caráter estratégico não só do setor nuclear, mas principalmente do fornecimento de energia elétrica, quando em fase operacional. Nesse quesito, as questões de geopolítica de materiais estratégicos e da geopolítica nuclear sobressaem.

A eficiência da 2ª Camada deve ser uma das preocupações centrais do Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil – SCTMB, criado para atender à sua Estratégia de CT&I (conforme a EMA-415) de modo a conduzi-la para a sua visão de Marinha do Amanhã e Marinha do Futuro. A filosofia da Tríplice Hélice do Conhecimento Científico pressupõe amplo envolvimento no PRONUCLEAR/PROTÓRIO, assim como na idealização e operacionalização de vários “nós” ou pontos de contato da cadeia de suprimentos, dadas as características dos materiais envolvidos, em boa parte classificados como estratégicos ou sensíveis.

A última camada encerra a expectativa de que, mais uma vez, possamos desenvolver internamente tecnologia na área nuclear. A comunidade científica que estuda tório dentro das universidades públicas brasileiras, mesmo com recursos escassos, assim como os profissionais dos ICTs associados às Forças Armadas, com destaque para a Marinha, e a rede da CNEN afirmam que, com acesso aos recursos necessários, é possível, para o Brasil, dominar o ciclo do combustível tório e construir reatores de tório no País. A história nos ensina que é impossível enclausurar a ciência. As tentativas inicialmente estadunidenses e, posteriormente do Clube Atômico de impedir acesso à ciência e tecnologia nuclear se provaram infrutíferas. Os países que a buscaram com afincos obtiveram êxito: este também é o caso do Brasil, que não só constrói ultracentrífugas para enriquecimento de urânio como desenvolve materiais para elementos combustíveis e para modernização das estruturas das usinas já existentes. Portanto, cabe aos especialistas da área nuclear construir tecnicamente um projeto e determinar, dentre as tecnologias de reatores nucleares, qual irá desenvolver e adotar. Como visto no Capítulo 2, a escolha do ciclo do combustível nuclear está intrinsicamente conectada ao modelo de reator.

Ainda dentro da escolha reator/ciclo do combustível, encontra-se a questão de tratamento de resíduos. A decisão entre o ciclo aberto e o ciclo fechado, bem como o aproveitamento de urânio empobrecido (DU) da CNAAA vão determinar a estratégia de destinação final. O reprocessamento de resíduos é desejado, mas precisa provar simultaneamente sua viabilidade técnica e econômica. Esse conjunto de escolhas irá afetar diretamente a questão de localização: como exemplo, um reator a sal fundido (Molten Salt Reactor – MSR) dispensa água de refrigeração, e pode ser construído *grosso modo* em qualquer região do território nacional. O Plano de Emergência irá se adequar às escolhas tecnológicas e de localização. Todavia, tanto a determinação da localização quanto a elaboração do Plano de Emergência, embora de cunho técnico, já dispõem de pessoal com expertise... hoje. O PROTÓRIO/PRONUCLEAR terá o papel de preservar e renovar essa expertise no País.

A Distribuição de Cores tem por objetivo facilitar a visualização. Os tons vermelho escuro e terra (alaranjado) foram deliberadamente escolhidos pelo grau de importância. Com a cor vermelha escura temos logo de início a Posição Nacional – se o novo projeto precisa demonstrar solidez e consistência, um posicionamento claro com ações coerentes com o discurso dará o tom das demais ações. Tendo em vista a competição por recursos orçamentários, depender apenas do Estado Brasileiro para desenvolver uma nova tecnologia pode gerar resistência no processo político de disputa. Conseqüentemente, o modelo econômico-financeiro misto pode representar uma saída interessante, se bem estruturado e administrado. Fato é que a ausência de recursos financeiros tem sido uma das principais razões para a interrupção de projetos. Em seguida vem o RH: sem um PROTÓRIO/PRONUCLEAR ou equivalente, corremos o risco de não ter pessoas preparadas no momento certo, aumentando a probabilidade de erros e acidentes – algo crítico em se tratando da área nuclear. Por fim, a tecnologia de reatores de tório e do ciclo do combustível tório – CCT. Aqui ultrapassamos a dúvida do “se” para adentrar na questão do “quando”. Nas décadas de 1960/1970, foi com essa linha de pensamento que o Brasil se decidiu pelo conceito do PWR. Será a vez do MSR? Talvez. Cabe ao corpo técnico especializado apresentar o conceito de reator de tório mais adequado para o País.

Na cor terra encontram-se pontos de atenção. Aqui, se frisa a questão dos marcos regulatórios e da independência do órgão regulador. A Lei 9.600 de 05/12/2018 que consolidou a Política Nuclear Brasileira representa um marco regulatório bastante recente. Por este motivo, a “(?)” no mapa convida para uma reflexão: é preciso um novo marco regulatório? Outro ponto a ser considerado, embora o autor se abstenha de entrar em detalhes, diz respeito ao papel da CNEN na estrutura regulatória nuclear: recomenda-se que seja revisto. A transparência pública tem sido cada vez mais exigida pela população e por *stakeholders* em várias áreas onde o Estado está presente. A comunicação proativa gera empatia e o histórico da área nuclear mostra que há muito espaço para melhoria. As demais cores seguem o padrão das respectivas camadas. A falta de destaque não deve conduzir a uma interpretação equivocada, como se tratando de tópicos secundários ou negligenciáveis. Os critérios adotados, embora possuam a sua lógica, são passíveis de crítica e de sugestões: não há “certo” ou “errado” – apenas opções e visões.

A diferença entre barras e setas apenas pressupõe nas primeiras tarefas com ciclo fechado (início-meio-fim) e, nas seguintes, tarefas de continuidade. Sua extensão no horizonte temporal deve adaptar-se ao cronograma de planejamento, sendo a apresentação atual apenas uma proposta. O horizonte temporal foi determinado com cautela e de modo conservador. Considerando que o presente trabalho seja um instrumento prático de apresentação da proposta

de construção de um reator de tório no Brasil, do momento da sua primeira apresentação até o comprometimento oficial – Posição Nacional – podem se somar meses e anos, e esta parece ser a situação mais provável. O governo chinês representado pela Academia de Ciências da China – CAS trabalha com Mapas Tecnológicos publicados em 2010/2011, com alvos até 2050, assim como Agência Internacional de Energia – IEA (NEA/OECD). Com relação à Marinha do Brasil, tanto a Marinha do Amanhã (MA) quanto a Marinha do Futuro (MF) poderiam estar associadas à escala de tempo do Mapa Tecnológico da figura 3.21. O Brasil seria capaz de realizar um projeto desta envergadura em menos tempo? Tecnicamente, é possível que sim. Politicamente, é preciso provar – a experiência nacional, infelizmente, aponta para outra direção.

Em suma, as principais contribuições deste trabalho podem ser descritas como:

1) Apresentação de uma Proposta para Desenvolvimento Tecnológico de reatores de Tório e do Ciclo do Combustível Tório a partir do referencial das políticas públicas necessárias para a sua consecução. Enquanto o debate nuclear permanecer restrito e hermético, os investimentos neste setor só farão sentido para o pequeno e seletivo grupo que enxerga na geração nucleoe elétrica uma solução adequada às necessidades energéticas nacionais, além das oportunidades econômicas para a saúde e outras aplicações pouco conhecidas pela população.

2) Divulgação e compartilhamento da ferramenta Mapa Tecnológico para estruturação, no Brasil, de propostas de políticas públicas em áreas tecnológicas. Espera-se que este trabalho ajude a disseminar o emprego desta ferramenta que o autor considera inclusiva e acessível. As diversas áreas do conhecimento, principalmente aquelas cujo conteúdo científico e tecnológico pode ser classificado com de alta ou média complexidade, podem se beneficiar ao fazer um esforço de simplificação na comunicação para permitir o efetivo diálogo e ampliar o debate.

3) Chamar a atenção para as lacunas, riscos ou oportunidades existentes no País, como o fato de possuir reservas importantes de tório e urânio: tendo sido prospectado apenas um terço do território nacional para minerais atômicos, abre-se a discussão para a possibilidade de flexibilização do monopólio nuclear – primeiramente na mineração, conforme divulgado pelo atual Ministro das Minas e Energia Almirante de Esquadra da Marinha do Brasil Bento Albuquerque (2019) em diversas situações registradas pela imprensa.

4) Registrar, através do Capítulo 1, a atualidade das questões geopolíticas, resgatando teóricos e suas contribuições. A geopolítica de materiais estratégicos assim como a geopolítica

nuclear fazem parte da agenda internacional dos países e o Brasil não foge à regra. Este é um assunto estratégico do qual nenhum país deve se descuidar.

5) Registrar, através do Capítulo 2, o processo de construção do conhecimento sobre a energia nuclear, erros e acertos e a importância da construção do conhecimento científico e tecnológico através da pesquisa sistemática. No caso da área nuclear, aplica-se literalmente a máxima de Francis Bacon (1561-1626): Conhecimento é Poder.

6) Os Capítulos 1 e 2 desmistificam a Geopolítica e a Tecnologia Nuclear, podendo ser úteis no Curso de Estado-Maior para Oficiais Intermediários – C-EMOI, da Escola de Guerra Naval – EGN. Ambos os assuntos fazem parte da formação de oficiais da Marinha do Brasil, e a linguagem mais acessível pode contribuir para romper o hermetismo geralmente associado a estes conteúdos, na preparação da Marinha do Amanhã e da Marinha do Futuro.

7) Caso o País opte efetivamente por desenvolver hoje ou, em futuro próximo, a tecnologia do CCT e de reatores de tório, encontrará neste trabalho uma metodologia pronta e disponível.

Ainda, há bastante espaço para aprofundamento e detalhamento do mapa tecnológico. Cada camada, linha e tópico possui espaço para ser explorado e debatido. Alguns assuntos podem gerar artigos; outros, desdobrados em uma monografia, dissertação ou mesmo tese de doutorado. Somente o arcabouço jurídico, legislativo e regulatório já encerra uma vasta discussão. As fontes de financiamento, formas de parceria, estruturação da cadeia de suprimentos ou o detalhamento de projeto de um reator de tório são sugestões de assuntos a serem pesquisados e, talvez, gerarem seu próprio mapa tecnológico.

## REFERÊNCIAS

AHLQVIST, Toni *et al.* **Innovation policy roadmapping as a systemic instrument for forward-looking policy design.** *Science and Public Policy*, Vol. 39, Tema 2, p. 178–190, Mar. 2012. Disponível em: <<https://academic.oup.com/spp/article-abstract/39/2/178/1618885>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

ALPEROVITZ, Car. **Diplomacia Atômica: o uso da bomba atômica e o confronto do poder americano com o soviético.** Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército & Editora Saga, 1969.

\_\_\_\_\_. **The Decision To Use The Atomic Bomb.** New York: Alfred A. Knopf. Inc., 1995.  
ANL. Argonne National Laboratory. EBR-I Light Bulbs. Disponível em: <<https://www.anl.gov/media/776?width=&height=>>>. Acesso em: 09 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. **Nuclear Engineering Division.** 21 fev. 2019. Disponível em: <<https://www.ne.anl.gov/About/ANL-Reactors.shtml>>. Acesso em: 09 ago. 2019.

ANM. Agência Nacional de Mineração. Sumário Mineral Brasileiro 2012. V. 2. Fev. 2013. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2012/view>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

ARGENTIÈRE, Rômulo. **Urânio e Tório no Brasil.** São Paulo: Ed. Lep, 1954.

BARRÉ, Bertrand *et al.* **Nuclear Reactor Systems: A technical, historical and dynamic approach.** France: EDP Sciences, 2016.

BERNSTEIN, Jeremy. **Plutonium: A History of the World's Most Dangerous Element.** Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 2007.

BONOTTO, Daniel M. **Radioatividade nas Águas: Da Inglaterra ao Guarani.** São Paulo: Editora UNESP, 2004.

BRASIL. Decreto nº 1.246, de 16 de setembro de 1994. Promulga o Tratado para a Proscrição das Armas Nucleares na América Latina e no Caribe (Tratado de Tlatelolco), concluído na Cidade do México, em 14 de fevereiro de 1967 [...]. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 set. 1994. p. 14093.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 2.864, de 7 de dezembro de 1998. Promulga o Tratado sobre a Não-Proliferação de Armas Nucleares, assinado em Londres, Moscou e Washington, em 1º de julho de 1968. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 dez. 1998. p. 12.

\_\_\_\_\_. **Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil – EMA-415.** Comando da Marinha. Estado-Maior da Armada. Brasília, 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dgdntm/node/116>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Portaria nº 1.405, de 29 de dezembro de 2014. Publica a atualização das Listas de Controle de Exportação de Bens Relacionados a Equipamento, Material e Tecnologia Nuclear e a Equipamento e Material de Uso Duplo e

Tecnologia Relacionada, de Aplicação na Área Nuclear. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 jan. 2015. Edição 4, Seção 1, p. 3.

\_\_\_\_\_. Ministério da Defesa. **Glossário das Forças Armadas**. MD35-G-01. 2007. Disponível em: <[https://www.defesa.gov.br/arquivos/File/legislacao/emcfa/publicacoes/md35\\_g\\_01\\_glossario\\_fa\\_4aed2007.pdf](https://www.defesa.gov.br/arquivos/File/legislacao/emcfa/publicacoes/md35_g_01_glossario_fa_4aed2007.pdf)>. Acesso em 13 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Ministério da Defesa. **Doutrina Básica de Mobilização Nacional**. 1987. Disponível em: <[https://www.defesa.gov.br/arquivos/File/legislacao/emcfa/publicacoes/dbmn\\_doutrinabasicademobilizacao nacional.pdf](https://www.defesa.gov.br/arquivos/File/legislacao/emcfa/publicacoes/dbmn_doutrinabasicademobilizacao nacional.pdf)>. Acesso em: 30. maio 2019.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**: v. 3; 7. Geração hidrelétrica. Brasília: MME. EPE, 2007.

\_\_\_\_\_. **Minuta do Livro Branco da Defesa Nacional**. 2016. Disponível em: <[http://www.defesa.gov.br/arquivos/2017/mes03/livro\\_branco\\_de\\_defesa\\_nacional\\_minuta.pdf](http://www.defesa.gov.br/arquivos/2017/mes03/livro_branco_de_defesa_nacional_minuta.pdf)>. Acesso em: 02 jul. 2017.

\_\_\_\_\_. **II PND: II Plano Nacional de Desenvolvimento (1975-1979)**. Disponível em: <[http://www.biblioteca.presidencia.gov.br/publicacoes-oficiais/catalogo/geisel/ii-pnd-75\\_79/view](http://www.biblioteca.presidencia.gov.br/publicacoes-oficiais/catalogo/geisel/ii-pnd-75_79/view)>. Acesso em: 19 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **Portaria Interministerial MME/MCT nº 614, de 30/06/2010 – DOU 05/07/2010**. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-federal/portarias/portarias-interministeriais/2010&item=pinterm-614--2010&export=pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **Projetos Estratégicos da Marinha**. Ministério da Defesa. Disponível em: <<https://www.defesa.gov.br/industria-de-defesa/paed/projetos-estrategicos/projetos-estrategicos-da-marinha-do-brasil>>. Acesso em: 07 out. 2019.

BRZEZINSKI, Zbigniew K. **The Grand Chessboard: American Primacy and its Geostrategic Imperatives**. New York: Basic Books, 1998.

CAMARGO, Guilherme. **O Fogo dos Deuses: Uma História da Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.

CARVALHO, Regina P. de; OLIVEIRA, Silvia Maria Velasques de. **Aplicações da energia nuclear na saúde**. São Paulo: SBPC; Viena: IAEA, 2017. Disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearna saude.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

CASSIDY, David C. **Beyond Uncertainty: Heisenberg, Quantum Physics, And The Bomb**. Bellevue Literary Press: New York, 2009.

CEA. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. **Nuclear Reactors**. 2016. Disponível em: <<http://www.cea.fr/english/Documents/thematic-publications/cea-nuclear-reactors.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2019.

CHEN, Hesheng (Ed.). **Large Research Infrastructures Development in China: A Roadmap to 2050**. Chinese Academy of Science. Beijing: Springer, 2011.

CHEN, Yong (Ed.). **Energy Science & Technology in China: A Roadmap to 2050**. Chinese Academy of Science. Beijing: Springer, 2010.

CLINE, Ray S. **World Power Assessment: A Calculus of Strategic Drift**. Boulder, Colorado, US: Westview Press, 1975.

CNEN. **Glossário de Segurança Nuclear**. MCTI. Set. 2015. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

\_\_\_\_\_. **Glossário De Termos Usados em Energia Nuclear**. Disponível em: <[http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/glossario\\_tecnico.pdf](http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/glossario_tecnico.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2019.

\_\_\_\_\_. **História da Energia Nuclear**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. **Programa Política Nuclear: PPA 2016–2019 E LOA 2016**. Jan. 2016. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/planejamento/ProgramaPoliticaNuclear-PPA-2016-2019.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

CNSC. Canada Nuclear Safety Commission. **Canada's Historical Role in Developing Nuclear Weapons**. 28 mai. 2012. Disponível em: <<https://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/Canadas-contribution-to-nuclear-weapons-development.cfm>>. Acesso em: 15 set, 2019.

COHEN, Saul B. **Geopolitics: The Geography of International Relations**. 3 ed. Maryland, US: Rowman & Littlefield, 2015.

COMSAN, N. M. H. **Status of Nuclear Power Reactor Development. 2007**. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/081/40081069.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/081/40081069.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2019.

CONANT, Melvin A.; GOLD, Fern R. **A Geopolítica Energética**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1981.

COUTAU-BÉGARIE, Hervé. **Tratado de Estratégia**. Rio de Janeiro: EGN, 2010.

CROSSLAND, Ian. **Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering**. UK: Woodhead Publishing Limited, 2012.

CRUZ, Anderson W. da. **Monitoramento e Diagnóstico em Usinas Nucleares PWR Utilizando a Análise Exergética**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Minas Gerais, 2016. Disponível em: <[https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/656/dissertacao\\_cruz\\_2016.pdf?sequence=1](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/656/dissertacao_cruz_2016.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CHURCHILL, Winston S. **Memórias da Segunda Guerra Mundial**. v. 1 e 2 (2 volumes). Rio de Janeiro: HarperCollins, 2017.

DAS, D.; BHARADWAJ, S.R. **Thoria-based Nuclear Fuels**. London: Springer-Verlag, 2013.

**DLA:** Defense Logistics Agency: The Nation's Combat Logistics Support Agency. Disponível em: <<https://www.dla.mil/HQ/Acquisition/StrategicMaterials/>>. Acesso em: 24 fev. 2019.

DINITTO, Diana M. **Social Welfare: Politics and Public Policy**. 7. ed. Boston, Massachusetts: Pearson Education, 2011.

DOE. **The First Reactor**. DOE/NE-0046. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Energy, 1982. Disponível em: <<https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20First%20Reactor.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2019.

DYE, Thomas R. **Policy Analysis: What Governments Do, Why They Do It, and What Difference It Makes**. Tuscaloosa: University of Alabama Press, 1984. Chapter One. Disponível em: <<http://politicaspUBLICAS.weebly.com/uploads/5/3/9/6/5396788/dye.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

**ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA**. Disponível em: <<https://www.britannica.com>>. Acesso em: 2018-2019.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2018: Relatório Síntese**. Ano Base 2017. Maio de 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 25 fev. 2019.

ESG. **Escola Superior de Guerra (1949-2014): 65 Anos de História**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/79016974-Escola-superior-de-guerra-65-anos-de-historia.html>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

ETZKOWITZ, Henry. **The Triple Helix: University–Industry–Government Innovation in Action**. New York: Routledge, 2008.

FREY, Klaus. **Políticas Públicas: um debate conceitual e reflexões referentes à prática da análise de políticas públicas no Brasil**. IPEA: Planejamento e Políticas Públicas – PPP, 2000. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/89/158>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

FREITAS, Jorge M. da C. **A Escola Geopolítica Brasileira: Golbery do Couto e Silva, Carlos de Meira Mattos e Therezinha de Castro**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 2004.

GALETTI, Diógenes. **Energia Nuclear: com fissões e fusões**. São Paulo: Ed. UNESP, 2010.

GANGULY, Sumit; MUKHERJI, Rahul. **A Índia desde 1980**. Rio de Janeiro: Apicuri, 2014.

GIF, **Generation IV International Forum**. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9261/home](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9261/home)>. Acesso em: 27 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems**. 28. Aug. 2009. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_43526/2009-rd-outlook](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_43526/2009-rd-outlook)>. Acesso em: 29 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems:** 2018 Update. 12 Jun. 2019. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_108744/7411-gif-r-and-d-outlook-update-web](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_108744/7411-gif-r-and-d-outlook-update-web)>. Acesso em: 29 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Preparing the Future for Innovative Nuclear Technology:** Outlook for Generation IV Technologies. 14. Jan. 2019. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_104633/preparing-the-future-through-innovative-nuclear-technology-web](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_104633/preparing-the-future-through-innovative-nuclear-technology-web)>. Acesso em: 29 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems:** Ten Nations Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs. GIF-002-00. Dez. 2002. Disponível em: <<https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems.** Jan. 2014. NEA. OECD. Generation IV International Forum. Disponível em: <<https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle:** How should Thorium be considered in The GIF Position paper prepared by the GIF Experts' Group. 23. Dez. 2010. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-10/gif\\_egthoriumpaperfinal.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-10/gif_egthoriumpaperfinal.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2019.

GOLDBERG, Stephen M.; ROSNER, Robert. **Nuclear Reactors:** Generation to Generation. Cambridge, MA: American Academy of Arts and Sciences, 2011.

GRIPPI, Sidney. **Energia Nuclear:** os bastidores do programa nuclear brasileiro e seus reflexos na sociedade e na economia nacional. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

GRIGSBY, Ellen. **Analysing Politics:** An Introduction to Political Science. 4 ed. Wadsworth, Cengage Learning: Belmont, California, 2009.

GUILHERME, Olympio. **O Brasil e a Era Atômica.** Rio de Janeiro: Ed. Vitória, 1957.

GUIMARÃES, Leonam dos S. “*Nuclear energy in the Brazilian energy mix and future demand: Eletronuclear's Top Five Projects*”. *World Nuclear Spotlight Brazil*, Rio de Janeiro, abr. 2019. Disponível em: [https://www.eiseverywhere.com/file\\_uploads/c7ea1e6fca2c63501af7e58537953e2d\\_Leonam\\_Guimaraes\\_Eletronuclear\\_Top\\_Five\\_Projects.pdf](https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/c7ea1e6fca2c63501af7e58537953e2d_Leonam_Guimaraes_Eletronuclear_Top_Five_Projects.pdf). Acesso em: 08 set. 2019.

HABASHI, Fathi. **Niepce de Saint-Victor and The Discovery of Radioactivity.** Bull. Hist. Chem., Vol. 26, Number 2. 2001. Disponível em: <[http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin\\_open\\_access/v26-2/v26-2%20p104-105.pdf](http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/v26-2/v26-2%20p104-105.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2019.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física:** óptica e física moderna. vol. 4. 10. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARGRAVES, R. **Tório:** Energia Abundante e Acessível. Ed. Createspace I. P. P., 2015.

\_\_\_\_\_. **Thorium:** Energy cheaper than coal. Hannover: Copyright Robert Hargraves, 2012.

HAROLDSEN, Ray. **The Story of the Borax Nuclear Reactor and the EBR-I Meltdown**. Idaho Falls, Idaho: 2008. Disponível em: <<https://www.ne.anl.gov/pdfs/reactors/Story-of-BORAX-Reactor-by-Ray-Haroldsen-v2.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2019.

HEILBRON, John L. **Ernest Rutherford and the Explosion of Atoms**. New York, EUA: Oxford University Press, 2003.

HILL, Arthur V. **The Encyclopedia of Operations Management**. New Jersey: Pearson Education, 2012.

HOBSBAWN, Eric. **Era dos Extremos: o breve século XX: 1914-1991**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Decommissioning Plan for UK's First Nuclear Power Plants Passes International Peer Review**. 29 out. 2012. Disponível em: <<https://www.iaea.org/newscenter/news/decommissioning-plan-uks-first-nuclear-power-plants-passes-international-peer-review>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. **Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries**. INPRO. SYNERGIES. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/04/synergies-2019.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Establishing the Infrastructure for Radiation Safety**. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1773\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1773_web.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development**. IAEA Nuclear Energy Series. No. NG-T-3.2 (Rev. 1). 2016. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1737\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1737_web.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **From Obninsk Beyond: Nuclear Power Conference Looks to Future**. 24 jun. 2004. Disponível em: <<https://www.iaea.org/newscenter/news/obninsk-beyond-nuclear-power-conference-looks-future>>. Acesso em: 09 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. **Guidebook on the Introduction of Nuclear Power**. Technical Report Series no. 217. Jul. 1982. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/13/715/13715480.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/13/715/13715480.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power**. IAEA Nuclear Energy Series. No. NG-G-3.1 (Rev. 1). 2015. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1704\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1704_web.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Model Protocol Additional to the Agreement(s) Between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards**. INFC1RC/540. Sep. 1997. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc540c.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

\_\_\_\_\_. **Nuclear Power Reactors in the World**. 2019. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. **Operating Experience with Power Reactors**. vol.1. 1963. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/064/44064225.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/064/44064225.pdf?r=1&r=1)>. Acesso em: 19 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **Roadmap towards a National Cancer Control Programme**. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/10/milestones-document-2019.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

IEA. **Nuclear Energy**. Ed. 2015a. NEA. OECD. Disponível em: <<http://www.oecd-nea.org/pub/techroadmap/techroadmap-2015-foldout-a3.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmaps: Nuclear Energy**. Ed. 2010. NEA. OECD. Disponível em: <<http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2010/nea6962-nuclear-roadmap.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmaps: Nuclear Energy**. Ed. 2015b. NEA. OECD. Disponível em: <<http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7257-techroadmap-2015.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Nuclear Power Reactors in the World**. Reference Data Series no 2. 2019 Ed. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2019.

\_\_\_\_\_. **Technology Roadmap: Nuclear Energy 2015**. Disponível em: <<https://webstore.iaea.org/technology-roadmap-nuclear-energy-2015>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Thorium fuel cycle: Potential benefits and challenges**. TECDOC-1450. Viena, Áustria: Maio, 2005. Disponível em: <[https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1450\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2018.

\_\_\_\_\_. **Uranium 2016: Resources, Production and Demand**. NEA No. 7301. OECD: Março, 2017. Disponível em: <<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

INB, **Indústrias Nucleares do Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/>>. Acesso em: 27 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **Análise de Metas e Resultados do Plano de Negócios de 2018**. 2018a. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Portals/0/Conteudo/Images/e04826fe-a917-47fc-a22c-9533b37cdb89.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Carta Anual de Políticas Públicas e Governança Corporativa 2018**. 2018b. Disponível em: <<https://www.inb.gov.br/Portals/0/Conteudo/Images/97874efb-dcf2-4520-920a-dd0efc877cce.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

\_\_\_\_\_. **Relatório Integrado 2018**. 2018c. Disponível em: <[https://www.inb.gov.br/Portals/0/Documentos/rel\\_gestao\\_2018.pdf](https://www.inb.gov.br/Portals/0/Documentos/rel_gestao_2018.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2019.

IPFM. **A Report on the International Control of Atomic Energy (Acheson-Lilienthal Report)**. Disponível em: <<http://fissilematerials.org/library/ach46.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. **The Franck Report**. Disponível em: <<http://fissilematerials.org/library/fra45.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2019.

JORDAN, Brett W. *et al.* **Thorium**: Cristal abundance, joint production, and economic availability. *Resources Policy* 44 (2015) 81–93. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420715000185>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

KAMEI, Takashi. **Recent Research of Thorium Molten-Salt Reactor from a Sustainability Viewpoint**. *Sustainability* 2012, 4, 2399–2418. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/4/10/2399htm>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

KAMDAR, MIRA. **Planeta Índia**: a ascensão turbulenta de uma nova potência global. Rio de Janeiro: Agir, 2008.

KAPLAN, Robert D. **A Vingança da Geografia**: a construção do mundo geopolítico a partir da perspectiva geográfica. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

KARPAS, Zeev. **Analytical Chemistry of Uranium**: environmental, forensic, nuclear, and toxicological applications. 300. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.

KIERNAN, Denise. **As Garotas da Cidade Atômica**. São Paulo: Benvirá, 2015.

KLARE, Michael T. **The Race For What's Left**: The Global Scramble For The World's Last Resources. New York, US: Picador, 2013.

KNOLL, Glen F. **Radiation Detection and Measurement**. 4 ed. Michigan, US: Wiley, 2010.

KORYBKO, Andrew. **Guerras Híbridas**: das revoluções coloridas aos golpes. São Paulo: Expressão Popular, 2018.

KURIAN, George T. (Ed.). **The Encyclopedia of Political Science**. Washington, DC: CQ Press, 2011.

LACOSTE, Yves. **Géopolitique**: La longue histoire d'aujourd'hui. Espagne: Larousse, 2012.

L'ANNUNZIATA, Michael F. **Radioactivity**: Introduction and History, From the Quantum to Quarks. Second Edition. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016.

LEITE, Antonio D. **A Energia do Brasil**. 2. ed. ver. e atual. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LU, Ke et al. **Advanced Materials Science & Technology in China**: A Roadmap to 2050. Chinese Academy of Science. Beijing: Springer, 2010.

MACKINDER, Halford. **The Geographical Pivot of History (1904)**. *The Geographical Journal*, Vol. 170, No. 4, Dec. 2004, pp. 298–321. Disponível em: <[https://www.iwp.edu/docLib/20131016\\_MackinderTheGeographicalJournal.pdf](https://www.iwp.edu/docLib/20131016_MackinderTheGeographicalJournal.pdf)>. Acesso em: 02 mar. 2019.

*MACMILLAN English Dictionary for advanced learners. New Edition* [3rd], 2012.

MAFRA, Roberto M. de O. **Geopolítica**: introdução ao estudo. São Paulo: Sicurezza, 2006.

MALHEIROS, Tania. **Bomba Atômica! pra quê?** Brasil e energia nuclear. Lacre, 2018.

MALLEA, Rodrigo *et al* (ed.). **Origens da Cooperação Nuclear**: uma história oral crítica entre Argentina e Brasil. Rio de Janeiro: FGV, 2012.

MARGULIES, Phillip. **Nuclear Nonproliferation**. US: Facts on File, 2008. Global Issues. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.

MARQUES, Paulo Q. **Sofismas Nucleares**: o jogo das trapaças na política nuclear do país. São Paulo: Hucitec, 1992.

MARTIN, R. **Superfuel**: Thorium, the green energy source for the future. New York: Palgrave Macmillan, 2012.

MATTOS, Carlos de M. **Brasil, geopolítica e destino**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, J. Olympio, 1975.

MERLE, Elsa. **Concept of European Molten Salt Fast Reactor (MSFR)**. GIF IV International Forum. CNRS-IN2P3-LPSC. Grenoble Institute of Technology – UGA. France. May 23, 2017. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_92222/webinar-series-9-molten-salt-reactors-msr-dr-elsa-merle?details=true](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_92222/webinar-series-9-molten-salt-reactors-msr-dr-elsa-merle?details=true)>. Acesso em: 26 set. 2019.

MICHEL-SENDIS, Franco. **On Thorium as Nuclear Fuel**: general considerations. GIF IV International Forum. OECD Nuclear Energy Agency. July 12, 2017. Disponível em: <[https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_92509/franco-michel-sendis-thorium-webinar-flyer](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_92509/franco-michel-sendis-thorium-webinar-flyer)>. Acesso em: 26 set. 2019.

MOEHRLE, Martin G.; ISENMANN, Ralf; PHAAL, Robert (Eds.). **Technology Roadmap for Strategy and Innovation**. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 2013.

MUREDDU, Francesco *et al*. **A New Roadmap for Next-Generation Policy-Making**. ICEGOV, Albany, New York, USA, p. 62-66, out. 2012. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/contributions-conferences/new-roadmap-next-generation-policy-making>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

NERAC. **Long-Term Nuclear Technology Research and Development Plan**. Jun. 2000. Disponível em: <<https://www.energy.gov/sites/prod/files/LTRDP-Final.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

NYE, Joseph S. **Cooperação e Conflito nas Relações Internacionais**. São Paulo: Editora Gente, 2009.

OBNINSK: **First nuclear plant to produce commercial electricity in 1954**. ENERGY GLOBAL NEWS. 23 fev. 2019. Disponível em: <<http://www.energyglobalnews.com/1954->

obninsk-nuclear-plant-produces-worlds-first-commercial-electricity/>. Acesso em: 10 ago. 2019.

OECD. NEA. **JANIS**. Disponível em: <<http://www.oecd-neo.org/janis/download.html>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

*OXFORD Dictionary. First Edition, 2015.*

PATARIN, Louis (Coord.). **Le Cycle Du Combustible Nucléaire**. Coléction Génie Atomique. France: EDP Sciences, 2002.

PATTI, Carlos. **O programa nuclear brasileiro: uma história oral**. 1. ed. digital. Rio de Janeiro: FGV-CPDOC, 2014. Disponível em: <<https://ri.fgv.br/pesquisa/brasil-e-argentina-na-ordem-nuclear-global/livro-o-programa-nuclear-brasileiro-uma-historia-oral>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

PEREIRA, Carlos P. F. **Geopolítica Mundial e do Brasil no Século XXI: o improvável é possível**. Porto Alegre: Martins Livreiro-Editora, 2017.

PERROTTA, José A. **Curso de Introdução à Engenharia do Núcleo de Reatores**. Jul. 1999. IPEN. Disponível em: <[https://www.ipen.br/portal\\_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf](https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2019.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. **Developing a Technology Roadmapping System**, Proceedings of the 2005 PICMET, Portland, 2005. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.2248&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 12 out. 2019.

PIORO, Igor L. **Handbook of Generation IV Nuclear Reactors**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2016.

QUIGLEY, Carroll. **Tragedy and Hope: A History of the World in our Time**. Nova York: Macmillan, 1966.

QUINN, Susan. **Marie Curie: a Life**. Plunkett Lake Press, 2011.

REFLETS DE LA PHYSIQUE. vol. 11. out. 2008. p. 17-19. **Histoire des sciences: Frédéric Joliot-Curie et la première pile atomique française**. Disponível em: <[https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2008/04/refdp\\_11.pdf](https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2008/04/refdp_11.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2019.

REVOL, J.-P. et al. **Thorium Energy for the World: Proceedings of the ThEC13 Conf.**, CERN, Globe of Science and Innovation. Geneva, Switz., Oct 27-31, 2013: Springer, 2016.

RHODES, Richard. **The Making of the Atomic Bomb**. New York: Simon & Schuster, 1988.

ROCHA FILHO, Álvaro e GARCIA, João C. V. **Renato Archer: energia atômica, soberania e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.

ROSATOM. **The VVER Today: evolution, design, safety**. Disponível em: <<https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2019.

SALLES, Dagoberto. **Energia Atômica: um inquérito que abalou o Brasil**. São Paulo: Editora Fulgor, 1958.

SANDSTRÖM, S. (Ed.). **Operating Experience at the AGESTA Nuclear Power Station**. AE-246. Aktiebolaget Atomenergi: Stockholm, Sweden 1966. Disponível em: < <https://www.ipen.br/biblioteca/rel/R43.pdf>>. Acesso em 15 set. 2019.

SHELDON, Garrett W. **Encyclopedia of Political Thought**. New York: Facts On File, 2001.

SPEKTOR, Matias. **Kissinger e o Brasil**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2009.

SEITENFUS, Ricardo A.S. **Manual das Organizações Internacionais**. 6. ed. rev., atual. e amp. Porto Alegre: Livraria dos Advogados Editora, 2016.

STRATHERN, Paul. **Bohr e a Teoria quântica em 90 minutos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1999.

\_\_\_\_\_. **Curie e a radioatividade em 90 minutos**. Rio de Janeiro: Zahar, 2000.

\_\_\_\_\_. **O Sonho de Mendeleiev**. Rio de Janeiro: Zahar, 2002.

STINNETT, Robert B. **Day of Deceit: The Truth about FDR and Pearl Harbor**. Nova York: Touchstone, 2001.

SULLIVAN, Neil J. **The Prometheus Bomb: The Manhattan Project and Government in the Dark**. Lincoln, Nebraska, US: Potomac Books, 2016.

TALEB, Nassim N. **A Lógica do Cisne Negro: o impacto do altamente improvável**. 9. ed. Rio de Janeiro: Best Business, 2015.

TODOSOW, M. *et al.* **The Indian Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) and Non-Proliferation Attributes**. Brookhaven National Laboratory. BNL-98372-2012. Ago. 2012. Disponível em: < <https://www.bnl.gov/isd/documents/79014.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2019.

TOLMASQUIM, Maurício T. (coord.). **Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%202013maio2016.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

TOLMASQUIM, Alfredo T. **Einstein: O viajante da relatividade na América do Sul**. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2003.

UN. UNITED NATIONS. **General Assembly: resolutions adopted by the general assembly during its first session**. Disponível em: <<https://www.un.org/documents/ga/res/1/ares1.htm>>. Acesso em: 24 fev. 2019.

\_\_\_\_\_. **Guidelines for Application of the United Nations: Framework Classification for Resources (UNFC) to Uranium and Thorium Resources**. UNECE Energy Series nº 55. ECE: New York and Geneva, 2017.

VAL, Sylvio dos S. **O Périplo do Cisne Negro: poder; política e tecnologia na Marinha do Brasil**. Rio de Janeiro: Gramma, 2016.

VON SCHIRACH, Richard. **The Night of the Physicists: Operation Epsilon: Heisenberg, Hahn, Weizsäcker and the German Bomb**. Haus Publishing: London, 2014.

WILLYARD, Charles H.; MCCLEES, Cheryl W. **Motorola's Technology Roadmap Process**. *Research Management*, 30:5, p. 13-19. 1987. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00345334.1987.11757057?journalCode=urtm19>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

WINEBRAKE, James J. **Technology Roadmaps as a Tool for Energy Planning and Policy Decisions**. *Energy Engineering Journal*. Vol. 101. Tema. 4. p. 20-36. 2004. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01998590409509271>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

WNA. World Nuclear Association. **Advanced Nuclear Power Reactors**. 2019. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em: 16 set. 2019.

\_\_\_\_\_. **Aps1 Obninsk, Russia**. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/reactor/default.aspx/APS-1%20OBNINSK>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

\_\_\_\_\_. **Nuclear Development in the United Kingdom**. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/appendices/nuclear-development-in-the-united-kingdom.aspx>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

YASUNAGA, Yuko *et al.* **Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence**. *Technological Forecasting & Social Change*. Elsevier. Vol. 76, Tema 1, p. 61-79, Jan. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162508001704>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

YERGIN, Daniel. **O Petróleo: uma história de ganância, dinheiro e poder**. São Paulo: Scritta, 1992.

ZOHURI, Bahman. **Neutronic Analysis for Nuclear Reactor Systems**. Switzerland: Springer, 2017.

## Apêndice 1

### Tabela Periódica x Carta de Nuclídeos

Figura Ap1.1 – Versão da Tabela Periódica com a média dos pesos atômicos.

**Tabela periódica**



3 — número atômico  
 Li — símbolo químico  
 lítio — nome  
 6,94 — peso atômico (massa atômica relativa)

1 H hidrogênio 1,008																	2 He hélio 4,0026
3 Li lítio 6,94	4 Be berílio 9,0122															10 Ne neônio 20,180	
11 Na sódio 22,990	12 Mg magnésio 24,305															18 Ar argônio 39,95	
19 K potássio 39,098	20 Ca cálcio 40,078(4)	21 Sc escândio 44,956	22 Ti titânio 47,867	23 V vanádio 50,942	24 Cr cromio 51,996	25 Mn manganês 54,938	26 Fe ferro 55,845(2)	27 Co cobalto 58,933	28 Ni níquel 58,693	29 Cu cobre 63,546(3)	30 Zn zinco 65,38(2)	31 Ga gálio 69,723	32 Ge germânio 72,630(8)	33 As arsênio 74,922	34 Se selênio 78,971(8)	35 Br bromo 79,904	36 Kr criptônio 83,796(2)
37 Rb rubídio 85,468	38 Sr estrôncio 87,62	39 Y ítrio 88,906	40 Zr zircônio 91,224(2)	41 Nb nióbio 92,906	42 Mo molibdênio 95,95	43 Tc tecnécio	44 Ru rutênio 101,07(2)	45 Rh ródio 102,91	46 Pd paládio 106,42	47 Ag prata 107,87	48 Cd cádmio 112,41	49 In índio 114,82	50 Sn estanho 118,71	51 Sb antimônio 121,76	52 Te telúrio 127,60(3)	53 I iodo 126,90	54 Xe xenônio 131,29
55 Cs césio 132,91	56 Ba bário 137,33	57 a 71 Lanthanides	72 Hf hafnínio 178,49(2)	73 Ta tântalo 180,95	74 W tungstênio 183,84	75 Re rênio 186,21	76 Os ósio 190,23(3)	77 Ir íridio 192,22	78 Pt platina 195,08	79 Au ouro 196,97	80 Hg mercúrio 200,59	81 Tl tálio 204,38	82 Pb chumbo 207,2	83 Bi bismuto 208,98	84 Po polônio	85 At astato	86 Rn radônio
87 Fr frâncio	88 Ra rádio	89 a 103 Actinides	104 Rf rutherfordório	105 Db dúbnio	106 Sg seabórgio	107 Bh bóhrio	108 Hs hássio	109 Mt meitnério	110 Ds darmstádio	111 Rg roentgênio	112 Cn copernício	113 Nh nihônio	114 Fl fleróvio	115 Mc moscóvio	116 Lv livermório	117 Ts tenesso	118 Og oganessônio
			57 La lantânio 138,91	58 Ce cério 140,12	59 Pr praseodímio 140,91	60 Nd neodímio 144,24	61 Pm promécio	62 Sm samário 150,36(2)	63 Eu europio 151,96	64 Gd gadolínio 157,25(3)	65 Tb terbio 158,93	66 Dy disprósio 162,50	67 Ho hólmio 164,93	68 Er érbio 167,26	69 Tm tulio 168,93	70 Yb ítrio 173,05	71 Lu lutécio 174,97
			89 Ac actínio	90 Th tório 232,04	91 Pa protactínio 231,04	92 U urânio 238,03	93 Np neptúnio	94 Pu plutônio	95 Am américio	96 Cm cúrio	97 Bk berquílio	98 Cf califórnio	99 Es einstênio	100 Fm fêrmio	101 Md mendelévio	102 No nobélio	103 Lr laurêncio

www.tabelaperiodica.org  
Licença de uso Creative Commons BY-NC-SA 4.0 - Use somente para fins educacionais  
Caso encontre algum erro favor avisar pelo mail luisbrudna@gmail.com  
Versão IUPAC/SBQ (pt-br) com 5 algarismos significativos, baseada em DOI:10.1515/pac-2015-0305 - atualizada em 19 de março de 2019

Fonte: Disponível em: <<https://www.tabelaperiodica.org/wp-content/uploads/2019/03/Tabela-completa-5-algarismos-sem-intervalo-v6.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

A Tabela Periódica representa todos os 118 átomos neutros de todos os isótopos dos elementos químicos. O valor de nº de massa ou peso atômico na Tabela Periódica sempre foi uma média ponderada das massas dos diversos isótopos existentes na natureza, ou seja, um valor proporcional à sua ocorrência – considerada hoje uma versão simplificada. A versão mais atualizada da Tabela Periódica e mais completa proporciona um intervalo de pesos atômicos para alguns elementos, conforme figura Ap1.2.

A Tabela Periódica atende, em geral, as necessidades dos químicos, mas não as dos físicos, em especial dos profissionais que trabalham com fissão ou fusão nuclear e estão mais interessados no que acontece no núcleo atômico. Assim sendo, para visualizarmos cada isótopo diferente conhecido de cada elemento químico (ou seja, cada nuclídeo existente), utilizamos uma Carta de Nuclídeos.

Figura Ap1.2 – Versão da Tabela Periódica com intervalos dos pesos atômicos.

## Tabela periódica



3 — número atômico  
 Li — símbolo químico  
 lítio — nome  
 [6,938 - 6,997] — peso atômico (massa atômica relativa)

1 H hidrogênio (1,0078 - 1,0082)	2 He hélio 4,0026																
3 Li lítio (6,938 - 6,997)	4 Be berílio 9,0122																
11 Na sódio 22,99	12 Mg magnésio (24,304 - 24,307)																
19 K potássio 39,098	20 Ca cálcio 40,078(4)	21 Sc escândio 44,956	22 Ti titânio 47,887	23 V vanádio 50,942	24 Cr cromio 51,996	25 Mn manganês 54,938	26 Fe ferro 55,845(2)	27 Co cobalto 58,933	28 Ni níquel 58,693	29 Cu cobre 63,546(3)	30 Zn zinco 65,38(2)	31 Ga gálio 69,723	32 Ge germânio 72,630(8)	33 As arsênio 74,922	34 Se selênio 78,971(8)	35 Br bromo (79,901 - 79,907)	36 Kr criptônio 83,798(2)
37 Rb rubídio 85,468	38 Sr estrôncio 87,62	39 Y ítrio 88,906	40 Zr zircônio 91,224(2)	41 Nb nióbio 92,906	42 Mo molibdênio 95,95	43 Tc tecnécio	44 Ru rútenio 101,07(2)	45 Rh ródio 101,92	46 Pd paládio 106,42	47 Ag prata 107,87	48 Cd cádmio 112,41	49 In índio 114,82	50 Sn estanho 118,71	51 Sb antimônio 121,76	52 Te telúrio 127,60(3)	53 I iodo 126,90	54 Xe xenônio 131,29
55 Cs césio 132,91	56 Ba bário 137,33	57 a 71 Lanthanides	72 Hf hafnio 178,49(2)	73 Ta tântalo 180,95	74 W tungstênio 183,84	75 Re rênio 186,21	76 Os ósio 190,23(3)	77 Ir íridio 192,22	78 Pt platina 195,08	79 Au ouro 196,97	80 Hg mercúrio 200,59	81 Tl talho (204,38 - 204,39)	82 Pb chumbo 207,2	83 Bi bismuto 208,98	84 Po polônio	85 At astato	86 Rn radônio
87 Fr frâncio	88 Ra rádio	89 a 103 Actinides	104 Rf rutherfordio	105 Db dúbnio	106 Sg seabórgio	107 Bh bóhrio	108 Hs hásio	109 Mt meitnério	110 Ds darmstádio	111 Rg roentgênio	112 Cn copernício	113 Nh nihônio	114 Fl fleróvio	115 Mc moscóvio	116 Lv livermório	117 Ts tennesso	118 Og oganesônio
57 La lantânio 138,91	58 Ce cério 140,12	59 Pr praseodímio 140,91	60 Nd neodímio 144,24	61 Pm promécio	62 Sm samário 150,36(2)	63 Eu europio 151,96	64 Gd gadolínio 157,25(3)	65 Tb térbio 158,93	66 Dy disprósio 162,50	67 Ho hólmio 164,93	68 Er érbio 167,26	69 Tm tulio 168,93	70 Yb itérbio 173,05	71 Lu lutécio 174,97			
89 Ac actínio	90 Th tório 232,04	91 Pa protactínio 231,04	92 U urânio 238,03	93 Np neptúnio	94 Pu plutônio	95 Am amerício	96 Cm cúrio	97 Bk berquílio	98 Cf califórnio	99 Es einstênio	100 Fm fêrmio	101 Md mendelévio	102 No nobélio	103 Lr laurêncio			

www.tabelaperiodica.org

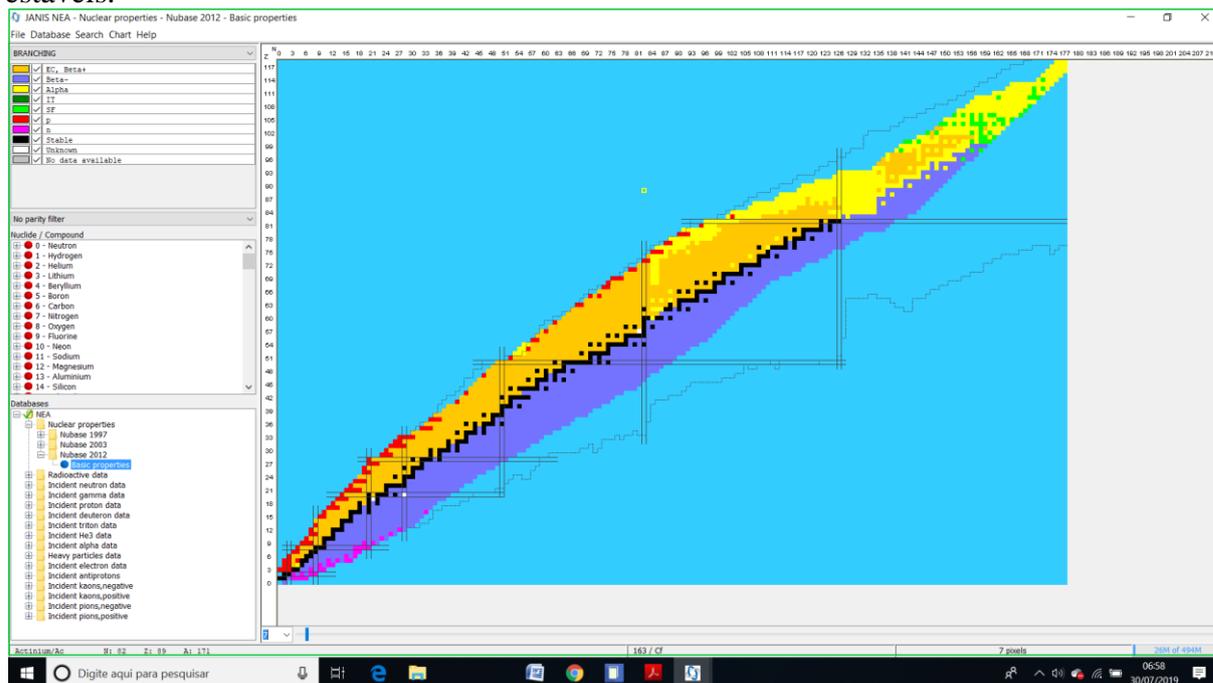
Licença de uso Creative Commons By-NC-SA 4.0 - Use somente para fins educacionais  
Caso encontre algum erro favor avisar pelo mail luisbrudna@gmail.com

Versão IUPACSBQ (pt-br) com 5 algarismos significativos, baseada em DOI:10.1515/pac-2015-0305 e DOI:10.1515/ci-2015-0409 - atualizada em 19 de março de 2019

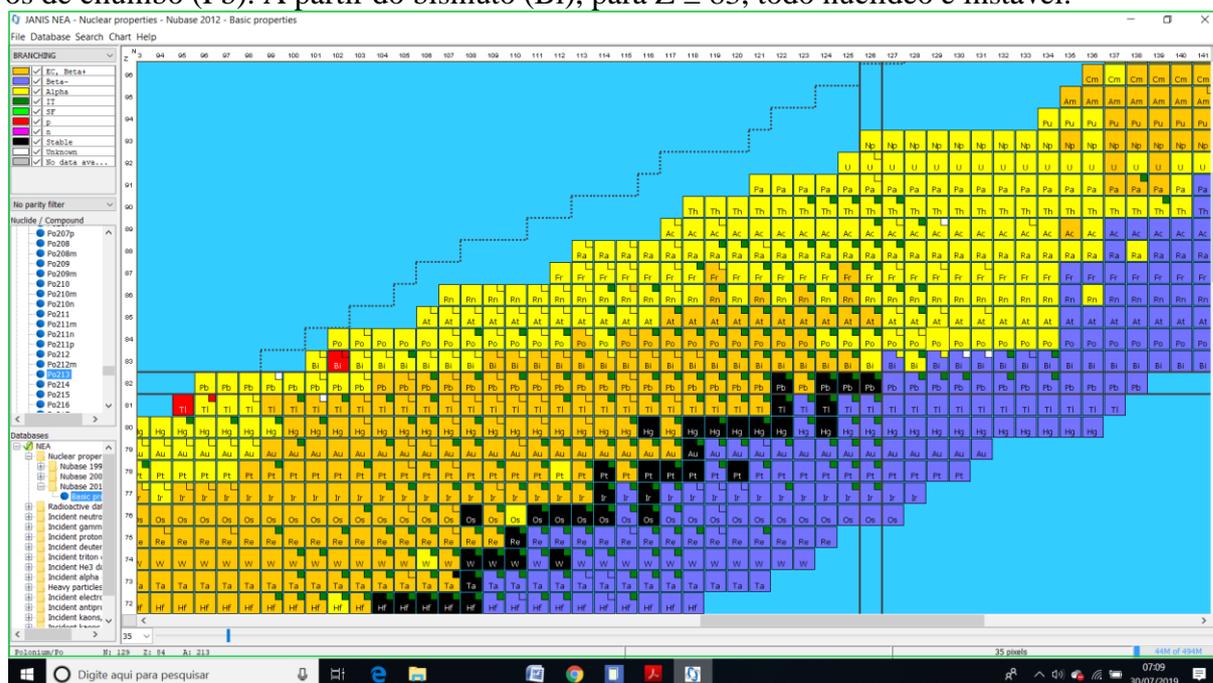
Fonte: Disponível em: < <https://www.tabelaperiodica.org/wp-content/uploads/2019/03/Tabela-completa-5-algarismos-v6.pdf> >. Acesso em: 25 ago. 2019.

O sítio eletrônico da NEA/OECD disponibiliza gratuitamente o programa de computador Janis 4.0, através do qual podemos ter acesso à Carta de Nuclídeos. As figuras abaixo foram elaboradas a partir do Janis 4.0, com destaques específicos. Na linha vertical, eixo das ordenadas, encontra-se  $Z$ , o nº atômico. Na linha horizontal, eixo das abcissas, encontra-se  $N$ , o nº de nêutrons.

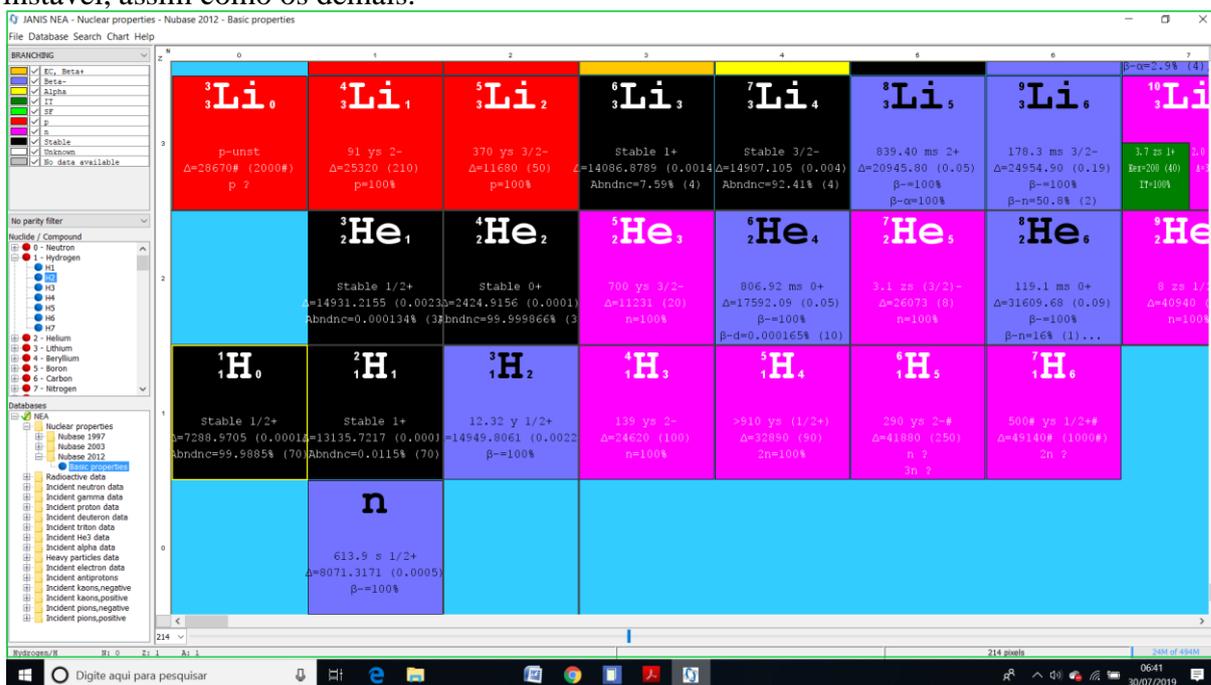
**Figura Ap1.3 – Carta de Nuclídeos – Visão Geral.** A linha preta, central, apresenta os nuclídeos estáveis.



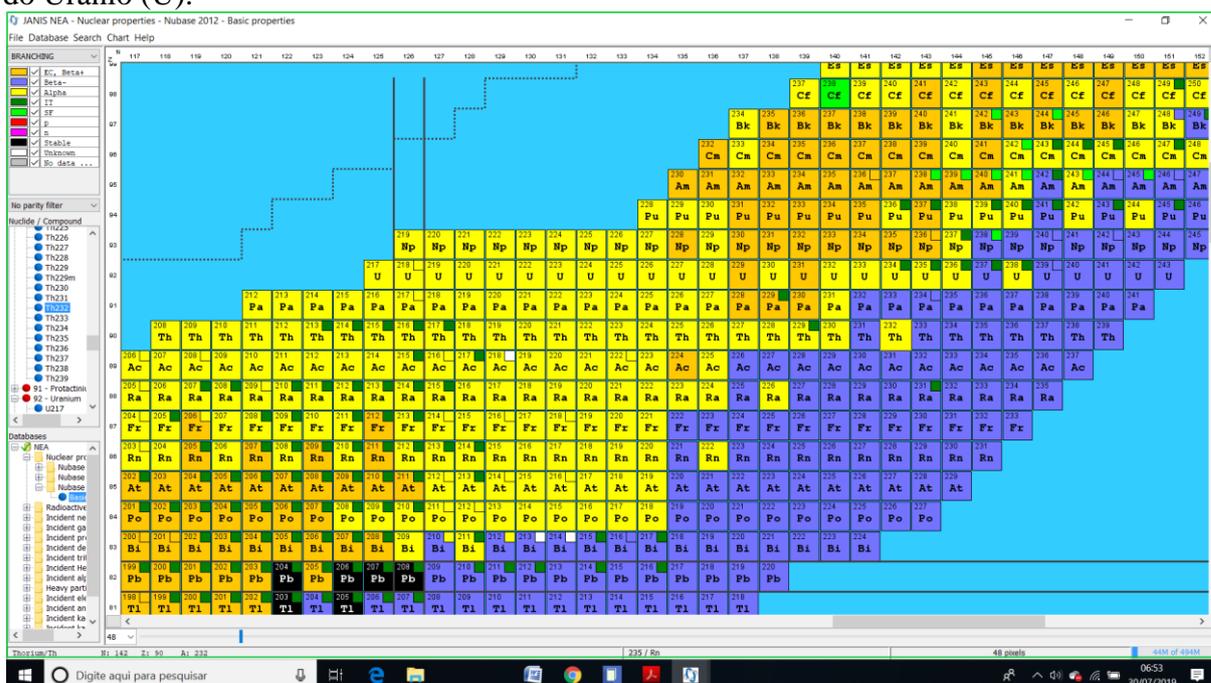
**Figura Ap1.4 – Carta de Nuclídeos – Limite de Estabilidade.** Os últimos nuclídeos estáveis são os de chumbo (Pb). A partir do bismuto (Bi), para  $Z \geq 83$ , todo nuclídeo é instável.



**Figura Ap1.5** – Carta de Nuclídeos – Hidrogênio (H). São 7 os nuclídeos do hidrogênio, sendo dois estáveis:  ${}^1_1\text{H}$ , também chamado de prótio; e  ${}^2_1\text{H}$ , conhecido como deutério. O  ${}^3_1\text{H}$ , trítio, é instável, assim como os demais.



**Figura Ap1.6** – Carta de Nuclídeos – Todos os 32 nuclídeos do Tório (Th) e os 27 nuclídeos do Urânio (U).



## Apêndice 2

Durante o processo de fissão nuclear, é esperada uma reação em cadeia, onde o resultado podem ser transmutações de conversão – na qual a quantidade de nêutrons gradativamente diminui; ou de regeneração, onde ocorre o oposto. A criticalidade ( $k$ ) se baseia na relação entre a quantidade de nêutrons produzida em comparação com a quantidade consumida. Ela pode ser descrita conforme abaixo:

$$k = \text{Fator de Multiplicação} = \frac{N^{\circ} \text{ de Nêutros Produzidos}}{N^{\circ} \text{ de Nêutrons Consumidos}}$$

Ou:

$$k = \text{Fator de Multiplicação} = \frac{N^{\circ} \text{ de Nêutros Emitidos num Dado Momento}}{N^{\circ} \text{ de Nêutrons Emitidos no Momento Anterior}}$$

Ou ainda:

$$k = \text{Fator de Multiplicação} = \frac{\text{Taxa de Produção de Nêutrons no Reator}}{\text{Taxa Total de Nêutron (absorvida + consumida + perdida)}}$$

Quando Fermi estava tirando as varetas de cádmio que moderavam a reação no CP 01, enquanto a reação em cadeia não estava sustentada,  $k$  era menor que 1 ( $k < 1$ ); quando o CP 01 atingiu a criticalidade,  $k$  foi igualado a 1 ( $k=1$ ), ou seja, para cada nêutron emitido anteriormente, um era absorvido no momento seguinte; a preocupação de Fermi era exatamente perder o controle da reação, ou seja, deixar o valor de  $k$  maior do que 1 e aumentar a “população” de nêutrons indefinidamente. Na verdade, é exatamente isto que acontece num artefato bélico nuclear. A diferença é que a alta concentração de material físsil faz com que esse aumento se dê num curtíssimo espaço de tempo, gerando muito calor e um processo explosivo. A tabela 2.3 resume as características da criticalidade:

### Quadro Ap2.1 – Classificação da Criticalidade $k$

Criticalidade	Condição do Reator	Relação de Produção e Consumo de Nêutrons
$k < 1$	Subcrítica	Mais nêutrons são absorvidos do que a quantidade produzida.
$k = 1$	Crítica	Para cada nêutron emitido, um correspondente é absorvido.
$k > 1$	Supercrítica	Mais nêutrons são produzidos do que a quantidade consumida.

Fonte: Adaptado de Zohuri (2017)

Para que um reator nuclear obtenha a criticalidade, seu projeto deve incluir não só as características do combustível, mas também do moderador, do refrigerante (para retirada de calor) e do material usado na blindagem externa. Outra variável importante para reatores nucleares é o fator de reprodução  $\eta$ :

$$\eta = \text{Fator de Reprodução} = \frac{N^{\circ} \text{ de Nêutrons Rápidos Produzidos pela Fissão Térmica}}{N^{\circ} \text{ de Nêutrons Térmicos absorvidos no combustível}}$$

Ou:

$$\eta = \text{Fator de Reprodução} = \frac{\text{Taxa de Produção de Nêutros Rápidos pela Fissão Térmica}}{\text{Taxa de Absorção de Nêutros Térmicos pelo combustível}}$$

O quadro Ap2.2 fornece alguns valores para o Fator de Reprodução:

#### Quadro Ap2.2 – Fator de Reprodução $\eta$

Núcleo Físsil	Descrição	Nêutros Térmicos ( $\eta$ )	Nêutros Rápidos ( $\eta$ )
${}_{92}^{233}\text{U}$	Urânio-233	2,29	2,40
${}_{92}^{235}\text{U}$	Urânio-235	2,07	2,35
${}_{92}^{239}\text{U}$	Urânio-239	2,15	2,90

Fonte: Adaptado de ZOHURI (2017)

Ainda em se tratando da absorção de nêutrons no reator, sabemos que, uma vez moderado (termalizado), o nêutron pode ser absorvido pelo combustível, pelo moderador e por outros nuclídeos gerados na fissão nuclear, chamados de venenos (poison). São assim chamados porque capturam nêutrons térmicos que poderiam ser utilizados no processo de fissão, diminuindo o rendimento do processo de produção de nêutrons. A propriedade que define o aproveitamento de nêutrons dentro do reator é o Fator de Utilização Térmica (f), que é dado pela fórmula:

$$f = \text{Fator de Utilização Térmica} = \frac{\text{Taxa de Absorção de Nêutros Térmicos pelo combustível}}{\text{Taxa de Absorção de Nêutros Térmicos por todos os materiais no reator}}$$

Onde os materiais no reator podem ser o combustível, o moderador e os venenos.

### Apêndice 3

#### 1.Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor (KP-FHR)

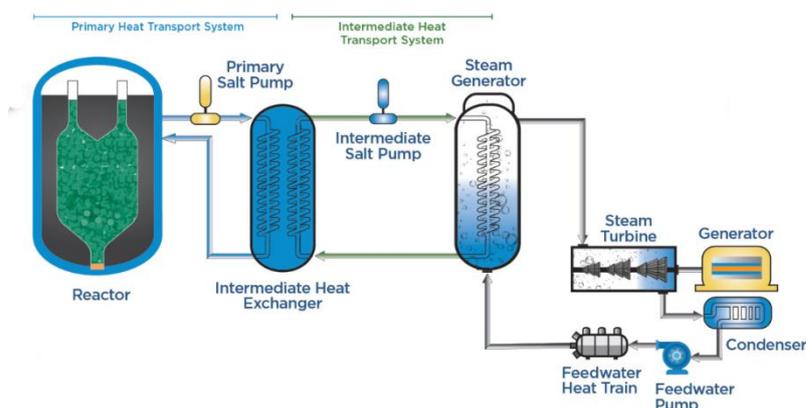
##### Quadro Ap3.1 – Tabela de Informações Básicas

Dado	Descrição	Observação
Reactor	Kairos Power fluoride salt-cooled high temperature reactor (KP-FHR)	<b>This is not a thorium-fueled reactor (!)</b>
Coolant	Flibe is a molten salt with excellent heat transfer properties and fission product solubility.	TRISO fuel in pebble form combined with a low-pressure fluoride salt coolant (TRI-structural ISO-tropic)
Fuel	The fuel kernel has its own dual containment within the fuel pebble, creating a defense-in-depth mechanism.	
Safety	The synergy between TRISO fuel, salt coolant, and passive safety mechanisms create an inherently safe design.	Passive safety means that KP-FHR do not require electricity to remove heat from the core after shutting down.
Power Conversion System	A high temperature superheated steam cycle produces electricity efficiently, cleanly, and reliably.	
Modular Design	The reactor is right-sized for enhanced manufacturability and constructability.	

##### Quadro Ap3.2 – Informações Operacionais

Power Output	140 MWe
Net Efficiency	45%
Main/ Reheat Temperatures	585°C/ 585°C
Main Steam Pressure	19 MPA
Reactor Outlet Temperature	650°C
Reactor Operating Pressure	Near Atmospheric Pressure – The intrinsic low pressure in KP-FHR reactors enhances safety and eliminates the need for bulky and expensive high-pressure containment structures.
Reactor Structural Material	316 Stainless Steel
Fuel Enrichment Level	19.75%
Intermediate Salt	"SOLAR" / Nitrate Salt
Refueling Type	Online
Deployment Configuration	Single / Multi-Module
Back-Up Power Supply	Automatic Safe Shutdown; Passive Cooling Upon Loss Of Power

##### Figura Ap3.1 – Esquema do Reator



Fonte: <https://kairopower.com/>

## Apêndice 4

### 2.Thorium Molten Salt Reactor – Solid Fuel (TMSR–SF; SINAP\*, CAS\*\*)

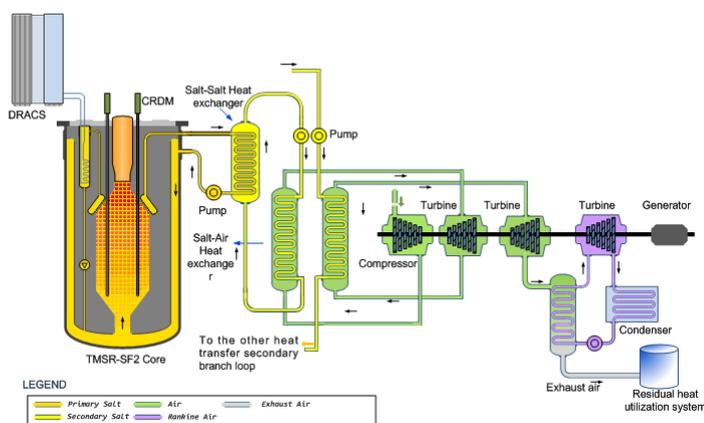
#### Quadro Ap4.1 – TMSR-SF0 VS TMSR-SF1

Characteristics	TMSR-SF0	TMSR-SF1
Phase	Phase 0 (2015-2017)	Phase 1 (2018-2020)
Description	Simulator	Test Reactor Experiment
Coolant	High Purity FLiNaK with total oxygen < 100 ppm	FLiBe with boron equivalent < 2 ppm
Coolant Temperature Inlet – Outlet	600 °C – 650 °C	
Size ratio	1:3	
Area ratio	1:9	
Volume ratio	1:27	
Power	370 kWt	10 MWt
Sat speed	3.9 kg/s	84 kg/s
Heating	Electricity	Nuclear
Fuel element	-	TRISO, 6 cm sphere
Core	-	Graphite conventional pebble bed arrangement
Temperature Limitations	-	Fuel < 1,400 °C; Coolant outlet < 750 °C
Obs	-	With passive residual heat removal
Reactor Vessel Pressure Limitations	-	P < 5 atm

#### Quadro Ap4.2 – TMSR-SF2

Phase 2 (2021-2025)	100 MW TMSR-SF2 Demonstration Reactor
Fuel Cycle	Modified Open Fuel Cycle
Fuel Type / Assembly Array	Pebble TRISO / Floating Bed
Fuel Enrichment (%)	19,75 %
Reactor	Pebble Bed Fluoride-cooled High-Temperature Reactor – PB-FHR
Electrical Capacity (MWe)	168 MWe
Thermal Capacity (MWt)	400 MWt
Coolant / Moderator	FLiBe / Ultrafine Grain Nuclear Graphite Core
Core inlet/outlet temp (°C)	600 °C / 700 °C
Safety Characteristics	Inherent Safety: near-ambient pressure, low excess reactivity, large margin of fuel temperature

#### Figura Ap4.1 – TMSR-SF2



\*Shanghai Institute of Applied Physics, \*\*Chinese Academy of Science

Fontes: <http://www.owaki.info/etc/msr20180614/Progress%20of%20TMSR%20in%20China.pdf>

<https://public.ornl.gov/conferences/MSR2016/docs/Presentations/MSR2016-day2-13-Ruobing-Xie-Progress-of-Materials-RandD-in-TMSR-Project.pdf>

<http://tcw15.mit.edu/sites/default/files/documents/TMSRstatus-liuwei.pdf>

## Apêndice 5

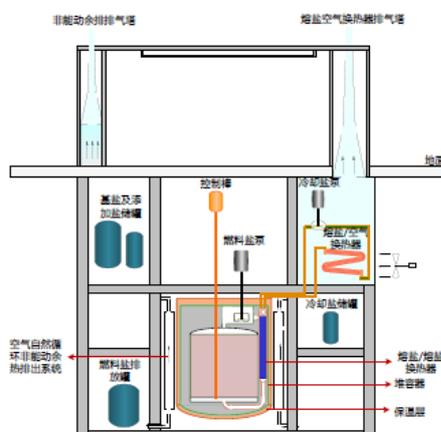
### 3.Thorium Molten Salt Reactor – Liquid Fuel (TMSR-LF; SINAP\*, CAS\*\*) Quadro Ap5.1 – TMSR-LF1

Characteristics	TMSR-LF1						
Phase	Phase 1 (2018-2020)						
Description	Test Reactor Experiment						
Type	Integrated Design Liquid-Fueled Molten Salt Reactor						
Reactivity Control	Control Rods						
Alloy	UNS N1003						
Graphite	Superfine Particle Graphite						
Thermal Capacity (MWt)	2 MWt						
Life	10 years						
Burn-Up Effective Full Power Day (EFPD)	300 days						
Max EFPD / year	60 days / year						
Fuel Cycle	Th Fuel Cycle Test						
Fuel Salt	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> (+ThF <sub>4</sub> )						
U-235 Enrichment	19.75 wt%						
Coolant Salt	LiF-BeF <sub>2</sub>						
Fuel Salt Loop Inlet–Outlet Temperature	630 °C – 650 °C						
Coolant Salt Loop Inlet–Outlet Temperature	560 °C – 580 °C						
Mass Flow Rate Fuel Salt	~50 kg/s						
Mass Flow Rate Coolant Salt	~42 kg/s	Fuel Loading / Discharging	Ar gas + capsule	Residual Heat Removal System	Loop + Air Natural Circulation	Cover Gas	Argon, 0.05 MPa
Fuel Loading / Discharging	Ar gas + capsule						
Residual Heat Removal System	Loop + Air Natural Circulation						
Cover Gas	Argon, 0.05 MPa						

### Quadro Ap5.2 – TMSR-LF2

Characteristics	TMSR-LF2
Phase	Phase 2 (2021-2025)
Description	Test Reactor Experiment
Thermal Capacity (MWt)	10 MWt
Fuel Cycle	Th Fuel Cycle Demo

Figura Ap5.1 – TMSR-LF1



\*Shanghai Institute of Applied Physics, \*\*Chinese Academy of Science

Fontes: <http://www.owaki.info/etc/msr20180614/Progress%20of%20TMSR%20in%20China.pdf>  
<https://public.ornl.gov/conferences/MSR2016/docs/Presentations/MSR2016-day2-13-Ruobing-Xie-Progress-of-Materials-RandD-in-TMSR-Project.pdf>  
<http://tcw15.mit.edu/sites/default/files/documents/TMSRstatus-liuwei.pdf>