

MAPA TECNOLÓGICO PARA INSERÇÃO DE REATORES DE TÓRIO NA AGENDA POLÍTICA DO BRASIL

Gustavo André Pereira Guimarães¹
Nival Nunes de Almeida¹

¹Escola de Guerra Naval

DOI: 10.47168/rbe.v28i1.656

RESUMO

A geopolítica nuclear descreve o conflito entre países combinando interesses energéticos e de materiais estratégicos. O surgimento da geopolítica nuclear brasileira pode ser historicamente situado em 1945, junto com a geopolítica nuclear mundial. Em ambas, o tório inicialmente exerceu papel central ao lado do urânio, até meados da década de 1970. Na década de 1990, houve uma retomada do interesse por reatores nucleares utilizando o ciclo do combustível tório, como alternativa às tecnologias dominantes que empregam o urânio. O conhecimento acumulado ao longo de 60 anos de pesquisas no Brasil sobre o ciclo do combustível tório possibilita considerar uma proposta para a adoção de um reator nuclear com tório como combustível. A dificuldade de inserção do tema nuclear na agenda política representa um desafio para a elaboração e implantação de políticas públicas para construção de um reator de tório no Brasil. O presente trabalho oferece um mapa tecnológico multicamadas para inserção de reatores de tório na agenda política nacional, destacando como contribuições: a descrição do processo sistemático de elaboração até a apresentação do modelo final de um mapa tecnológico, a proposta da inserção de reatores de tório no Programa Nuclear Brasileiro e a atualidade da geopolítica nuclear brasileira e mundial. Os autores concluem que o mapa tecnológico construído representa um ponto de partida aplicável para a inclusão do tema na agenda política nacional visando a construção e operação de novas plantas nucleares.

Palavras-chave: Mapa tecnológico; Reatores de tório; Energia nuclear; Políticas Públicas; Geopolítica Nuclear.

ABSTRACT

Nuclear geopolitics describes the conflicts between countries combining energetic and strategic materials. The emergence of Brazilian nuclear geopolitics can be historically assigned in 1945, at the same time of the world nuclear geopolitics. Thorium and uranium had initially played the same key role on both up to the mid-1970s. By the 1990s, there was a resurgence of interest in nuclear reactors adopting thorium fuel cycle as an alternative for the main technology uranium based. The knowledge accumulated along 60 years of research in Brazil about the thorium fuel cycle indicates that a firm proposal to adopt a nuclear reactor with thorium as fuel can be considered. The obstacles to address nuclear issues in the political agenda presents a challenge to formulate and implement public policies on building a thorium reactor in Brazil. This paper offers a multilevel technology roadmap to raise the matter of thorium reactors into the national political agenda, highlighting as contributions: description of the systematic process to build a technology roadmap from beginning to its final design presentation, the proposal to include thorium reactors in the Brazilian Nuclear Program, and the current situation of Brazilian and world nuclear geo-politics. The authors conclude that the technology roadmap built is a starting point useful to include the issue in the national political agenda focusing the construction and operation of new nuclear power plants.

Keywords: Technological map; Thorium reactors; Nuclear energy; Public policies; Nuclear geopolitics.

1. INTRODUÇÃO

A geopolítica pode ser definida como o conjunto de observações e de raciocínios estratégicos, geográficos e históricos que permitem uma compreensão melhor dos conflitos internacionais. A geopolítica nuclear pode ser considerada um caso particular da geopolítica tradicional, tendo uma componente energética devido ao potencial nucleoeletrico dos reatores nucleares associado ao fato do abastecimento energético ser uma questão de segurança nacional e outra de materiais estratégicos, pois depende da disponibilidade de jazidas de minérios radioativos como urânio e tório. Destaca-se que, em 1945, no início da geopolítica nuclear, urânio e tório eram elementos de importância equivalente no cenário mundial. Posteriormente, a tecnologia dominante de reatores nucleares convergiu para o urânio, e assim foi até a última década do século XX.

O surgimento da geopolítica nuclear brasileira pode ser situado junto com a própria geopolítica nuclear mundial. Em 1945, o Espírito Santo possuía vastas reservas de areias monazíticas contendo urânio

e tório, exportando-as inclusive para os EUA. Ao longo do tempo, reatores utilizando urânio como combustível se destacaram tecnologicamente, e os estudos com o tório foram abandonados. De 1965-1973, o Grupo do Tório no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, em Minas Gerais, procurou desenvolver no país de forma autóctone um reator utilizando o tório (ao invés do urânio) como principal combustível.

O setor nuclear sempre foi estratégico para o Brasil. Atualmente, há no país duas usinas nucleares, Angra I e Angra II, operando regularmente com reatores “tipo PWR”, que utiliza como combustível urânio enriquecido. O Programa Nuclear Brasileiro – PNB prevê, para os próximos anos, a construção do quinto reator de pesquisa no país, o Reator Multipropósito Brasileiro – RMB; a retomada de obras para conclusão de Angra III; a construção de uma quarta usina; e a continuidade do Programa Nuclear da Marinha – PNM, parte integrante do PNB, que detém dois projetos em curso: (i) O Ciclo de Combustível Nuclear, dando continuidade ao desenvolvimento autóctone para o domínio completo do ciclo do combustível nuclear, e, (ii) O LabGene – Laboratório de Geração Nucleoelétrica, local de construção do reator para o primeiro submarino convencional de propulsão nuclear brasileiro – SCPN.

Embora a tecnologia envolvendo o tório como combustível nuclear tenha sido descartada como opção viável nas décadas de 1970 e 1980, esta passou a ser reconsiderada a partir dos anos 2000. Pode-se elencar três elementos motivadores para a reinserção do tório como alternativa de combustível nuclear: a emergência das questões climáticas associadas ao conceito de sustentabilidade; a crescente demanda mundial por energia elétrica; e os esforços de não-proliferação nuclear – o Tratado de Não-Proliferação Nuclear – TNP e seu Protocolo Adicional são elementos centrais da agenda nuclear internacional. Em meados dos anos 1990, a Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA passou a estimular o estudo do Ciclo do Combustível Nuclear Tório – CCT (*Thorium [based] Fuel Cycle* – TFC), baseada na existência de tecnologias com-provadas de reatores nucleares que utilizam tório, como o reator a sal fundido [MSR] ou o reator homogêneo aquoso [AHR].

O Brasil aderiu aos fóruns criados internacionalmente com o intuito de compartilhamento de avanços tecnológicos em projetos conjuntos de novas tecnologias de reatores nucleares, chamados de quarta geração. A abundância de reservas mundiais de tório, de três a quatro vezes superiores às de urânio, contribui para fomentar interesse em investir em P&D de tecnologias inovadoras. Inúmeras áreas da ciência disputam as limitadas fontes de financiamento nacionais, e tal dilema se desdobra inclusive dentro das prioridades da área nuclear.

Por se tratar de uma tecnologia complexa que encontra resistência dentro da sociedade civil, a sua inserção na agenda política se apresenta como o primeiro grande desafio para reatores de tório no país.

Para que políticas públicas sejam criadas e implementadas, existe o processo de formulação de políticas públicas, ou ciclo de políticas públicas (chamado *policy making* ou *policy cycle*, respectivamente). Antes de existir uma política pública, é necessário que um problema ou necessidade seja identificado, e este entre na agenda política. A montagem ou formação da agenda política (*agenda setting*) compreende a tomada de conhecimento de uma necessidade ou problema pelos formuladores de políticas públicas e tomadores de decisão, bem como sua inclusão e priorização frente a outras demandas da sociedade. Devido à complexidade tecnológica e à sensibilidade envolvendo questões nucleares, a apresentação de propostas inovadoras na área esbarra em desafios de comunicação com a comunidade política e públicos de interesse (*stakeholders*).

A utilização de mapas tecnológicos ou *technology roadmaps* – TRMs tem sido apontada na literatura como uma ferramenta visual sintética útil para comunicar a proposição de políticas públicas. Partindo de uma pesquisa consolidada pelos autores, o presente trabalho propõe um mapa tecnológico multicamadas para inserção de reatores de tório na agenda política nacional. Através de publicações oficiais da AIEA, os autores desenvolvem uma metodologia inédita, definindo os elementos do mapa e avaliando-os em cada uma das três fases e marcos temporais estabelecidos pelo documento de referência, adaptados à realidade do PNB. Pretende-se que seja uma ferramenta para auxiliar no esclarecimento durante o debate político, permitindo a sintetização em um quadro de um projeto de nova tecnologia nuclear, assunto notoriamente complexo.

A principal contribuição deste artigo corresponde à 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. Este trabalho também trouxe um procedimento inédito para elaboração de um TRM desde a sua idealização até a decisão dos seus elementos constituintes. A abordagem da Geopolítica Nuclear e da Geopolítica Nuclear Brasileira destacando a Geopolítica Energética e a Geopolítica de Materiais Estratégicos contribui para ampliar a dimensão dos assuntos debatidos. Por fim, o mapa tecnológico não representa um fim em si, mas um ponto de partida para a inclusão do tema na agenda política nacional, passando pela implantação de políticas públicas que permitam a construção e operação de plantas nucleares com reatores de tório no país.

2. GEOPOLÍTICA NUCLEAR

A disputa de poder entre os países se mantém ativa após a segunda década do século XXI, podendo ser identificada nos conflitos atuais. A geopolítica é o conjunto de observações e de raciocínios estratégicos, geográficos e históricos que permitem uma compreensão melhor dos conflitos (LACOSTE, 2012, p. 8). Os ataques ao Irã deflagrados por Israel em 2020 e o impasse na Ucrânia em 2022 ilustram não só a atualidade das questões geopolíticas como, em especial, a importância da geopolítica nuclear. Embora o Irã reitere o posicionamento pacífico de seu programa nuclear, prosseguem esforços – diplomáticos e militares – para controlar, retardar ou impedir a sua evolução, rotulado como potencialmente ameaçador. A disputa ucraniana envolve potências nuclearmente armadas.

Podemos considerar inicialmente a geopolítica nuclear como um caso particular da geopolítica tradicional, que contempla simultaneamente a questão energética e a de materiais estratégicos:

(i) energética, devido ao potencial nucleoeletrônico da energia nuclear, vinculado à crescente demanda por maior disponibilidade de energia elétrica e a um custo acessível, preferencialmente de caráter sustentável (BASU & MIROSHNIK, 2019, p.39). O abastecimento energético é uma questão de segurança nacional e, portanto, uma preocupação constante dos Estados (CONANT, 1981, p.19-20). A centralidade do petróleo e do gás natural na matriz energética mundial a partir do século XX configura o exemplo mais emblemático de motivação para conflitos geopolíticos energéticos, nos quais o Irã e a Ucrânia são atores de destaque; e

(ii) materiais estratégicos, justificada pela distribuição irregular ao redor do globo de jazidas de minerais contendo urânio, tório – e que engloba ETR (Elementos Terras Raras) – metais/metais nobres dentre outros elementos ou materiais específicos de interesse da tecnologia nuclear.

O marco inicial da geopolítica nuclear pode ser identificado pela narrativa de Alperovitz (1969, p. 13), que apregoa o fato de que os lançamentos das duas bombas atômicas na Segunda Guerra Mundial (2ª GM) era desnecessário e que, dentre outros fatores, serviu de base para que fosse estabelecida uma “diplomacia atômica”. Para Conant (1980, p. 91), a “Era da Fissão Nuclear” traz consigo “seu próprio conjunto de fatores geopolíticos”. A escalada de explosões nucleares que se seguiu a partir de 1945 estimulou o segundo marco da Geopolítica Nuclear: o Tratado de Não-Proliferação – TNP, que cunhou o termo Estado Nuclearmente Armado. Desta maneira, o poder nuclear bélico desenvolvido até então deveria permanecer exclusivamente com

as cinco nações nuclearmente armadas à época, que passaram a compor o “Clube Atômico”: EUA, Rússia (ex-URSS), Reino Unido, França e China.

A célebre sentença de Francis Bacon (1561-1626) *scientia potentia est*, traduzida livre-mente como “conhecimento é poder”, encontra ressonância na geopolítica nuclear através das sucessivas conquistas tecnológicas de Índia, Paquistão, Coreia do Norte e Israel (não confirmado oficialmente). Como *outliers* que desenvolveram armas de destruição em massa (ADM), tais países demonstraram que é possível quebrar a barreira do cerceamento tecnológico para fins geopolíticos e, através do conhecimento nuclear, reivindicar poder e exercer maior influência nas relações internacionais. Entretanto, há países que optaram por desistir da tecnologia nuclear para fins bélicos, como a África do Sul, e os que só a utilizam para fins pacíficos, como é o caso do Canadá, da Alemanha, da Coreia do Sul, do Japão e do Brasil, dentre outros (OGUNNUBI, 2020; BASU & MIROSH-NIK, 2019).

O Protocolo Adicional ao TNP, documento que permite à Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA estender seu escopo de fiscalização de instalações nucleares, pode ser considerado um terceiro marco da geopolítica nuclear, pois inaugura um instrumento mais agressivo de controle nuclear, sem oferecer como contrapartida a obrigatoriedade de redução das AMD dos países do Clube Atômico, permitindo a perpetuação da manutenção da concentração de poder nuclear sob o pretexto da não-proliferação (VALLE MACHADO DA SILVA, 2021).

A geopolítica nuclear exerce um papel opressor ao interferir diretamente nos programas nucleares pacíficos de diversos países que almejam empregar o conhecimento nuclear para expansão da matriz energética, da medicina nuclear, no tratamento radiológico de alimentos, na recuperação de documentos, no tratamento de gemas etc. Segundo Guimarães (2019, p. 38):

[...] 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.

Especificamente no caso do Brasil, destaca-se o empenho pelo avanço tecnológico: uma vez conquistada na década de 1980 a capacidade autóctone para enriquecimento de urânio via ultracentrifugação, o passo tecnológico seguinte prevê a construção de dois reatores nucleares, um para a produção de radioisótopos (Reator Multipro-

pósito Brasileiro - RMB), e o outro para propulsão de um submarino convencional. Cumpre destacar que os objetivos tecnológicos brasileiros no campo nuclear encontraram barreiras na geopolítica nuclear desde os primórdios do Programa Nuclear Brasileiro – PNB, configurando a Geopolítica Nuclear Brasileira.

3. GEOPOLÍTICA NUCLEAR BRASILEIRA

A geopolítica nuclear brasileira advém de fatos geográficos e fatos históricos e o seu surgimento pode ser situado junto com a própria geopolítica nuclear mundial. Graças às conhecidas reservas de areias monazíticas presentes no estado do Espírito Santo, ricas em ETR e contendo urânio e tório, o Brasil foi considerado um supridor estratégico para os Estados Unidos já em 1945. Naquele ano foi firmado o primeiro contrato de exportação desse mineral estratégico, e em seguida outros acordos para pesquisa geológica e mapeamento das reservas uraníferas e toríferas nacionais, este último também com a França (ROCHA FILHO, 2006).

No início da geopolítica nuclear, urânio e tório eram elementos de importância equivalente no cenário mundial. Todavia, a preponderância da tecnologia de reatores PWR que utiliza urânio enriquecido, seguida pelos reatores a urânio natural, relegaram o tório a uma posição marginal para o desenvolvimento tecnológico nuclear pacífico. Paralelamente, o urânio e o plutônio, este último obtido de maneira artificial, emergiram como elementos centrais para a fabricação de ADM. O urânio pode ser utilizado na sua forma natural ou enriquecido (LEU/HEU). O tório, diferentemente, possui propriedades físicas que inibem a mesma aplicação imediata.

O Programa Nuclear Brasileiro, bem como o da maioria dos países, concentra seus esforços em tecnologias nucleares para geração de energia elétrica utilizando compostos de urânio como combustível. Aplicações para dessalinização da água do mar e produção de radioisótopos para medicina nuclear também permeiam a pauta, dependendo do país. Atualmente, o Brasil possui apenas a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, localizada no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro. Dispõe de duas usinas nucleares, Angra I e Angra II, operando regularmente com reatores “tipo PWR”, e uma terceira usina, Angra III, em fase avançada de construção, que também operará com reator PWR. Detém projetos para expansão nucleoeletrônica, com ambições para a implantação de sua segunda central nuclear, possivelmente na cidade de Itacuruba, em Pernambuco – espaço que poderá abrigar até seis novas plantas nucleares. Embora a tendência seja a padronização do tipo de reator nuclear, é passível de considera-

ção a adoção de uma outra tecnologia, sugerindo a possibilidade de pelo menos uma das novas usinas ser projetada considerando um reator com tecnologia diferente do PWR (GUIMARÃES, 2019).

Além das duas usinas nucleares, o Brasil possui quatro reatores de pesquisa em operação, e concluiu o projeto do Reator Multipropósito Brasileiro – RMB. Quando estiver operacional, o RMB proverá a expansão da capacidade de produção de materiais radioativos importantes para a medicina nuclear até a autossuficiência no abastecimento nacional, possivelmente permitindo inclusive a entrada do país neste restrito e economicamente interessante mercado internacional via exportação.

O Brasil considera três setores tecnológicos como estratégicos para a Defesa Nacional: o cibernético, o nuclear e o espacial. Coube à Marinha do Brasil a responsabilidade pela condução dos assuntos estratégicos de interesse nacional relacionados à área nuclear, e o Programa Nuclear da Marinha – PNM, que é parte integrante do PNB, reflete essa realidade através de seus dois projetos:

(i) O Ciclo de Combustível Nuclear, baseado na tecnologia do enriquecimento de urânio. Destaca-se o histórico desenvolvimento autótone para o domínio completo do ciclo do combustível nuclear, e a capacidade tecnológica para construção das ultracentrífugas utilizadas pelas Indústrias Nucleares do Brasil – INB, responsável pela exploração de jazidas e fabricação de elementos combustíveis.

(ii) O LabGene – Laboratório de Geração Nucleoelétrica, *locus* de construção do reator para o primeiro submarino convencional de propulsão nuclear brasileiro, o SCPN (BRASIL, 2020; BRASIL, 2021).

A tecnologia dominante de reatores nucleares convergiu para o urânio, e assim tem sido até a última década do século XX. Entretanto, pode-se elencar três elementos motivadores para a reinserção do tório como alternativa de combustível nuclear:

- a emergência das questões climáticas associadas ao conceito de sustentabilidade;
- a crescente demanda mundial por energia elétrica;
- os esforços de não-proliferação nuclear.

Embora a tecnologia envolvendo o tório como combustível nuclear tenha sido descartada como opção viável nas décadas de 1970 e 1980, esta passou a ser reconsiderada a partir dos anos 2000.

4. O TÓRIO

Historicamente, podemos consolidar as referências ao tório na política nuclear brasileira em três fases distintas. Na fase pré-PNB (1945-1965), o tório configurava apenas um elemento químico presente nas areias monazíticas capixabas com teor variável em torno de 6% da sua composição. Entretanto, os Estados Unidos já consideravam o tório como equivalente ao urânio, obtendo contratos vantajosos para importação deste minério estratégico, sem o adequado apreçamento ou compensações específicas, conforme sugerido pelo Almirante Álvaro Alberto (ROCHA FILHO, 2006, p. 63; ARGENTIÉRE, 1953, p. 514).

Na década de 1960 inicia-se a segunda fase do tório no Brasil (1965-1973), quando se instituiu o Grupo do Tório no Instituto de Pesquisas Radioativas – IPR, atualmente Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, em Minas Gerais. Este grupo de pesquisadores buscou desenvolver de forma autóctone um reator utilizando o tório (ao invés do urânio) como principal combustível. O grupo foi dissolvido em 1973, poucos anos após a decisão brasileira pela compra do reator PWR de Angra I, da Westinghouse. Nos Estados Unidos, pesquisas com o tório também foram oficialmente interrompidas em 1976. Os esforços orçamentários de ambos os países, por conseguinte, foram redirecionados para reatores que empregavam urânio como combustível. Nas duas fases acima, podemos considerar o tório inserido na agenda política (CNEN, 2021; SECCHI, 2019, p.58).

A terceira fase, iniciada em meados dos anos 1990, destaca-se pelas iniciativas da AIEA no estímulo ao estudo do Ciclo do Combustível Nuclear Tório – CCT (*Thorium [based] Fuel Cycle* – TFC). A AIEA passou a divulgar resultados consolidados de pesquisas dos países que compartilharam seus avanços com relação a reatores utilizando tório como combustível. Combustíveis nucleares baseados em tório podem ser utilizados em todos os tipos de reatores com tecnologia comprovada, incluindo PWR, e em futuros conceitos de reatores. Contudo, será necessário um investimento inicial significativo para que se alcance o mesmo patamar de escala industrial já conquistado pelos ciclos de urânio/plutônio (IAEA, 2000).

Em 2000, a AIEA convidou seus membros para participarem de um projeto con-junto, denominado Projeto Internacional em Reatores Nucleares e Ciclos de Combustível Inovadores. O projeto elencou, dentre as possibilidades tecnológicas resistentes à proliferação, reatores que adotariam o CCT (IAEA, 2018). Paralelamente, no mesmo ano 2000, o Departamento de Energia, Ciência e Tecnologia Nucleares

estadunidense recebeu a primeira reunião de um grupo de representantes de países, convidados para o desenvolvimento conjunto de tecnologias inovadoras de reatores nucleares de quarta geração. A evolução da proposta culminou na criação do Fórum Internacional de Reatores Nucleares de Quarta Geração. Este fórum, por sua vez, selecionou seis conceitos de reatores nucleares para desenvolvimento colaborativo, incluindo tecnologias que consideram a possibilidade do emprego do CCT.

O Brasil participa tanto do Projeto Conjunto (desde 2002) quanto do Fórum Internacional (desde 2001, não-ativo), embora pouco atuante, pois não há políticas públicas específicas no país que estimulem a pesquisa de reatores nucleares com tecnologias inovadoras, nem o estudo do CCT (GIF, 2006; IAEA, 2018). As iniciativas nacionais na área são pontuais, oriundas dos centros de pesquisas nucleares nacionais, bem como de universidades. Os Estados Unidos divulgaram, em março de 2021, os cinco *designs* de reatores nucleares avançados com cronograma acelerado para viabilidade operacional até 2030. Dentre eles, destaca-se a tecnologia a sal fundido, o modelo de MSR – *Molten Salt Reactor* da empresa TerraPower, de quarta geração, presente no Fórum Internacional como elegível para o CCT. O programa de política pública responsável se chama Programa de Demonstração de Reator Avançado.

Tecnicamente, a decisão de escolha de um conceito de reator nuclear e do ciclo do combustível utilizado caminham juntas. Otimizar a tecnologia nuclear e reduzir drasticamente o volume de resíduos radioativos representa um desafio cuja resposta envolve formas inovadoras de pensar, novas ações de P&D e concomitante estratégia de desenvolvimento de combustível, utilizando ciclos alternativos como o CCT (KOK, 2009, p. 213). No passado, reatores que utilizam tório como combustível foram demonstrados, com tecnologia comprovadamente factível, e operaram comercialmente, sendo economicamente viáveis (IAEA; NEA, 2020, p.144).

Convém mencionar a disponibilidade mundial e nacional de jazidas de minerais toríferos. Segundo a AIEA (2019, p. 4), as reservas de tório mundiais são de três a quatro vezes superiores às de urânio. A Figura 1 ilustra a distribuição mundial de reservas de tório, com destaque para o Brasil.

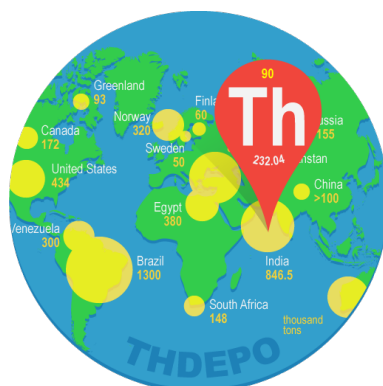


Figura 1 – Distribuição mundial de reservas de tório, em milhares de toneladas

Todavia, a viabilização de uma tecnologia inovadora depende da disponibilidade de recursos para investimento em P&D. Inúmeras áreas da ciência disputam limitadas fontes de financiamento, e tal dilema se desdobra inclusive dentro das prioridades da área nuclear no Brasil. Por se tratar de uma tecnologia complexa que encontra resistência dentro da sociedade civil, a sua inserção na agenda política se apresenta como o primeiro grande desafio para reatores de tório no país.

5. A PESQUISA DO TÓRIO NO BRASIL

O atual Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN), que manteve o no-me de Instituto de Energia Atômica (IEA) entre 1956 e 1979, é uma referência nacional para o processo de purificação de compostos de tório gerados pelo processamento da monazita (primeira fonte de minerais radioativos brasileira, exportada para os EUA desde 1945 até 1956). Em setembro de 1963, o pesquisador Heliton Motta Haydt assinou a publicação do IEA intitulada “Estado Atual da Tecnologia da Produção de Tório Metálico” para “produção de energia em reatores de tório-plutônio”. Dois anos depois, Krumholz e Brill (dez/1965) atualizam o trabalho de Haydt. Ambos os relatórios identificam o papel seminal da Orquima, indústria brasileira que já em 1948 processava quimicamente areias monazíticas para exportação (incorporada à CNEN em 1960), destacando o esforço da IEA em obter sais de tório nuclearmente puro. A dissertação de mestrado de Álvaro Ikuta (1977)

descreveu a tecnologia de purificação de concentrados de tório para atingir a pureza nuclear. Já a dissertação de Mitiko Yamaura (1982), considerava o reprocessamento do combustível de reatores nucleares à base de tório, utilizando um método denominado THOREX, que separa tório e urânio de outros produtos.

A efetiva utilização do tório em reatores foi estudada não só no IEA/IPEN. A Nuclebrás, através do CDTN, com apoio de empresas alemãs, pesquisou de 1979 a 1989 a utilização de tório em PWR, com resultados favoráveis (KFA; NUCLEBRAS, 1988). O Centro Tecnológico da Marinha (CTMSP), a UFMG, o Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), a UFRJ, e o Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv) também contribuíram. Mais recentemente, sobressaem os trabalhos do Instituto Militar de Engenharia (IME) e da UFABC.

Alinhados com o ressurgimento do interesse mundial pelo tório, pesquisadores brasileiros vêm publicando artigos científicos e gerando dissertações e teses que contribuem para consolidação de uma proposta firme com viabilidade tecnológica e econômica por meio de dois caminhos. Pesquisadores como Paulo Ernesto de Oliveira Lainetti (IPEN), José Manoel Losada Moreira (IPEN/UFABC) e José Rubens Maiorino (IPEN/UFABC) publicaram diversos trabalhos a partir dos anos 2000. Lainetti afirma que o CCT já foi testado em modelos de reatores refrigerados a água leve (LWR) e alguns tipos de reatores rápidos, incluindo os refrigerados a gás (GCFR e HTGR), na mesma época em os EUA pesquisavam o modelo MSR. O autor destaca que, a partir de 1985, o IPEN passou a produzir industrialmente nitrato de tório nuclearmente puro, sendo mais um marco tecnológico nacional pouco conhecido, juntamente com o domínio do ciclo do combustível nuclear baseado em enriquecimento de urânio, com parceria do CTMSP.

Losada Moreira e Maiorino, após aposentarem-se do IPEN, tornaram-se docentes na UFABC, renovando a pesquisa do tório, com trabalhos apresentados junto com outros pesquisadores. No Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, citamos “*Thorium as a New Primary Source of Nuclear Energy*” e “Da viabilidade da utilização de óxidos mistos de tório-urânio em um reator nuclear de geração III (AP1000)”, respectivamente, no IX CBPE (2014) e no X CBPE (2016), além de capítulo presente no livro “Questões sobre Energia”, dedicado ao tório como fonte primária energética para reatores nucleares, publicado em 2016. Segundo esses pesquisadores, a alternativa mais viável no curto prazo seria a utilização de compostos de urânio e tório em reatores de terceira geração (Geração III/III+), como o caso do modelo AP1000, o principal PWR comercialmente disponível, fornecido pela Westinghouse.

Com o término de Angra III e a estimativa de construção de uma quarta usina nuclear, o projeto já poderia contemplar óxidos mistos

U-Th como combustível. Simulações computacionais e modelagens matemáticas já foram testadas com excelentes resultados, aguardando apenas a oportunidade de serem provados operacionalmente. Destaca-se o fato de o país possuir instalações e equipamentos apropriados para desenvolver tais estudos sobre o ciclo do combustível tório e o seu emprego em reatores PWR, como os laboratórios do IPEN e o seu reator MB-01. A infraestrutura do CTMSP da MB também pode contribuir tanto com seus laboratórios quanto no fornecimento dos materiais necessários para confecção de pastilhas de óxido de tório ou óxido misto. A experiência histórica do CDTN obtida junto com os alemães contribui para pavimentar esse caminho, que depende menos de limitações estruturais e mais de uma decisão de política pública nesse sentido.

Para o médio e longo prazo consideram-se reatores de quarta geração e, neste caso, seria necessário um projeto de desenvolvimento autóctone. As pesquisas brasileiras também contemplam essa possibilidade. O mapa tecnológico a ser apresentado neste artigo foi desenvolvido mirando um projeto de MSR, cuja viabilidade tecnológica em bancada já foi comprovada, mas deixando em aberto a decisão para o corpo de cientistas responsáveis por avaliar a melhor opção tecnológica. Isto porque ainda há mais opções para um reator de tório, como os refrigerados a gás ou o chamado “amplificador de energia” idealizado por Prof. Carlo Rubbia, Prêmio Nobel de Física (1994).

Pesquisas recentes no Brasil reforçam a possibilidade da utilização de tório em reatores PWR já em operação, como é o caso do AP1000, da empresa Westinghouse. Este modelo da Geração III teve sua primeira unidade comissionada na central nuclear chinesa de SANMEN em setembro de 2018, sendo considerado um dos mais modernos e seguros. Merecem destaque duas dissertações do IME de 2017: a produção de Isadora Conceição Gonçalves, denominada “Tório e suas Aplicações Nucleares”, e a de Caio da Costa Wichrowski, “Reatores a Tório: Análise Evolutiva e Possibilidade de Conversão para Reatores PWR”, comprovando que outras instituições de excelência em pesquisa nuclear no país consideram viável a substituição do urânio enriquecido utilizado nestes reatores por óxidos mistos de urânio e tório, com vantagens técnicas e operacionais, “sem a necessidade de praticamente nenhuma mudança na usina”. O passo seguinte seria considerar um reator projetado no Brasil de quarta geração, como o MSR.

6 . POLÍTICAS PÚBLICAS

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE corrobora com a perspec-

tiva da AIEA de que, 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). Embora o planejamento energético nacional não seja a única fonte, dele se desdobram políticas públicas, a partir das quais projetos e programas são estruturados para serem postos em execução.

Para que políticas públicas sejam criadas e implementadas, existe um processo chamado *policy making* ou *policy cycle* que são, respectivamente, o processo de formulação de políticas públicas ou ciclo de políticas públicas. Reúnem um conjunto de etapas político administrativas, tais como: Identificação; Formulação das Propostas; Legitimação; Implementação; Avaliação (DINITTO, 2011, p. 13-17, tradução nossa).

Antes de existir uma política pública, é necessário que um problema ou necessidade seja identificado, e este entre na agenda política. A formação da agenda política compreende a tomada de conhecimento de uma necessidade ou problema pelos formuladores de políticas públicas e tomadores de decisão, bem como sua inclusão e priorização frente a outras demandas da sociedade. Segundo Heide-mann & Salm (2014, p. 38), “a montagem da agenda talvez seja o mais crítico dos estágios do ciclo de uma política pública”. A Figura 2 ilustra elementos-chave no processo de formulação de políticas públicas.

<p>Formulação da Agenda</p>	<p>Formuladores de Políticas Públicas</p>	<p>Atores e Agentes do Jogo Político</p>	<p>Públicos de Interesse</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Disputas por priorização • <i>Agenda Setting</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Decisores • <i>Policy makers</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Players / Agents</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Stakeholders</i>

Figura 2 - Elementos do processo de formulação de Políticas Públicas

Devido à complexidade tecnológica e à sensibilidade envolvendo questões nucleares, a apresentação de propostas inovadoras na área esbarra em desafios de comunicação. A utilização de mapas tecnológicos tem sido apontada na literatura como uma ferramenta visual sintética útil para a proposição de políticas públicas.

7. MAPA TECNOLÓGICO

Mapa Tecnológico ou *Technology Roadmap* (TRM) consiste em uma técnica para vislumbrar, antecipar e planejar o futuro de um

processo particular ou da tecnologia de um produto através de um processo estruturado de documentação. Trata-se de uma ferramenta desenvolvida na década de 1970 em ambiente corporativo e que, como em muitos exemplos, terminou por ser absorvida e adaptada para tratar de demandas na esfera da administração pública (HILL, 2012; COSNER et al., 2007, WILLYARD, 1987). Phaal et al. (2005) destacam o emprego de mapas tecnológicos para o desenvolvimento de políticas públicas a nível nacional, empregados por *policy makers* nas esferas mais altas de Estado.

Uma das formas de elaborar um TRM emprega uma grande matriz que captura as principais ideias. A Figura 3 corresponde a um modelo genérico de mapa tecnológico denominado multicamadas, composto por camadas, cujo conteúdo corresponde ao descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - 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.

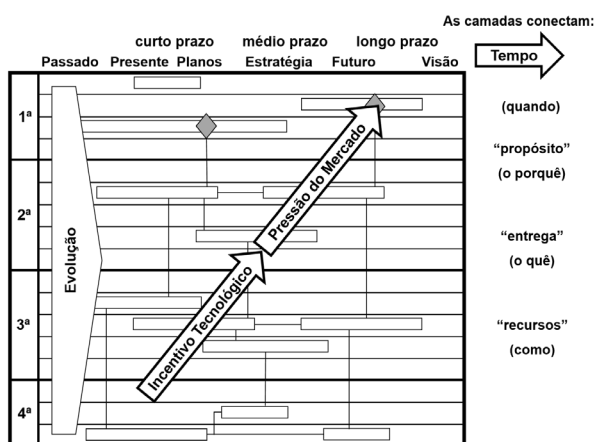


Figura 3 - Mapa Tecnológico – Modelo Genérico Multicamadas

A China é um país que faz uso intensivo de mapas tecnológicos para divulgação oficial de seu planejamento de Estado:

A Academia Chinesa de Ciências (*Chinese Academy of Science – CAS*), que se apresenta como o *think tank* 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 (GUIMA-RÃES, 2019, p. 115).

Tanto a AIEA quanto a Agência Internacional de Energia, junto com a Agência de Energia Nuclear da OCDE (IEA/NEA) utilizam TRMs para divulgar metas, marcos e ações previstas relacionadas com a área nuclear. Uma vez escolhida a ferramenta Mapa Tecnológico para apresentação de uma proposta de construção de um reator nuclear no Brasil utilizando tório como combustível, resta determinar uma metodologia para elaboração do TRM e a sua execução.

8. PREPARAÇÃO PARA ELABORAÇÃO DO MAPA TECNOLÓGICO

Mapas Tecnológicos se apresentam como ferramentas flexíveis. Embora a literatura apresente o Modelo Genérico Multicamadas, este ainda pode ser adaptado para as especificidades do objetivo desejado. No caso de políticas públicas, objetivamos com o TRM alcançar um público heterogêneo buscando simplificar ao máximo as nuances e complexidades tecnológicas. O foco está em atrair o interesse e facilitar o entendimento das necessidades ora levantadas, esclarecendo o impacto desejado das políticas públicas almejadas. O público-alvo inclui formuladores de políticas públicas, decisores, formadores de opinião, públicos de interesse e demais atores e agentes políticos. Merece desta-que, no caso do mapa tecnológico para reatores de tório, a complexidade inerente à questão nuclear para inclusão na agenda política (MUREDDU et al., 2012; GUIMA-RÃES, 2019).

A metodologia utilizada pelos autores baseou-se, no primeiro momento, na escolha de um ponto-de-partida pré-estabelecido, devidamente comprovado como uma referência sólida para o estabelecimento de políticas públicas na área nuclear. A pesquisa bibliográfica

trouxe os documentos “Marcos para o Desenvolvimento da Infraestrutura Nacional de Energia Nuclear – NG-G-3.1 (1ª Revisão)” e “Análise do Status do Desenvolvimento da Infraestrutura Nuclear Nacional – NG-T-3.2 (1ª Revisão)”, publicados em 2015 e 2016 (IAEA, 2015; 2016, tradução nossa). Primeiramente, os autores justificam a escolha por se tratar de publicações oficiais da AIEA, de conhecimento público, disponíveis para a comunidade internacional, atendendo ao critério de acessibilidade. Em seguida, contemplou-se o aspecto técnico, uma vez que as publicações da AIEA oferecem a legitimidade e confiabilidade indicadas em empreendimentos do setor nuclear. Em seguida, considerou-se se a forma de apresentação dos documentos permite a extração de elementos fundamentais para a elaboração de um mapa tecnológico, que são as definições das camadas.

Por fim, destaca-se que os documentos selecionados visam apoiar a implementação e a manutenção de uma infraestrutura nacional de energia nuclear. Deste modo, como a construção de um reator nuclear adotando o CCT é inédita no país, as referências escolhidas permitem elaborar uma arquitetura de política pública nuclear “do zero”. Uma vantagem acerca desta abordagem consiste na eliminação de etapas comuns ao Programa Nuclear Brasileiro, já estabelecidas no Brasil, como questões compartilhadas de segurança, cuja expertise o país já desenvolveu. A Figura 4 (tradução nossa), presente nas duas publicações de referência, ilustra a divisão do processo de implementação composta de três fases mediante o alcance de marcos associados a cada uma das respectivas fases, dentro de um horizonte temporal de 10 a 15 anos.

Embora não esteja descrita, pode-se apreender a existência de uma “Fase Zero”, identificada na Figura 4 mais à esquerda, cujo conteúdo seria “Opção da energia nuclear incluída na estratégia nacional de energia”. No caso deste artigo, a “Fase Zero” seria algo como “Opção de reator de tório incluída no Programa Nuclear Brasileiro”, ou “Projeto de construção no Brasil de um reator utilizando o Ciclo do Combustível Tório” (GUIMARÃES, 2019, p. 136).

Segundo o Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018, marco regulatório da Política Nuclear Brasileira, cabe ao Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro – CDPNB fixar diretrizes e metas para o desenvolvimento do PNB, bem como supervisionar a sua execução. Quando o CDPNB decide estudar um conjunto de políticas públicas dentro do Setor Nuclear Nacional, estabelece um GT – Grupo de Trabalho. A própria redação do Decreto 9600 supracitado configura a entrega principal do GT nº 1. Deste modo, a criação de um GT específico para estudo de viabilidade da construção de um reator de tório no Brasil faria parte da “Fase Zero” e o mapa tecnológico aqui elaborado seria um importante insumo inicial para o estudo das fases e marcos nele propostos.

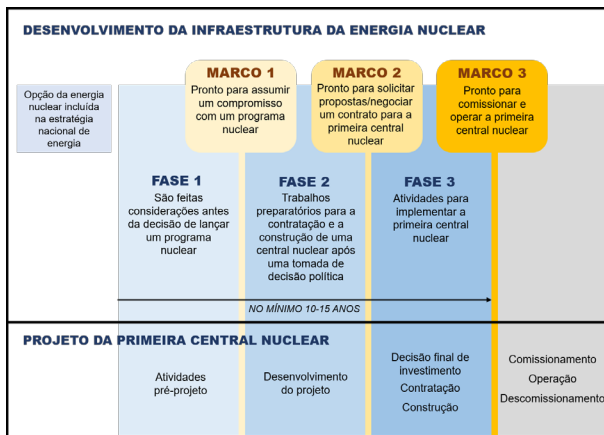


Figura 4 – Marcos e fases necessários para o desenvolvimento de uma infraestrutura de energia nuclear

9. O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DO MAPA TECNOLÓGICO – PRIMEIRA PARTE

Uma vez adotado o modelo genérico de mapa tecnológico denominado multicamadas, o primeiro passo foi a definição de cada uma das camadas. O documento de referência NG-G-3.1 (IAEA, 2015) apresenta 19 itens de infraestrutura que devem ser contemplados para a implementação de um reator nuclear. Cada um dos itens é analisado conforme o marco temporal das fases 1, 2 e 3, que descrevem etapas a serem cumpridas para se alcançar respectivos marcos. O documento também prevê a subdivisão das atividades de infraestrutura entre três organizações-chave que devem existir em cada país: o Governo, o Proprietário/Operador da Planta e o Órgão Regulador. “Cada organização-chave possui um conjunto de papéis e responsabilidades que vão se adequando conforme o avanço do projeto” (GUIMARÃES, 2019, p.133).

Considerando que o Brasil já possui um Programa Nuclear estabelecido e maduro, foi possível selecionar ao menos cinco tópicos classificados como “abrangentes”, pois já se encontram previamente disponíveis no país. A Tabela 2 apresenta cada item com a numeração adotada pelo NG-G-3.1.

Tabela 2 - Itens previamente disponíveis na infraestrutura nuclear do Brasil

Nº	Item	Descrição
2	Segurança Nuclear (<i>Safety</i>)	Reatores PWR que utilizam tório são tão seguros quanto os atuais no Brasil. MSR são ainda mais seguros. Portanto, os critérios utilizados hoje já atendem este quesito.
8	Proteção contra Radiação	O comprometimento com a proteção de trabalhadores e das pessoas presentes na planta e no entorno permanecem no mais alto grau, e as medidas adotadas atualmente podem ser imediatamente adaptadas.
9	Rede Elétrica	Indiferente. Para qualquer fonte geradora de energia elétrica (nucleoelétrica ou não) a rede é basicamente a mesma.
13	Proteção Ambiental	Equivalente. O comprometimento com a proteção ambiental permanece no mais alto grau e com menores riscos.
15	Segurança Nuclear (<i>Security</i>)	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.

Os itens suprimidos na Tabela 2 representam um filtro para simplificação do ma-pa tecnológico e, de forma alguma, representam assuntos de importância secundária. Como o NG-G-3.1 busca apoiar iniciativas em países que não possuem ainda uma planta nuclear, a adaptação prevê um aproveitamento da infraestrutura preexistente no Brasil, relacionadas aos aspectos de segurança (*security* e *safety*), proteção ambiental e contra radiação, bem como a disponibilidade de rede elétrica.

O primeiro filtro proporcionou uma redução de 19 para 14 itens. O passo seguinte buscou agrupar os itens remanescentes em categorias que, posteriormente, foram utilizadas como camadas do mapa tecnológico. As três categorias utilizadas para agrupar os itens de forma sinérgica foram organizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Agrupamento em categorias para compor as camadas do TRM

Nº	Item	Descrição
1ª	Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas	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.
2ª	Ações Intermediárias	Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ou Burocráticas com forte componente técnica / tecnológica.
3ª	Ações Primordialmente Técnicas	Ações cujas questões técnicas e/ou tecnológicas sobressaem fortemente sobre outros aspectos.

A partir da definição das camadas, a ação subsequente foi a distribuição dos 14 itens propostos pelo NG-G-3.1 nas três categorias criadas pelos autores. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam cada uma delas.

Tabela 4 - Itens classificados como ações administrativas, financeiras, políticas e/ou burocráticas – 1ª Camada do Mapa Tecnológico

Nº	Item	Descrição
1	Posição Nacional	Embora o PNB já esteja estabelecido, é imprescindível que o governo brasileiro assegure via marco regulatório o compromisso do desenvolvimento de reatores de tório.
3	Gerenciamento	Afetado pelas decisões no âmbito do CDPNB, a partir das conclusões de GT específico para o projeto.
4	Fundos Governamentais e Recursos Privados para Financiamento e Operação (Proprietário Operador)	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	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, dos quais o Brasil já faz parte. Quanto ao Protocolo Adicional*, está em estudo, e envolve questões de salvaguardas** 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	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, em especial o TNP. O Brasil deve analisar o papel da ABACC*** 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	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 lato sensu. Entretanto, convém verificar a necessidade de adequação. O foco deste item é em segurança (<i>security & safety</i>) e em salvaguardas.
11	Envolvimento dos Públicos de Interesse	Este é um processo contínuo de gestão de relacionamentos, construção de pontes para diálogo e comunicação proativa e efetiva.

* Protocolo Adicional é um aditivo ao TNP de 1997 que amplia os poderes da AIEA quanto à fiscalização concernente às questões nucleares, bem como aplicação de salvaguardas adicionais, do qual o Brasil não é signatário. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/10/sg-ap-status-16-october-2019.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

** Salvaguardas – Conjunto de medidas destinadas à proteção e ao controle de material nuclear, existente em qualquer planta ou instalação do ciclo do combustível nuclear. (CNEN, 2019).

*** 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).

Tabela 5 - Itens classificados como ações intermediárias – 2ª Camada do Mapa Tecnológico

Nº	Item	Descrição
10	Desenvolvimento de Recursos Humanos	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.
18	Envolvimento da Indústria	Intensa participação, seja para exploração do tório ou no desenvolvimento e fornecimento de materiais, equipamentos e componentes.
19	Compras / Suprimentos	A proposta deste trabalho prevê o desenvolvimento autóctone. Entretanto, esse caminho (aquisição externa) não pode ser descartado de imediato.

Tabela 6 - Itens classificados como ações primordialmente técnicas – 3ª Camada do Mapa Tecnológico

Nº	Item	Descrição
12	Local e Instalações de Apoio	Modelos PWR necessitam de disponibilidade de água para resfriamento. Locais inviáveis para PWR podem ser considerados para um MSR.
14	Plano de Emergência	Embora deva ser sempre adequado para uma nova tecnologia, não possui desafios fora do domínio do corpo técnico já formado.
16	Ciclo do Combustível Nuclear	Parte do Ciclo do Combustível Nuclear Tório é bem diferente do Ciclo do Urânio.
17	Gerenciamento de Resíduos Radioativos	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.

Um mapa tecnológico, por ser um elemento gráfico, deve ser tão sintético quanto possível. Visando simplificar a apresentação final do TRM, foram considerados os agrupamentos descritos na Tabela 7, permitindo reduzir o número de camadas de 14 para 10.

Tabela 7 - Camadas do Mapa Tecnológico

Nº	Item	Descrição
1ª	Ações Administrativas, Financeiras, Políticas e/ ou Burocráticas (sete itens ajustados para cinco)	1) Posição Nacional; 3) Gerenciamento; 4) Fundos Governamentais e Recursos Privados para Financiamento e Operação (Proprietário / Operador); [5] Arcabouço Legal / Jurídico; 6] Salva-guardas; 7] Arcabouço Regulatório – Tratar em Conjunto; 11) Envolvimento dos Públicos de Interesse.
2ª	Ações Intermediárias (três itens ajustados para dois)	10) Desenvolvimento de Recursos Humanos; [18-19] Envolvimento da Indústria / Compras / Suprimentos].
3ª	Ações Primordialmente Técnicas (quatro itens ajustados para três)	12) Local e Instalações de Apoio; 14) Plano de Emergência; [16-17] Ciclo do Combustível Nuclear / Gerenciamento de Resíduos Radioativos].

10. O PROCESSO DE ELABORAÇÃO DO MAPA TECNOLÓGICO – SEGUNDA PARTE

A etapa de definição das camadas deve ser executada primeiro, pois cada uma das camadas engloba itens para os quais uma ou mais ações deverão ser planejadas e executadas dentro de cada marco temporal. Cabe a cada área de conhecimento definir que ações devem ser executadas. O desdobramento do resultado das ações executadas deve levar ao alcance de resultados previamente definidos, os marcos de cada item. As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam as propostas de marcos, que deverão ser representados sinteticamente no mapa tecnológico.

Tabela 8 - Itens classificados como ações administrativas, financeiras, políticas e/ou burocráticas – Marcos da 1ª Camada

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.

Tabela 8 - Itens classificados como ações administrativas, financeiras, políticas e/ou burocráticas – Marcos da 1ª Camada (cont.)

N	Tópico	Marco da 1ª Fase	Marco da 2ª Fase	Marco da 3ª Fase
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	Efetuar uma pesquisa entre os diversos públicos 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.

A inclusão de reatores de tório na Política Nacional configura a pedra angular da inclusão do assunto na agenda política. Como a Marinha do Brasil responde pela área no âmbito da defesa, à qual vemos o desenvolvimento do ciclo do combustível urânio e o projeto do reator de propulsão naval nuclear, sua liderança no apoio e incentivo ao desenvolvimento de reatores de tório poderia alavancar o processo. O gerenciamento eficaz requer o estabelecimento de um cronograma viável e uma forte liderança. As questões financeiras e orçamentárias não devem concorrer com os projetos já existentes na área. A segurança jurídica aumenta a atratividade para investimentos externos. O envolvimento adequado dos *stakeholders* e o eficiente gerenciamento pode ser alcançado a partir da criação de um ou mais GTs do CDPNB (GUIMARÃES, 2019).

Tabela 9 - Itens classificados como ações intermediárias – Marcos da 2ª Camada

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 <i>stakeholders</i> , 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 / Compras / Suprimentos	Verificar a capacidade e os gargalos da indústria 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 matérias-primas, materiais, equipamentos, processos e serviços.	Assegurar sustentabilidade de uma cadeia de suprimentos nacional capaz de fornecer matérias-primas, materiais, itens, peças, componentes e equipamentos com know-how relacionados direta e indiretamente com todas as etapas de construção, testes e posterior operação.	Viabilizar o aprimoramento contínuo e dar suporte para 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.

A formação e manutenção de equipes multidisciplinares de recursos humanos na área nuclear necessita de um programa similar ao Programa de Recursos Humanos para o Setor Nuclear – PRONUCLEAR, implantado em 1976 e desativado gradativamente a partir de 1983, que formou uma geração de profissionais na área nuclear, no auge da execução do Acordo Nuclear Brasil-Alemanha. O “PROTÓRIO” configuraria um programa de capacitação de recursos humanos para atuar com o ciclo do combustível tório e tecnologias de reatores baseadas no CCT. A viabilidade econômica do projeto também depende de uma cadeia de suprimentos estabelecida (*Supply Chain*), assim como de uma indústria, preferencialmente nacional, capaz de atender às demandas do projeto sem dependência econômico-financeira, com portfólio e mercado diversificado. A flexibilização na pesquisa do monopólio e da lavra de minérios radioativos pode acelerar a disponibilidade comercial de matéria-prima (PATTI, 2014; GUIMARÃES, 2019, p. 127).

Tabela 10 - Itens classificados como ações primordialmente técnicas – Marcos da 3ª Camada

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, considerando a tecnologia de reator escolhida (PWR ou outra).	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.	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 CCT, 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.

Propõe-se a cooperação formal e efetiva entre instituições de ciência e tecnologia (ICTs) nacionais e estrangeiras, o estímulo a *start-ups* tecnológicas e uma participação ativa do Brasil no INPRO e no GIF para domínio do CCT. O ganho de flexibilidade na escolha da localização de um reator de tório a sal fundido tipo MSR, por exemplo, dada as características tecnológicas de independência de fontes água, reduzido risco de acidentes e sem as restrições de um PWR, contribuem para redução de obstáculos recorrentes para novas instalações nucleares (GUIMARÃES, 2019).

O passo final consiste em transportar as ideias contidas nas Tabelas 8, 9 e 10 de forma sintética para o Mapa Tecnológico. As Figuras 5 e 7 apresentam o Mapa Tecnológico em sua versão final. Na Figura 5, um conjunto de cores ajuda a destacar os elementos do TRM. As cores são explicadas na legenda apresentada na Figura 6. Na Figura 7, a versão simplificada do TRM sem cores.

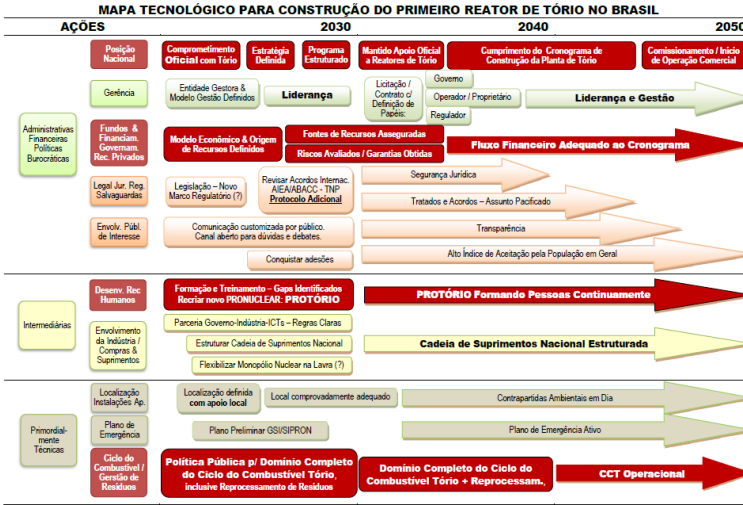


Figura 5 – Mapa Tecnológico finalizado em cores

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

Figura 6 – Legenda de cores do Mapa Tecnológico

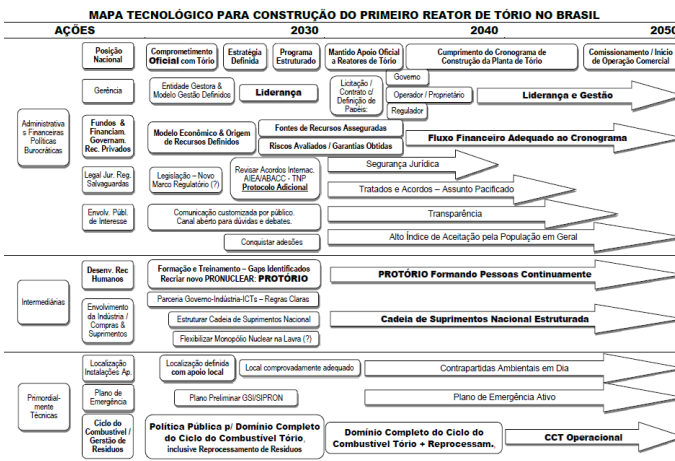


Figura 7 – Mapa Tecnológico finalizado sem cores

Os marcos foram distribuídos de forma conservadora, em décadas. Essa primeira apresentação do mapa tecnológico serve de base para provocar o debate sobre cada um dos aspectos descritos em cada camada. O projeto de construção de um reator de tório, bem como a elaboração de políticas públicas para viabilizar a sua realização representam uma tarefa para várias equipes multidisciplinares.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo busca sintetizar uma pesquisa consolidada pelos autores. O Mapa Tecnológico desenvolvido visa apoiar uma proposta de inclusão de reatores de tório na agenda política. Pretende-se que seja uma ferramenta para auxiliar no esclarecimento durante o debate político, permitindo a sintetização em um quadro de um projeto de nova tecnologia nuclear, assunto notoriamente complexo. É importante frisar que cada elemento de cada camada do mapa condensa uma série de questões e assuntos.

A sua principal contribuição corresponde à 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. Esta é uma alternativa promissora e o Brasil possui vocação nuclear e capacidade técnica para alcançar esse marco tecnológico. A demanda por energia elétrica seguirá crescente nos próximos anos. A disponibilidade de uma energia de base, segura e confiável, alinhada às questões climáticas, com custo competitivo, sem problemas de proliferação, cuja tecnologia possui potencial econômico para exportação e geração de divisas deve ser analisada com interesse. Os reatores de tório a sal fundido possuem todas as características citadas.

Este trabalho também trouxe um procedimento inédito para elaboração de um mapa tecnológico desde a sua idealização até a decisão dos seus elementos constituintes. A ferramenta TRM se mostra útil para a apresentação de propostas complexas para políticas públicas, e a metodologia utilizada pode ser adaptada para outras áreas do conhecimento.

O debate geopolítico e o emprego de termos como Geopolítica Nuclear, Geopolítica Nuclear Brasileira, Geopolítica Energética e Geopolítica de Materiais Estratégicos contribui para ampliar a dimensão dos assuntos cotidianos, trazendo à tona a complexa disputa de poder e os conflitos subjacentes às decisões de países e organismos internacionais. Ainda, destaca o Brasil como ator importante na área nuclear e, portanto, no cenário internacional.

Por fim, o mapa tecnológico não representa um fim em si, mas

exatamente o oposto: um ponto de partida para a inclusão do tema na agenda política nacional, viabilizando o debate e a implantação de políticas públicas, com investimento para a pesquisa visando a construção e operação de plantas nucleares com reatores de tório que contribuirão para o desenvolvimento do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 Sa-ga, 1969.

BASU, Dipak; MIROSHNIK, Victoria W. The Political Economy of Nuclear Energy: prospects and retrospect. Cham, Switzerland: Palgrave Macmillan, 2019.

BRASIL. MB. Marinha do Brasil. Programas Estratégicos: Programa Nuclear da Marinha (PNM). Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos>>. Acesso em: 03 jun. 2021.

CONANT, Melvin A.; GOLD, Fern R. A Geopolítica Energética. Rio de Janeiro: Bi-blioteca do Exército, 1981.

COSNER et al. Integrating Roadmapping into Technical Planning, Research-Technology Management. Research-Technology Management. 50:6, 31-48. 2007. DOI: 10.1080/08956308.2007.11657471.

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

DINITTO, Diana M. Social Welfare: Politics and Public Policy. 7. ed. Boston, Massa-chussets: Pearson Education, 2011.

FIRST AP1000 unit begins generating power. World Nuclear News, WNN, 02 jul. 2018. Disponível em: < <https://www.world-nuclear-news.org/NN-First-AP1000-unit-begins-generating-power-0207184.html>>. Acesso em: 24 dez. 2021.

GONÇALVES, Isadora C. Tório e suas aplicações nucleares. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Instituto Militar de Engenharia, IME. Rio de Janeiro, 2017.

GUIMARAES, Gustavo A. P. Mapa Tecnológico para Reatores de Tório no Brasil. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Estudos Marítimos) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2019.

HAYDT, Heliton M. Estado Atual da Tecnologia da Produção de Tório Metálico. Publicação IEA nº 63. Setembro, 1963. Separata de ABM. Boletim da Associação Brasileira de Metais nº 77, Vol. 19. São Paulo: IEA, 1963.

HEIDEMANN, Francisco G.; SALM, José F. Políticas Públicas e Desenvolvimento: bases epistemológicas e modelos de análise. 3 ed. Brasília: Ed. Unb, 2014.

HILL, Arthur V. The Encyclopedia of Operations Management. New Jersey: Pearson Education, 2012.

IAEA. Database of World Thorium Deposits and Resources – ThDEPO. Disponível em: < <https://infcis.iaea.org/THDEPO/About.cshtml>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

_____. INPRO. Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES, Nuclear Energy Series No. NF-T-4.9. Vienna: IAEA, 2018.

_____. Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development. IAEA Nuclear Energy Series. No. NG-T-3.2 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2016.

_____. Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. IAEA Nuclear Energy Series. No. NG-G-3.1 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2015.

_____. NEA. Uranium 2020: Resources, Production and Demand. NEA No. 7551. OECD, 2020. Red Book 2020.

_____. Thorium Based Fuel Options for the Generation of Electricity: Developments in the 1990s, IAEA-TECDOC-1155. Vienna: IAEA, 2000.

_____. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Thorium Occurrences, Deposits and Resources, IAEA-TECDOC-1877. Vienna: IAEA, 2019.

IKUTA, Álvaro. Tecnologia de Purificação de Concentrados de Tório e sua Transformação em Produtos de Pureza Nuclear. Estudo do Sistema $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 - \text{HNO}_3 - \text{NaNO}_3 - \text{TBP} - \text{VARSOL}$. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. IEA 035. São Paulo, 1977.

KFA. NUCLEBRAS. Program of research and development on the Thorium utilization in PWR – Final Report. JUL – SPEZ 488/NUCLEBRAS – CDTN 600-88, Jülich-KFA, 1988.

KRUMHOLZ, P.; BRIL, K. J. Produção de Óxido de Tório Nuclearmente Puro. Publicação IEA nº 115. Dezembro, 1965. São Paulo: IEA, 1965.

KOK, Kenneth, D. (ed.). Nuclear Engineering Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

LACOSTE, Yves. Géopolitique: La longue histoire d'aujourd'hui. Espagne: Larousse, 2012.

LAINETTI, Paulo E. O. et al. Histórico e Perspectivas da Produção e Purificação de Compostos de Tório no IPEN. Disponível em: < <https://www.ipen.br/biblioteca/2000/cgen/07195.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2021.

MAIORINO, José R. et al. Da viabilidade da utilização de óxidos mistos de tório-urânio em um reator nuclear de geração III (AP1000). In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 10, 2016. X CBPE, 2016, Gramado. Anais [...]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Maiori-no/publication/309742618_Da_viabilidade_da_utilizacao_de_oxidos_mistos_de_torio-ura-nio_em_um_reator_nuclear_de_geracao_III_AP1000/links/5821ba5b08aece82e27efef7/Da-viabilidade-da-utilizacao-de-oxidos-mistos-de-torio-uranio-em-um-reator-nuclear-de-geracao-III-AP1000.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2021.

MAIORINO, Jose R. et al. Possibilidades para o Uso do Tório como Fonte de Energia Primária para a Geração de Eletricidade. In: QUESTÕES SOBRE ENERGIA.1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2016, v.1, p. 327-351.

MAIORINO, José R. et al. Thorium as a New Primary Source of Nuclear Energy. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 9, 2014. IX CBPE, 2014, Florianópolis. Anais [...]. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Jose-Maiori-no/publication/281270642_Thorium_as_a_New_Primary_Source_of_Nuclear_Energy/links/55ddaa4c08ae79830bb4e9bc/Thorium-as-a-New-Primary-Source-of-Nuclear-Energy.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2021.

MATTOS, Carlos de M. Brasil, geopolítica e destino. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, J. Olympio, 1975.

MOREIRA, José M. L. et al. Uma Proposta de Estudo Brasileira Visando a Utilização de Tório em Reatores. In: International Nuclear Atlantic Conference 1999. INAC 1999. CD. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1999/PDF/CG34AE.PDF>>. Acesso em: 24 dez. 2021.

MUREDDU, Francesco et al. A New Roadmap for Next-Generation Policy-Making. ICEGOV, Albany, New York, USA, p. 62-66, out. 2012. DOI: 10.1145/2463728.2463743.

OGUNNUBI, Olusola. South Africa's soft power and the diplomacy of nuclear Geopolitics. *GeoJournal* (2020). DOI: 10.1007/s10708-020-10252-x.

PATTI, Carlos. O programa nuclear brasileiro: uma história oral. 1. ed. digital. Rio de Janeiro: FGV-CPDOC, 2014.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Developing a Technology Roadmapping System” in A Unifying Discipline for Melting the Boundaries Technology Management, 2005, pp. 99-111, DOI: 10.1109/PICMET.2005.1509680.

ROCHA FILHO, Álvaro e GARCIA, João C. V. Renato Archer: energia atômica, soberania e desenvolvimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.

TOLMASQUIM, Maurício T. (coord.). Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

VALLE MACHADO DA SILVA, M. (2021). Brazil and the Refusal to the Additional Protocol: Is It Time to Review this Position? Carta Internacional, 16(1), e1108. DOI: <https://doi.org/10.21530/ci.v16n1.2021.1108>.

WICHROWSKI, Caio C. Reatores a Tório: Análise Evolutiva e Possibilidade de Con-versão para Reatores PWR. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Instituto Militar de Engenharia, IME. Rio de Janeiro, 2017.

WILLYARD, Charles H.; MCCLEES, Cheryl W. Motorola's Technology Roadmap Process. Research Management, 30:5, p. 13-19. 1987. DOI: 10.1080/00345334.1987.11757057.

YAMAURA, Mitiko. Determinação de Tório em Soluções do Processo THOREX por Espectrometria de Fluorescência de Raios – X. Dissertação (Mestrado na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1982.