

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC (T) VIVIANE CRISTINA NOGUEIRA MIRANDELLA

**OS RECURSOS ENERGÉTICOS NA GEOPOLÍTICA DOS ESTADOS:
As oportunidades geopolíticas com a
Transição Energética Brasileira**

Rio de Janeiro

2024

CC (T) VIVIANE CRISTINA NOGUEIRA MIRANDELLA

**OS RECURSOS ENERGÉTICOS NA GEOPOLÍTICA DOS ESTADOS:
As oportunidades geopolíticas com a
Transição Energética Brasileira**

Monografia apresentada à Escola de
Guerra Naval, como requisito parcial para
a conclusão do Curso Superior.

Orientador: CMG (RM1) Jobim

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval

2024

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

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

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

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

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

DEDICATÓRIA

Dedico a minha família, com todo meu amor e gratidão, que sempre acredita em mim e me dá forças para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde e perseverança. A Sua misericórdia e o Seu amor me impulsionam e me constroem todos os dias da minha vida.

Ao meu esposo Cláudio, por estar sempre ao meu lado me incentivando nos desafios da minha carreira.

Aos meus filhos Matheus e Giovanna, por entenderem minhas ausências e por me incentivarem a continuar, mesmo quando penso não ser capaz.

Aos meus pais, Paulo e Valeria, pela educação que me proporcionaram e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão Paulo Junior pelas dicas e orientações.

Aos meus colegas de turma, por compartilharmos as aflições e pela troca de experiências ao longo do curso.

Aos meus colegas e Chefia na AMAZUL, por compreenderem a importância do Curso e permitirem as ausências quando necessárias.

E por fim, expresso minha gratidão ao corpo docente e administrativo da Escola de Guerra Naval, e ao meu Orientador.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O objeto de pesquisa é a transição energética brasileira e as oportunidades geopolíticas que se vislumbram para o país, diante da importância que os recursos energéticos desempenham na geopolítica dos Estados. Partindo-se da hipótese de que a transição energética de baixo carbono seria uma oportunidade para o desenvolvimento da energia nuclear, traçou-se como objetivo principal de análise a transição energética brasileira com enfoque no setor de geração de energia. Como objetivos secundários discriminou-se a geopolítica das energias renováveis e não renováveis, em que foi possível observar como os recursos energéticos influenciam as relações políticas e econômicas entre os Estados, bem como destacou-se a preocupação mundial com o clima do planeta, devido à predominância de combustíveis fósseis nas matrizes energéticas dos países. O assunto leva os Estados a se reunirem em Conferências organizadas pela Nações Unidas, com o objetivo de verificar se as metas para a descarbonização estão sendo cumpridas. Outro objetivo secundário foi a descrição das matrizes energética e elétrica brasileiras, que, apesar de terem predominância de energias renováveis, são influenciadas por variações climáticas, comprometendo a confiabilidade e a disponibilidade. Nesse contexto, desponta a energia nuclear, pois mesmo não sendo considerada renovável, é limpa por não produzir emissão de dióxido de carbono durante a geração de eletricidade, além de ter a vantagem de oferecer segurança energética. Com isso, há tendência de aumento na demanda por energia nuclear e, conseqüentemente, por combustível nuclear. Outra expectativa é o crescimento da utilização de Pequenos Reatores Modulares, que apresentam algumas vantagens em relação aos reatores tradicionais. Por fim, vislumbraram-se algumas oportunidades geopolíticas para o Brasil com a transição energética de baixo carbono.

Palavras-chave: Geopolítica; Recursos Energéticos; Transição Energética; Energia Nuclear; Pequenos Reatores Modulares.

ABSTRACT

Energy resources in the geopolitics of the countries: Geopolitical opportunities with the Brazilian energy transition

The subject is the Brazilian energy transition and the geopolitical opportunities that lie ahead for the country, given the importance that energy resources play in the geopolitics of states. Based on the hypothesis that the low-carbon energy transition would be an opportunity for the development of nuclear energy, the main objective of the analysis was the Brazilian energy transition with a focus on the power generation sector. Secondary objectives included the geopolitics of renewable and non-renewable energies, where it was possible to observe how energy resources influence political and economic relations between states, as well as highlighting the global concern about the planet's climate, due to the predominance of fossil fuels in countries' energy matrices. This issue has led states to meet at conferences organized by the United Nations, with the aim of verifying whether the targets for decarbonization are being met. Another secondary objective was to describe the Brazilian energy and electricity matrices, despite of the predominance of renewable energies, they are influenced by climatic variations, compromising reliability and availability. In this context, nuclear energy stands out, because although it is not considered renewable, it does not produce carbon dioxide emissions during electricity generation, and offers energy security.

Keywords: Geopolitics; Energy Resources; Energy Transition; Nuclear Energy; Small Modular Reactors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	— Principais Marcos da Conferência das Nações Unidas.....	20
FIGURA 2	— Matriz Energética Brasileira.....	23
FIGURA 3	— Comparação de energia oriunda de fontes não renováveis e renováveis no Brasil e no mundo.....	24
FIGURA 4	— Matriz Elétrica Brasileira.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDAN	— Associação Brasileira para Desenvolvimento de Atividades Nucleares
ABEN	— Associação Brasileira de Energia Nuclear
AEN	— Agência da Energia Nuclear
AMAZUL	— Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A.
ANEEL	— Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	— Balanço Energético Nacional
CBEE	— Centro Brasileiro de Energia Eólica
CIANA	— Centro de Instrução e Adestramento Nuclear de Aramar
CINA	— Centro Industrial de Aramar
COP	— Conferência das Partes
ELETRORAS	— Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
GEE	— Gases de Efeito Estufa
GW	— Gigawatt
IAEA	— Agência Internacional da Energia Atômica
IBNI	— Banco Internacional de Infraestrutura Nuclear
INB	— Indústrias Nucleares do Brasil
INL	— Laboratório Nacional de Idaho
IPCC	— <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPEN	— Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LEI	— Laboratório de Enriquecimento Isotópico
LOCA	— Loss of Coolant Accident
MB	— Marinha do Brasil
MW	— Megawatt
NDCs	— <i>Nationally Determined Contributions</i>
ONU	— Organização das Nações Unidas
OPEP	— Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PNE	— Plano Nacional de Energia
PROINFA	— Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	— Sistema Interligado Nacional
SMR	— <i>Small Modular Reactors</i>
UFPE	— Universidade Federal de Pernambuco

- UNFCCC — Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do
Clima
- USEXA — Usina de Hexafluoreto de Urânio
- U235 — Urânio de massa atômica 235

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	GEOPOLÍTICA ENERGÉTICA.....	15
2.1	GEOPOLÍTICA DAS ENERGIAS NÃO RENOVÁVEIS.....	16
2.2	GEOPOLÍTICA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	18
2.3	ACORDOS INTERNACIONAIS.....	19
2.4	TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	21
3	MATRIZ ENERGÉTICA E MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	22
3.1	ENERGIA HIDRELÉTRICA.....	25
3.2	ENERGIA EÓLICA.....	26
3.3	BIOMASSA.....	27
3.4	ENERGIA SOLAR.....	28
3.5	ENERGIA NUCLEAR.....	29
3.5.1	Combustível nuclear.....	32
3.5.2	Pequenos reatores modulares.....	34
4	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Os recursos energéticos são fontes de energia que podem ser exploradas e utilizadas para gerar eletricidade, desempenhando um papel fundamental na geopolítica, uma vez que influenciam as relações entre os Estados. Ao longo dos séculos, as nações competiram por acesso e controle desses recursos, levando a conflitos, alianças e negociações complexas. Recursos como petróleo, gás natural, carvão e urânio são especialmente importantes nesse cenário.

A geopolítica dos recursos energéticos é moldada por vários fatores como: distribuição geográfica das reservas, demanda global por energia, avanços tecnológicos e a preocupação com as mudanças climáticas. Os países ricos em recursos energéticos muitas vezes têm vantagens econômicas e políticas significativas. Por outro lado, os países dependentes de importações enfrentam vulnerabilidades e pressões externas.

Assim, a preocupação com as mudanças climáticas e a descarbonização foi pauta da 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em que foi adotado o Acordo de Paris¹, em dezembro de 2015. Por intermédio deste Acordo, os Estados envidarão esforços para limitar o aumento da temperatura média mundial a 1,5°C, além de agirem para manter esse aumento “bem abaixo” dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais (Acordo de Paris, 2015).

Nesse contexto, os Estados discutem como a utilização de combustíveis fósseis (não renováveis), principalmente o petróleo e o carvão, impactam a natureza e contribuem para as mudanças climáticas, especificamente nas emissões de carbono, que promovem o desequilíbrio das temperaturas mundiais.

A transição energética, que é a mudança de um sistema energético baseado em fontes de energia não renováveis, para um sistema baseado em fontes de energia renováveis, surge como parte fundamental da estratégia para redução das emissões

¹ O Acordo de Paris é um tratado global, adotado em dezembro de 2015 pelos países signatários da UNFCCC. Esse acordo rege medidas de redução de emissão de dióxido de carbono e tem por objetivos fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos gerados por essa mudança (Acordo de Paris, 2015).

de gases de efeito estufa² (GEE), contribuindo para o alcance das metas de descarbonização e de limitação do aquecimento global.

Contudo, somente na 28ª Conferência das Partes (COP 28), realizada em Dubai, em dezembro de 2023, chegou-se a um consenso no qual os países se comprometeram a se afastarem (*transitioning away*) dos combustíveis fósseis. O Brasil também se comprometeu a reduzir 48% das emissões até 2025 e 53% até 2030, além de atingir neutralidade climática até 2050.

Durante a COP 28, 22 países, incluindo os EUA, o Reino Unido, o Japão, a Coreia do Sul e a França, assinaram uma declaração reconhecendo a importância da energia nuclear para atingir a meta da descarbonização, comprometendo-se a triplicar a sua capacidade nuclear até 2050. Destaca-se que a energia nuclear não é considerada uma fonte de energia renovável, mas é limpa em termos de emissões de GEE, pois as usinas nucleares não produzem emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante a geração de eletricidade.

Logo, o crescimento da energia nuclear demandará a procura por urânio, elemento químico encontrado na natureza (rochas, solos e água) que é o combustível mais utilizado nas usinas nucleares. Antes de ser usado, precisa passar por processos de enriquecimento, a fim de aumentar a sua eficiência. O Brasil é um dos cinco países no mundo que tem condições de extrair, beneficiar e transformar em urânio enriquecido, o que poderá ser uma oportunidade geopolítica para o país (Silva Neto, 2022).

Com a tendência de expansão da energia nuclear, alguns países já estudam a possibilidade de substituir as termelétricas a carvão por pequenos reatores modulares (SMR³ na sigla em inglês) que são reatores de nova geração que podem ser instalados em pontos estratégicos. O Brasil tem potencial para se tornar um exportador de conhecimento e tecnologia nuclear, podendo realizar parcerias com os países que estão se estruturando na área de SMR. Nas próximas décadas, a geração de energia nuclear mundial tende a ser baseada em modelos de SMR (Brasil, 2020).

Para uma transição energética de baixo carbono, a matriz energética global precisa passar por mudanças significativas neste século, a fim de alcançar as metas

² GEE são componentes gasosos da atmosfera que absorvem e emitem radiação infravermelha, contribuindo para o efeito estufa. O Dióxido de Carbono (CO₂) é o GEE mais abundante resultante da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e processos industriais (EPE, 2019).

³ SMR — *Small Modular Reactors*

de descarbonização. A superação dos combustíveis fósseis visa também suplantar os problemas socioeconômicos de pobreza, fome e acesso à energia, que torna algumas regiões vulneráveis as mudanças climáticas, sendo algumas delas ricas em recursos energéticos (Meza, 2018).

Em que pese o Brasil possuir uma matriz elétrica limpa, com destaque para a energia hidrelétrica, que representa a maior parte da capacidade instalada, ela sofre forte influência das variações climáticas, o que pode comprometer a confiabilidade e a disponibilidade da energia ofertada. A transição energética é uma oportunidade para se desenvolver uma infraestrutura diversificada, que possa garantir um suprimento estável, confiável e acessível de energia.

Diante da importância do tema e do papel fundamental que os recursos energéticos desempenham na geopolítica dos Estados, este trabalho tem como objeto a ser estudado a transição energética brasileira. Para tanto, pretende-se responder ao seguinte questionamento: quais as oportunidades geopolíticas que se abrem para o Brasil com a transição energética de baixo carbono? parte-se da hipótese que tal transição é uma possibilidade para o desenvolvimento da energia nuclear no país.

A pesquisa tem como objetivo geral analisar a transição energética brasileira, com foco no setor de geração de energia, e possui como objetivos secundários discriminar a geopolítica das energias não renováveis e das renováveis, descrever a matriz energética e a matriz elétrica brasileira, bem como identificar as oportunidades geopolíticas com a transição energética no Brasil.

Diante disso, a presente pesquisa enquadra-se como qualitativa, sendo utilizado o método hipotético-dedutivo. As pesquisas bibliográficas e documental serão utilizadas como método para responder à questão de pesquisa, uma vez que esta técnica busca, em fontes primárias e secundárias, o material teórico produzido e onde o tema de estudo está abordado, possibilitando o contato do pesquisador com o assunto de interesse (Lakatos e Marconi, 2005).

A partir do levantamento de dados bibliográficos e documentais, será empregada uma análise qualitativa de artigos científicos, teses, acordos internacionais que tratam do assunto da pesquisa. Feita a análise, pretende-se identificar se a hipótese será confirmada e quais as oportunidades que se vislumbram para o Brasil com a transição energética.

Por fim, para alcançar o objetivo geral, esta monografia está dividida em quatro capítulos, sendo o primeiro deles a presente introdução. O segundo capítulo aborda o

referencial teórico utilizado por meio de uma revisão de literatura. No capítulo três são apresentadas a matriz energética e a matriz elétrica brasileira. O quarto capítulo consiste em uma conclusão que pretende responder à questão de pesquisa, considerando a complexidade do tema e as limitações impostas a este trabalho.

2. GEOPOLÍTICA ENERGÉTICA

Neste capítulo estão dispostos os conhecimentos necessários à elucidação do problema da pesquisa, visando a identificação dos principais conceitos utilizados na monografia. Com isso, apresenta-se: a definição e principais características da geopolítica energética, dos acordos internacionais e da transição energética de baixo carbono.

A definição de geopolítica é o estudo da influência de fatores geográficos, econômicos, culturais e demográficos sobre a política e as relações internacionais. Este termo foi utilizado pela primeira vez, no final do século XIX, pelo cientista político Rudolf Kjellén⁴. “Para Kjellén, a geopolítica seria uma ciência para o exercício do poder político do Estado e para fornecer uma visão estratégica para a política internacional” (EPE, 2019, p.12).

Segundo Rangel (2021), com a geopolítica a sociedade passou a observar a natureza de forma estratégica, na busca de obter recursos para saciar suas necessidades, bem como para permitir sua expansão e imperialismo. Porém, as concepções modernas de geopolítica são mais abrangentes, incorporando também as questões relacionadas as disputas econômicas, ao meio ambiente, guerras cibernéticas, inovações tecnológicas e mudanças climáticas (Rangel, 2021).

A geopolítica energética refere-se ao estudo de como os recursos energéticos, como petróleo, gás natural, carvão e energias renováveis influenciam as relações políticas e econômicas entre os Estados. Analisa-se a distribuição geográfica desses recursos, a interdependência entre nações produtoras e consumidoras e o impacto de eventos políticos e econômicos no mercado global de energia.

Na geopolítica da energia, alguns aspectos importantes merecem destaque, tais como: a distribuição de recursos caracterizada pela localização geográfica dos

⁴ Johan Rudolf Kjellén foi um cientista político sueco (1894-1922) que cunhou o termo geopolítica, em 1899. O seu trabalho foi inspirado pela obra geografia política do geógrafo alemão Friedrich Ratzel (1844-1904) (Pereira, 2022).

recursos energéticos, que confere vantagens estratégicas a certos países, a segurança energética que é a capacidade de um Estado garantir um suprimento estável e acessível de energia e a transição energética – mudança para fontes de energia renováveis ou de baixa emissão de carbono.

Nesse contexto, a transição energética é um exemplo da evolução dinâmica do setor de energia, fazendo com que os países busquem novos recursos energéticos. O investimento em inovação e pesquisa é fundamental, a fim de fomentar o descobrimento de novas formas de gerar e armazenar energia limpa, bem como aperfeiçoar as tecnologias já existentes, tornando-as mais eficientes e economicamente viáveis. Nesse diapasão, o equilíbrio de poder nas relações internacionais será atingido pela descoberta e pela exploração de novas fontes de energia (Pereira, 2022).

Os recursos energéticos frequentemente estão no centro de conflitos internacionais. Disputas territoriais em áreas ricas em recursos, como o mar do Sul da China e o Ártico, exemplificam como a busca por controle de recursos pode gerar tensões.

Por outro lado, a necessidade de recursos energéticos tende, também, a promover a cooperação entre Estados. Projetos conjuntos de infraestrutura energética, como oleodutos e gasodutos, e acordos internacionais para a exploração e compartilhamento de recursos são exemplos de como a energia pode ser um fator de integração.

Portanto, a geopolítica energética é um campo multidisciplinar que examina como o controle, a distribuição e o uso de recursos energéticos influenciam o poder e as relações entre os Estados. Se por um lado pode provocar instabilidade econômica e empobrecimento, por outro pode promover prosperidade e desenvolvimento econômico.

2.1 GEOPOLÍTICA DAS ENERGIAS NÃO RENOVÁVEIS

Os recursos não renováveis são aqueles que se formaram ao longo de milhões de anos e, uma vez esgotados, não podem ser regenerados na escala de tempo humana. Ou seja, eles existem em quantidades limitadas na natureza. Os mais comuns são o petróleo, o carvão e o gás natural. A exploração desses recursos, assim

como seu consumo excessivo, pode levar a escassez e impactos ambientais significativos (Meza, 2018).

Ao longo da história da humanidade a energia sempre foi primordial. De acordo com Amory Lovins⁵ o fogo nos tornou humanos e os combustíveis fósseis nos tornaram modernos. A evolução das fontes de energia é um dos fatores que pode refletir no progresso da humanidade, passando por diversas fases marcadas por inovações tecnológicas e mudanças nas necessidades sociais e econômicas (Lovins, 2012).

De acordo com Meza, 2018, os primeiros humanos dependiam da força muscular para realizar tarefas (energia endossomática), complementada pela domesticação de animais para transporte e agricultura. Seguiu-se o uso da madeira para aquecimento, cozimento e construção e o início da utilização de fontes primárias como a hidráulica (moinhos) e eólica (moinhos de ventos e velas de navios) (Meza, 2018).

Durante os séculos XVIII e XIX, o carvão mineral tornou-se a principal fonte de energia para alimentar máquinas a vapor, que revolucionaram a indústria e o transporte e foi significativo na Primeira Revolução Industrial. Ao final do século XIX, a extração comercial de petróleo começou a substituir o carvão em várias aplicações, especialmente com a invenção do motor de combustão interna (EPE, 2019).

Já a partir do século XX, o petróleo tornou-se a principal fonte de energia para transporte e como matéria-prima para a indústria petroquímica. Porém, o carvão mineral dominou a matriz energética primária até o pós-guerra, quando foi ultrapassado pelo petróleo (EPE, 2019).

Os combustíveis fósseis, nos últimos dois séculos, tornaram-se instrumentos de poder político, trazendo nova configuração à geopolítica internacional. Em especial, a indústria do petróleo refere-se às interações políticas e econômicas entre países e regiões em relação à produção, distribuição e seu consumo. Muitos países dependem das importações de petróleo para atender suas necessidades energéticas, criando relações de dependência e fragilidade, especialmente em relação aos grandes produtores (EPE, 2019).

⁵ Amory Bloch Lovins, nascido em 1947, é um físico e escritor americano. Autor de 31 livros e mais de 700 artigos, promoveu a eficiência energética e o uso de fontes de energia renováveis. Disponível em: <<https://rmi.org/people/amory-lovins/>>. Acesso em: 12 ago. 2024

Por outro lado, países como Arábia Saudita, Rússia, Estados Unidos e membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP)⁶ desempenham papéis fundamentais na geopolítica do petróleo, devido à sua capacidade de influenciar os preços mundiais e a oferta do produto.

Cabe ressaltar que, além dos recursos fósseis serem finitos, o movimento mundial caminha em direção a fontes de energia limpas para redução das emissões de carbono, o que afetará a geopolítica das energias não renováveis. Porém, é esperado que as energias fósseis convivam com as energias renováveis na matriz energética mundial por algum tempo, principalmente pela resistência à transição dos países produtores de combustíveis fósseis.

2.2 GEOPOLÍTICA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

À medida que o mundo avança em direção a um futuro mais sustentável, destacam-se as energias renováveis que são originadas de processos naturais como as fontes solar, eólica e hidrelétrica e diferentemente das energias fósseis são abundantes e intermitentes. Porém, essa intermitência cria desafios para a segurança energética, levando ao desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia e redes inteligentes, influenciando a dinâmica geopolítica (Carmona, 2020).

A velocidade da transição energética para uma matriz mais limpa dependerá de estratégias adotadas por cada Estado, condicionada a evolução das tecnologias que permitirão o melhor aproveitamento das fontes de energia renovável e o armazenamento da energia gerada pelas fontes, uma vez que são consideradas intermitentes (Pereira, 2022).

Afirma Meza (2018) que,

O desafio mais importante, e provavelmente o mais complexo de resolver, para conter os impactos da crise ecológica global e enfrentar as mudanças climáticas, é a descarbonização de uma economia global que se desenvolveu nos últimos dois séculos usando combustíveis fósseis. A descarbonização implica reduzir e eliminar as emissões de CO₂ geradas da queima de combustíveis fósseis para energizar o crescimento da economia global, o aumento populacional e as formas sociais de vida contemporâneas altamente intensivas em energia (Meza, 2018, p. 26).

⁶ OPEP é uma organização intergovernamental de treze países que coordena as políticas de petróleo dos seus membros.

De acordo com Mingst e Arreguín-Toft (2014) o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio são questões que jogam os Estados uns contra os outros pois resultam de externalidades negativas associadas ao crescimento econômico. Além disso, tratam sobre a poluição de espaços que não pertencem a nenhum país, o que torna as negociações extremamente complexas (Mingst; Arreguín-Toft, 2014).

Cabe destacar que a energia nuclear não é considerada uma fonte de energia renovável, mas é limpa em termos de emissões de GEE, pois as usinas nucleares não produzem emissões de CO₂ durante a geração de eletricidade. Isso a torna uma opção importante no combate as mudanças climáticas. Diante disso, durante a conferência COP-28, em Dubai, 22 países firmaram uma declaração reconhecendo o papel crucial da energia nuclear para atingir a neutralidade climática.

Segundo Guimarães, especialista em energia nuclear, “as usinas nucleares ocupam menos espaço à medida que produzem quantidades significativas de eletricidade, fornecendo energia estável e confiável, independente das condições climáticas.” Além disso, a densidade energética é muito alta quando comparada a fontes renováveis (Portal EnerVision, 2023).

Diante do exposto, percebe-se que a transição para energias renováveis ou limpas, como é o caso da nuclear, representam uma mudança significativa na geopolítica global e que será primordial a mudança da matriz energética dos Estados para o atingimento das metas de descarbonização. A Geopolítica das energias renováveis está transformando as relações de poder entre países, influenciando políticas internacionais e a economia global (Carmona, 2020).

2.3 ACORDOS INTERNACIONAIS

Os Estados se reúnem, desde 1992, em Conferências preparadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), com o objetivo de estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera em um nível que previna uma interferência perigosa no sistema climático. Para tanto, são requeridas mudanças expressivas no uso da energia, abrangendo a inovação tecnológica, melhorias de eficiência energética e o uso de fontes renováveis ou limpas (EPE, 2019).

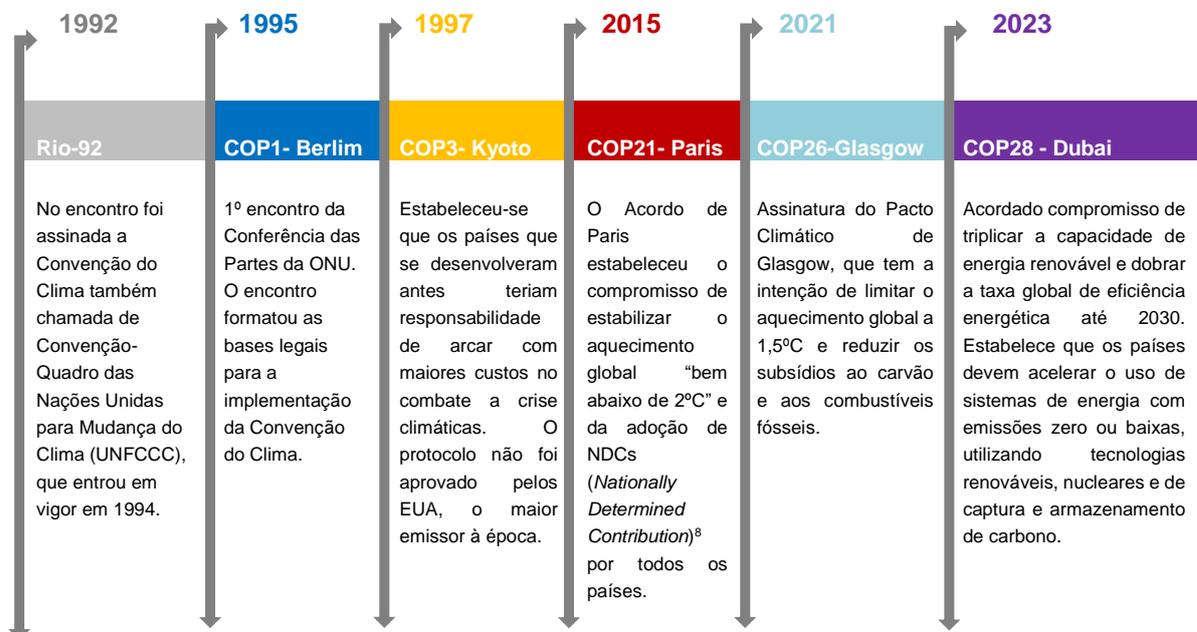
A ONU, em 1983, estabeleceu a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, com o objetivo de avaliar a eficácia das políticas ambientais para

enfrentamento dos problemas climáticos. Já em 1988, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e a Organização Meteorológica Mundial firmaram o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)⁷. O IPCC sintetiza os dados gerados por cientistas ao redor do mundo e é considerado uma fonte confiável de informação (EPE, 2019).

Os principais marcos da Conferência das Nações Unidas nos últimos anos estão sintetizados na figura 1 que demonstra que as discussões sobre as mudanças climáticas e os riscos para o planeta são temas da agenda internacional atual, com destaque para a questão energética, fazendo com que diversos países se comprometam com novas políticas que colaborem na procura por soluções. O Acordo de Paris é um exemplo de compromisso firmado por 196 países com o objetivo de diminuir as emissões de GEE (Luy, 2020).

O Brasil assinou esse Acordo e, durante a COP-28, no final de 2023, comprometeu-se a reduzir 48% das emissões até 2025 e 53% até 2030, além de atingir neutralidade climática até 2050. Alguns pesquisadores brasileiros participam do IPCC, estudando e acompanhando as mudanças climáticas globais (EPE, 2019).

Figura 1 – Principais Marcos da Conferência das Nações Unidas



Fonte: Elaborada pela autora (com base no Relatório Final do Programa de Transição Energética)

⁷ IPCC — sigla em inglês para *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

⁸ NDCs — *Nationally Determined Contributions* "são compromissos propostos individualmente por cada país, tendo em vista suas características específicas e possibilidades quanto às contribuições de redução de emissões" (Tavares, 2019, p.59).

Cabe destacar que a COP 30 será realizada no Brasil, na cidade de Belém, em novembro de 2025, quando serão apresentadas as novas NDCs de todos os países signatários do Acordo de Paris, para que se alinhem à meta de 1,5°C o aumento da temperatura do planeta. Segundo o *GlobalStocktake*⁹, como o alinhamento ainda não foi obtido, as Conferências de 2029 e 2030 deverão assegurar NDCs mais ambiciosas.

2.4 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A transição energética surge como parte fundamental da estratégia para redução das emissões de GEE, promovendo o desenvolvimento sustentável e construindo um futuro mais resiliente e equitativo para o planeta. Apesar de transições energéticas já terem ocorrido no passado, a atual não é motivada pelo aparecimento de uma nova tecnologia, mas prioritariamente para o equilíbrio e sobrevivência na Terra (Luy, 2020).

Afirma Sousa que “a transição energética pode ser definida como o caminho para transformação do setor energético atual, com forte dependência de combustíveis fósseis, em um setor composto de fontes renováveis, com baixa emissão de CO₂” (Sousa, 2019, p. 6). Para que a transição ocorra, os Estados deverão reduzir as fontes fósseis de suas matrizes energéticas, além de implementar ações para o incremento da eficiência energética, o armazenamento de energia e a utilização de fontes que não emitam GEE na sua operação.

Segundo Rangel (2021), o processo de transição energética, apesar da urgência por questões ambientais e climáticas, não será rápido, demandando tempo para ser efetivado. Tal transição mudará as matrizes energéticas, bem como a geopolítica mundial (Rangel, 2021).

A demora no processo de transição está associada a resistência aos novos sistemas, dificuldade de adaptação tecnológica e falta de políticas públicas. Caberá aos países em desenvolvimento conciliar o crescimento econômico com as novas demandas energéticas, a fim de cumprirem as metas do Acordo de Paris. A atual transição energética tende a ser, também, um processo gradual, em virtude de os

⁹ GlobalStocktake é um processo oficial estabelecido pelo Acordo de Paris que visa medir como os esforços coletivos dos países estão contribuindo para alcançar os objetivos do Acordo (Acordo de Paris, 2015).

Estados terem sido apresentados a várias fontes de energia que deverão ser exploradas nas próximas décadas e aquele que possuir a melhor tecnologia para explorá-las se destacará na geopolítica mundial (Mesquita, 2022).

O Brasil ocupa uma posição de destaque devido as características da sua matriz energética e de sua capacidade em administrar recursos energéticos. Porém, cabe destacar que ainda é um país em desenvolvimento, com a perspectiva de aumento no consumo de energia per capita. Dessa forma, deverá harmonizar seus potenciais com políticas e práticas para o incentivo e a admissão de novas fontes energéticas.

Nesse sentido, destaca-se a importância da avaliação sobre o uso da energia nuclear no processo de transição energética, considerando aspectos, econômicos, de segurança e sociais. É uma opção que não pode ser descartada por oferecer segurança energética aliada à sustentabilidade e será detalhada na seção 3.5.

O Plano Nacional de Energia (PNE)¹⁰ 2050, que define a transição energética da matriz elétrica brasileira, reforça que não há, no Brasil, uma política específica para essa transição e sim uma série de políticas que a afetam e a favorecem. Sendo assim, o momento é oportuno para que o setor nuclear se sobressaia no país, a fim de que todas as fontes tenham um papel importante a desempenhar, considerando o planejamento e a segurança energética (Brasil, 2020).

3 MATRIZ ENERGÉTICA E MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz energética é a composição das diferentes fontes de energia, englobando tanto as renováveis quanto as não renováveis, utilizadas para suprir as necessidades de um Estado, tais como: gerar energia elétrica, movimentar indústrias e abastecer automóveis. Já a matriz elétrica se refere especificamente às fontes de energia utilizadas para a geração de eletricidade. Enquanto a matriz energética inclui todos os tipos de energia usados para qualquer propósito, a matriz elétrica foca exclusivamente nas fontes de energia que alimentam o sistema elétrico (Silva Neto, 2022).

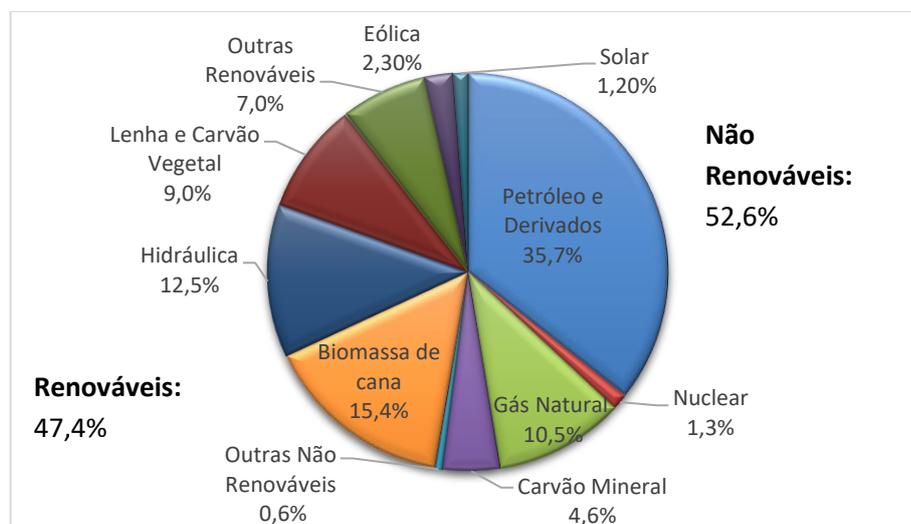
¹⁰ O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) foi apresentado a sociedade brasileira em 2020, pelo Ministério das Minas e Energia. Ele possui em conjunto de estudos e diretrizes para o desenho de uma estratégia de longo prazo para o setor energético brasileiro e foi uma atualização do PNE 2030, datado de 2007. (Brasil, 2020)

O Brasil possui uma matriz energética diversificada e, devido à vasta extensão de terra e vantajosas condições edafoclimáticas¹¹, tem facilidade no aproveitamento de fontes renováveis. Porém, o consumo per capita do país ainda é baixo quando comparado aos níveis de países desenvolvidos. Dessa forma, o desafio a ser enfrentado no setor energético brasileiro é o de se adequar o atendimento à demanda, de acordo com o avanço socioeconômico, garantindo que os indicadores de emissão de GEE se mantenham nos níveis do compromisso firmado pelo Brasil no Acordo de Paris (EPE, 2019).

De acordo com o PNE 2050, o Brasil precisará praticamente dobrar sua capacidade instalada para atender ao crescimento da demanda até 2050. As hidrelétricas continuarão a predominar, mas, nas próximas décadas, deverão atingir o limite do seu potencial. A combinação de energia nuclear e renovável no mix energético brasileiro pode ser uma estratégia promissora para reduzir as emissões de carbono. Utilizada em conjunto com a hidroeletricidade oferecerá uma fonte confiável e de base de eletricidade, enquanto as energias renováveis, como solar, eólica e biomassa, proporcionarão recursos complementares e sustentáveis (Brasil, 2020).

A matriz energética brasileira, conforme apresentada na figura 2, está dividida entre 47,4% provenientes de fontes renováveis e 52,6% provenientes de fontes não renováveis. Com relação às fontes renováveis o maior percentual é o da biomassa de cana (15,4%) seguido da energia hidráulica (12,5%). Já nas fontes não renováveis o maior percentual é o de petróleo e derivados (35,7%) seguido do gás natural (10,5%).

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira

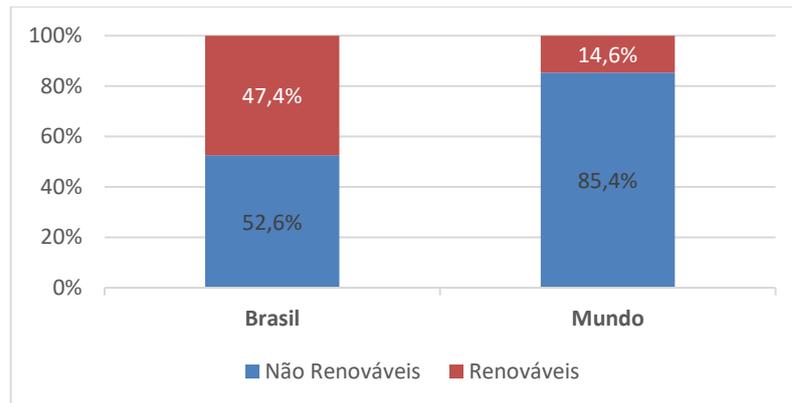


Fonte: Elaborada pela autora com base no Balanço Energético Nacional (BEN) 2023

¹¹ Edafoclimáticas são as características do meio ambiente, como: clima, vento, radiação etc.

Ao se comparar o consumo de energia oriunda de fontes não renováveis e renováveis, no Brasil e no mundo, conforme figura 3, verifica-se que nosso país emite menos GEE que vários Estados do mundo, evidenciando-se como uma potência energética que poderá ser instrumento na geopolítica mundial (BEN, 2023).

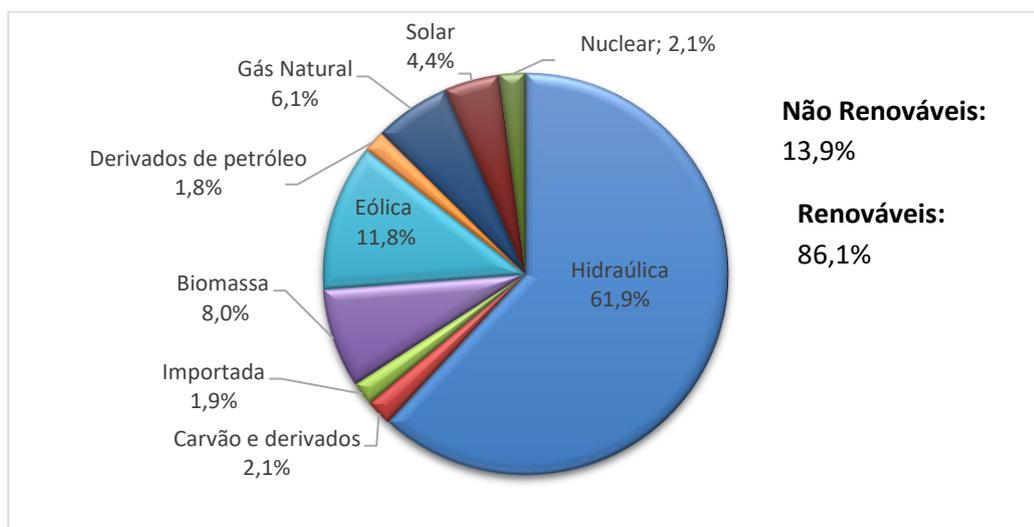
Figura 3 – Comparação de energia oriunda de fontes não renováveis e renováveis no Brasil e no mundo



Fonte: Elaborada pela autora com base no BEN 2023 e no 73rd *Statistical Review of World Energy*

Já em relação a matriz elétrica brasileira, conforme apresentada na figura 4, tem 61,9% de geração oriunda de energia hidráulica, 11,8% oriunda da energia eólica, 8% proveniente de biomassa e 4,4% da energia solar, totalizando a participação de energia renovável em 86,1% da matriz.

Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Elaborada pela autora com base no BEN 2023

Em que pese o Brasil possuir uma matriz elétrica limpa, com apenas 13,9% não renovável, a escassez de chuvas já ocasionou dificuldades na geração de energia hidráulica, por ser dependente dos ciclos hídricos, que são diretamente influenciados pelo clima. Mudanças na precipitação e secas prolongadas podem afetar a disponibilidade de água para geração de energia.

Por outro lado, a energia eólica depende dos padrões de vento, também influenciados pelas condições climáticas. Alterações nos regimes de vento, tais como: velocidade, direção ou consistência podem afetar a eficiência das turbinas eólicas. Enquanto alguns locais experimentam ventos fortes, outros podem sofrer com a redução deles, impactando a produção de energia.

Apesar da energia solar ser menos sensível às mudanças climáticas quando comparada com a eólica e hidráulica, ela depende da quantidade de radiação solar que atinge a Terra, causando alterações nos padrões de insolação, com regiões experimentando mais nuvens ou variações na intensidade da luz solar.

Já a energia nuclear, do ponto de vista de volume, tem pequena representação na matriz elétrica brasileira (2,1%). Porém, as usinas de Angra 1 e 2 tem papel fundamental no Sistema Interligado Nacional (SIN), com geração de 2.000MW¹² e com a vantagem de serem próximas ao centro de carga-Sudeste, proporcionando constante potência à cadeia energética do país (EPE, 2019). Além disso, a participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira, ao longo de algumas décadas, sofreu oscilações, de acordo com as condições climáticas e políticas governamentais de incentivo, conforme será apresentado nas próximas seções.

3.1 ENERGIA HIDRELÉTRICA

Na década de 1930, o estado brasileiro percebeu a importância estratégica da energia hidráulica para o desenvolvimento econômico e social do país. Com isso, uma série de políticas e ações foram implementadas, com o objetivo de expandir e nacionalizar o setor elétrico. Em 1934, promulgou-se o Código de Águas que estabeleceu diretrizes para o uso dos recursos hídricos e a concessão de exploração para a geração de energia elétrica (Tavares, 2019).

¹² Megawatt é uma unidade de medida de potência elétrica que equivale a 1 milhão de watts.

Nas duas décadas subsequentes, o país investiu pesadamente na construção de grandes usinas hidrelétricas para atender à crescente demanda por eletricidade. Um exemplo foi a Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso, no rio São Francisco, inaugurada em 1955, que foi fundamental para o desenvolvimento do Nordeste brasileiro.

Os anos de 1960 a 1990 se consolidaram na construção de hidrelétricas que passaram a sustentar o sistema elétrico brasileiro. Em 1962, ocorreu a fundação das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. — Eletrobras que representou um passo fundamental na coordenação dos esforços para a expansão da geração e da transmissão de energia elétrica no país. O auge da história da energia hidrelétrica brasileira foi a conclusão da Usina Hidrelétrica de Itaipu¹³, em 1974 (Tavares, 2019).

Já em 2001, ocorreu uma crise do setor hidrelétrico, também conhecida como apagão, que foi ocasionada por uma combinação de seca severa, falta de investimentos em infraestrutura elétrica e uma forte dependência desse tipo de energia, que representava, à época, 90% da matriz elétrica brasileira. Essa crise impulsionou investimentos em outras fontes de energia, destacando também a necessidade de diversificação da matriz elétrica (Tavares, 2019).

Outras crises ocorreram nos biênios 2014-2015 e 2020-2022, apresentando níveis críticos dos reservatórios das principais bacias hidrelétricas do país, resultando na criação da “bandeira tarifária” que aumentou as tarifas de energia para cobrir os custos adicionais da importação de eletricidade de países vizinhos (Tavares, 2019). As crises vivenciadas, aliadas ao impacto ambiental e sustentabilidade da energia hidrelétrica, reforçaram a necessidade de inovação e diversificação da matriz elétrica.

3.2 ENERGIA EÓLICA

Os estudos iniciais sobre a energia eólica, no Brasil, surgiram na década de 1990, com instituições como o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) que mapearam o potencial eólico do

¹³ Iniciada a construção em 1974, em parceria do Brasil com Paraguai. É localizada no rio Paraná e foi considerada, durante anos, a maior hidrelétrica do mundo em capacidade instalada, com 14.000MW (Tavares, 2019).

país. O primeiro parque eólico de grande porte foi inaugurado em 1999, em Minas Gerais, com capacidade de 1MW (EPE, 2019).

Porém, apenas em 2002, quando foi lançado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA¹⁴) é que a energia eólica começou a se desenvolver no SIN. O Programa visava promover a diversificação da matriz elétrica nacional e incentivar a geração de energia a partir de fontes renováveis, incluindo a eólica (Mesquita, 2022).

Além do PROINFA, o Governo começou a realizar leilões específicos para a contratação de energia eólica. Esses leilões atraíram investimentos nacionais e internacionais para o setor. De 2005 a 2010, a capacidade instalada de energia passou de 29MW para 930MW, impulsionada pela competitividade dos preços e pela crescente atratividade dos leilões. Em 2019, a capacidade instalada passou de 15GW¹⁵, tornando o Brasil o maior mercado de energia eólica da América Latina. Com o compromisso assumido no Acordo de Paris, estima-se que o país alcance mais de 30GW até 2025 (Mesquita, 2022).

O grande desafio que vem sendo enfrentado na energia eólica é a sua integração em redes elétricas, especialmente em sistemas que não foram projetados para lidar com a intermitência e a variabilidade dessa energia. Isso significa que a produção de eletricidade pode ser imprevisível, afetando a estabilidade do fornecimento de energia.

3.3 BIOMASSA

A energia de biomassa é produzida a partir de materiais orgânicos utilizados como fonte de combustível para a geração de eletricidade. É uma solução importante, especialmente em países com grandes recursos agrícolas e florestais como o Brasil. São utilizados diversos materiais, tais como: resíduos agrícolas — bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho; resíduos florestais — madeira, serragem; resíduos industriais — papel e celulose; resíduos urbanos — lixo orgânico; cultivos energéticos — plantas cultivadas especialmente para fins de energia — miscanthus e sorgo (Mesquita, 2022).

¹⁴ PROINFA foi instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, com o objetivo de aumentar no SIN a participação da energia elétrica limpa.

¹⁵ Gigawatt é uma unidade de medida de potência elétrica que equivale a 1 bilhão de watts.

Para conversão da energia de biomassa em calor, eletricidade ou combustível líquido podem ser utilizados vários processos, como combustão direta, gaseificação, pirólise ou fermentação. Cada processo tem suas próprias tecnologias e aplicações específicas. Os mais utilizados para geração de eletricidade são a combustão direta e a gaseificação.

Um dos maiores desafios da biomassa é a sazonalidade, principalmente dos recursos oriundos do setor agrícola, gerando uma imprecisão na previsão de geração de energia. Além disso, a biomassa tem uma densidade energética relativamente baixa quando comparada com outras fontes renováveis.

Para que o uso energético de biomassa seja viável, outro desafio que deve ser vencido é o seu correto armazenamento. Um fator determinante para seu uso é o controle da umidade, bem como a quantidade e a qualidade da biomassa armazenada por longos períodos ou de maneira incorreta, o que pode levar a grandes perdas ou diminuição da confiabilidade da sua utilização (Tavares, 2019).

Mesmo diante dos desafios impostos, o PNE 2050 vislumbra que a energia proveniente de biomassa possui elevada margem para aumento na sua produção, especialmente com a utilização da palha da cana de açúcar, prospectando que o Brasil terá condições de aumentar a participação de biocombustíveis no mercado doméstico e internacional (Brasil, 2020).

3.4 ENERGIA SOLAR

A energia solar é uma fonte de energia que aproveita a radiação do sol para gerar eletricidade. A tecnologia mais utilizada para essa conversão é através de células fotovoltaicas. Ela vem se destacando na matriz elétrica brasileira de duas formas: geração distribuída e geração centralizada. Enquanto uma é incentivada por leilões e ações do Ministério das Minas e Energia, a outra é movida pelos consumidores comuns que tentam diminuir a conta de energia elétrica (Mesquita, 2022).

A fonte solar fotovoltaica é considerada uma alternativa competitiva no fornecimento de energia, em virtude de o país receber elevados índices de incidência da radiação solar, praticamente em todo o seu território, podendo contribuir para a redução de emissões de GEE. Ela também é menos sensível às mudanças climáticas

quando comparada com a eólica e hidráulica. Porém, é dependente da quantidade de radiação solar que atinge a Terra (EPE, 2019).

A forma de geração distribuída é aquela em que o consumidor gera e consome sua própria energia, dentro das regras impostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e teve um aumento considerável a partir de 2020, segundo dados do BEN 2021, tendo em vista os preços decrescentes nos últimos anos e o vasto potencial técnico disponível (Brasil, 2020).

Segundo Mesquita (2022), para o melhor aproveitamento da energia solar no país, alguns desafios precisarão ser superados, tais como a dificuldade de integração ao SIN, o descarte das células fotovoltaicas, que apresentam vida útil de 25 anos e a variabilidade diária e sazonal da energia, que tende à intermitência no fornecimento contínuo de eletricidade (Mesquita, 2022).

Conforme exposto, as energias renováveis são influenciadas por variações climáticas, comprometendo a confiabilidade e a disponibilidade, além de sua sustentabilidade efetiva. Para uma transição energética de baixo carbono, que ofereça segurança energética, é fundamental desenvolver uma infraestrutura resiliente e diversificada, capaz de se adaptar às mudanças climáticas e garantir um fornecimento contínuo e estável de energia. Nesse contexto, o papel da energia nuclear merece destaque.

3.5 ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear é oriunda de reações que ocorrem no núcleo de certos átomos radioativos¹⁶. Esta reação produz calor que é então convertido em eletricidade. Os dois processos principais para produção de energia nuclear são: fissão nuclear e fusão nuclear. Atualmente, todas as usinas nucleares comerciais operam por fissão nuclear.

A fissão nuclear ocorre quando o núcleo de um átomo pesado, como o urânio-235 (U235), é bombardeado por um nêutron, causando sua divisão em dois núcleos menores, liberando grande quantidade de energia. A energia liberada na fissão aquece um líquido de resfriamento (água pressurizada ou gás), que, por sua vez, gera

¹⁶ Elementos radioativos são aqueles que apresentam átomos com a capacidade de eliminar espontaneamente radiação (alfa, beta ou gama) a partir de seus núcleos (Galetti e Lima, 2010).

vapor. O vapor movimentava turbinas acopladas a geradores elétricos, produzindo eletricidade (Galetti e Lima, 2010).

A partir dos anos 1950, a energia nuclear desenvolveu-se no mundo, alcançando, em três décadas, o número de 400 reatores em operação e uma capacidade operacional superior a 300GW, impulsionada por políticas de segurança energética e pela crise do petróleo. Porém, no período de 1990 a 2000, ocorreu uma estagnação no número de reatores em operação, em grande parte associada aos efeitos decorrentes do acidente de Chernobyl, na extinta União Soviética, em 1986, e da competitividade do gás natural (Brasil, 2020).

Em 2011, o acidente de Fukushima, no Japão, e o desligamento temporário de todas as usinas nucleares japonesas fez com que o número de reatores em operação diminuísse, tornando-se crescente novamente em 2016. Os novos empreendimentos termonucleares, dos últimos dez anos, têm se desenvolvido predominantemente na Ásia, com destaque para a China. Já o ano de 2023, na COP 28, foi crucial para a energia nuclear, pois houve um consenso global sobre o papel fundamental que ela exerce na transição energética. Atualmente, estão em operação 439 reatores nucleares e outros 64 estão em construção (WNA, 2024).

Durante a COP 28, 22 países assinaram uma declaração que inclui um compromisso específico com pequenos reatores modulares e outros reatores avançados, comprometendo-se a apoiarem o seu desenvolvimento e construção. Neste sentido, o Parlamento Europeu aprovou o apoio a implantação dos SMR em toda a Europa. A Comissão Europeia declarou o seu compromisso em manter a “liderança tecnológica e industrial europeia no domínio nuclear” e ofereceu o seu apoio a uma recém-formada aliança industrial europeia centrada em SMR (Full Energy, 2024).

De acordo com o PNE 2050,

A tecnologia nuclear pode ter papel destacado nos serviços de abatimento de emissões de gases de efeito estufa, bem como ampliar a resiliência e a robustez dos sistemas elétricos na transição energética, dadas as perspectivas progressivamente significativas de participação de fontes renováveis não-despacháveis ou com alta variabilidade de fornecimento (Brasil, 2020, p. 128).

Cabe destacar que 10% da produção global de energia elétrica é nuclear, sendo a segunda maior fonte de energia de baixo carbono mundial, perdendo apenas para hidroeletricidade. Ademais, existe uma variedade de produtos e serviços de uso comercial mais amplo, tais como: irradiação de alimentos, radioisótopos, controle de

pragas, geração de hidrogênio etc. que não serão objetos de estudo neste trabalho (Brasil, 2020).

Em relação ao Brasil, as usinas nucleares de Angra 1 e 2 fazem parte do Complexo Nuclear de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, representando 2,1% de participação na matriz elétrica brasileira. A primeira entrou em operação em 1985 e a segunda em 2001. Ambas contribuem para a estabilidade do fornecimento de energia. O projeto de Angra 3 prevê uma capacidade adicional de cerca de 1.405MW, o que representaria 3,5% de contribuição nuclear na matriz (Brasil, 2020).

A principal vantagem da energia nuclear é a sua baixa emissão de GEE durante a operação. As usinas nucleares produzem eletricidade sem a queima de combustíveis fósseis, o que reduz significativamente a quantidade de CO₂ liberada na atmosfera. Além disso, possui alta densidade de energia, que significa que uma pequena quantidade de combustível nuclear pode gerar uma grande quantidade de eletricidade, tornando a usina extremamente eficiente. Ademais, detém ainda as vantagens de poder ser instalada próxima aos centros consumidores e ter a produção de energia regulada de acordo com a demanda (Silva Neto, 2022).

Segundo Silva Neto (2022), a energia nuclear tem alguns desafios, tais como: custo de investimento associado à construção de novas usinas, período de planejamento e construção e geração de resíduos. Em relação aos custos, há um esforço contínuo para que instituições financeiras multilaterais sejam mais receptivas aos projetos nucleares. A criação do Banco Internacional de Infraestrutura Nuclear (IBNI) visa preencher a lacuna no financiamento nuclear, podendo acelerar o desenvolvimento de tecnologias nucleares avançadas (Silva Neto, 2022).

Nesse sentido, os reatores avançados têm contribuído para a redução de custos, maior aceitação pública e simplificação do licenciamento. Esses fatores estão ajudando os países a considerarem os reatores nucleares como uma opção para alcançar suas metas climáticas. Algumas características presentes nos reatores avançados são sua maior eficiência térmica, uso otimizado dos recursos naturais, minimização de resíduos, construção modular, maior disponibilidade, possibilidade ainda mais reduzida de acidentes de fusão do núcleo e capacidade de atender tanto à produção de eletricidade quanto à aplicação não elétrica da energia nuclear.

Outro desafio que precisa ser vencido é a conscientização da população a respeito das questões de segurança da tecnologia nuclear, uma vez que a opinião pública pode ter influência sobre a implementação de políticas que visem a expansão

da energia nuclear e uma maior participação das empresas privadas nacionais nos projetos em desenvolvimento. Afirma Guimarães que: “as práticas de segurança na indústria nuclear têm evoluído significativamente. As modernas usinas nucleares são projetadas com múltiplos sistemas de segurança e barreiras para prevenir acidentes” (Portal EnerVision, 2023).

Em relação à conscientização da população, a empresa Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A — AMAZUL¹⁷ tem divulgado vídeos explicativos sobre as diversas aplicações da tecnologia nuclear, disponibilizando no seu canal do YouTube. Ademais, criou uma animação da Turma da Urânia, “Urânia e a Energia Limpa”, que faz parte de uma série educativa, que visa a sensibilizar a sociedade sobre as contribuições da energia nuclear para um futuro sustentável. A animação tem sido divulgada, também, em workshops, eventos e Universidades.

Com o reconhecimento da importância da energia nuclear para garantir a segurança energética e reduzir as emissões de GEE, dentro do contexto de transição energética, a tendência é que a procura por urânio aumente, a fim de acompanhar o crescimento da capacidade nuclear global. Além disso, alguns países estudam a possibilidade de substituição das termelétricas a carvão por SMR. A demanda por urânio enriquecido pode dar ao Brasil uma oportunidade de destaque na geopolítica, uma vez que o país domina o ciclo do combustível nuclear.

3.5.1 Combustível nuclear

O urânio é um elemento químico encontrado na natureza (rochas, solos e água) e é o combustível mais utilizado nas usinas nucleares. Antes de ser usado, precisa passar por processos de enriquecimento, a fim de aumentar a sua eficiência. O Brasil é um dos cinco países no mundo que tem condições de extrair, beneficiar e transformar em urânio enriquecido (Silva Neto, 2022).

O país é, também, um dos maiores detentores de reservas de urânio do mundo, ocupando a sexta posição em 2022, de acordo com o "Livro Vermelho", uma referência mundial reconhecida em matéria de urânio, preparada conjuntamente pela Agência da Energia Nuclear (AEN) e pela Agência Internacional da Energia Atômica

¹⁷ A AMAZUL é uma empresa pública, organizada sob a forma de sociedade anônima, com personalidade jurídica de direito privado e patrimônio próprio, com o capital pertencente integralmente a União, vinculada ao Ministério da Defesa, por meio do Comando da Marinha.

(AIEA). Porém, apenas 1/3 do território brasileiro foi prospectado. Estima-se que podemos ser a segunda maior reserva desse minério no mundo, o que abriria uma janela de oportunidades para o país (Brasil, 2020).

Nesse contexto, o Brasil tem buscado expandir sua capacidade de enriquecimento e conversão de urânio, reduzindo sua dependência de fontes externas. As oportunidades econômicas apresentadas pela indústria nuclear estão gerando debates no Congresso sobre a possibilidade de exportação de urânio beneficiado. Defende o Deputado Federal Julio Lopes, presidente da Frente Parlamentar da Tecnologia e Atividades Nucleares, que “nosso país tem capacidade de ser um dos grandes fornecedores globais de urânio enriquecido porque somos uma das três únicas nações no mundo que são ricas nessa matéria-prima.” (Full Energy, 2024).

Para ser usado como combustível de reatores nucleares na geração de energia elétrica, o urânio natural passa por uma série de estágios e processos. O primeiro estágio consiste na mineração, onde a rocha é triturada e submetida a um processo para separação do urânio de outros materiais, resultando no *yellowcake*¹⁸. O concentrado é então convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF₆), para ser enriquecido (INB, 2024).

Após o enriquecimento, ocorre a etapa da reconversão, quando o UF₆ é reconvertido em pó de dióxido de urânio, para fabricação de pastilhas de combustível nuclear. Essas pastilhas são colocadas dentro de varetas que compõem, finalmente, os elementos combustíveis. Por meio da fissão dos átomos de urânio que estão contidos no combustível nuclear, dentro do núcleo do reator, que é gerado calor, que produz o vapor que faz movimentar as turbinas ligadas a geradores de energia elétrica (Silva Neto, 2022).

A etapa de conversão, hoje, não é realizada no Brasil. Porém, a Usina de Hexafluoreto de Urânio – USEXA, visa implementar uma planta de conversão, em escala industrial, no Centro Industrial Nuclear de Aramar (CINA), para atender as demandas dos programas estratégicos da Marinha do Brasil (MB). Já para o atendimento das necessidades das Usinas de Angra 1 e 2, em escala comercial, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) possui um projeto para implantação de uma Fábrica de Conversão, em Resende, no Rio de Janeiro (INB, 2024).

¹⁸ *Yellowcake* vem da cor amarela brilhante do pó produzido nas primeiras operações de mineração do urânio.

O processo de enriquecimento, considerado o de maior complexidade, está implementado no CINA, desde 1988, especificamente no Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI). O domínio desse processo foi resultado de muitas pesquisas dirigidas pela MB em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o que demonstra a importância de parcerias estratégicas para o desenvolvimento de tecnologias e capacitação nacional.

A MB teve papel fundamental no domínio da tecnologia nuclear no país com o envolvimento, na década de 1950, do Almirante Álvaro Alberto da Motta e Silva, pioneiro no Brasil no estudo e nas pesquisas sobre energia nuclear. Ele realizou feitos significativos, atuando para a criação do Programa Nuclear Brasileiro, que engloba atividades de pesquisa, desenvolvimento, produção de energia elétrica e aplicação da tecnologia nuclear em diversos setores. Já, em 1979, foi estabelecido o Programa Nuclear da Marinha que é de grande importância estratégica para o Brasil (Silva Neto, 2022).

Ao longo desses anos, o país adquiriu a expertise necessária para operar e manter tecnologias nucleares, com a capacitação de pessoal altamente qualificado em engenharia nuclear, física e outras áreas técnicas. Com o objetivo de absorver, promover, desenvolver, transferir e manter atividades sensíveis relativas aos Programas da área nuclear, foi constituída, em 2013, a AMAZUL.

Uma das vantagens da Empresa é a sua flexibilidade, estando capacitada para atuar em diversas áreas, tais como: gestão do conhecimento e pessoas, projetos de engenharia nuclear e de desenvolvimento de tecnologias nucleares, inclusive nos projetos dos Pequenos Reatores Modulares.

3.5.2 Pequenos Reatores Modulares

São reatores nucleares de menor escala projetados para gerar energia elétrica ou calor em uma capacidade mais reduzida em comparação com os reatores nucleares tradicionais. Os SMR são capazes de produzir até 300MW de eletricidade e seus componentes podem ser transportados para os locais de implantação como módulos pré-fabricados. A implantação dos módulos adicionais pode ocorrer ao longo do tempo, à medida do crescimento da demanda (Brasil, 2020).

Historicamente, o desenvolvimento dos SMR começou com projetos de reatores integrados. A vantagem significativa desse tipo de projeto é que a maioria ou

todos os componentes do sistema de resfriamento do reator estão encapsulados. Dessa forma, os projetos integrados eliminam as tubulações entre os componentes deste sistema, excluindo a possibilidade de ocorrência de um acidente de perda de refrigerante (LOCA¹⁹ na sigla em inglês) de grande ruptura, aumentando a segurança desses projetos.

A modularização dos SMR admite um cronograma de construção mais rápido e custos reduzidos. Além disso, a abordagem modular permite a padronização e aplicações flexíveis: uma planta pequena pode ser construída usando apenas um SMR simples, enquanto uma planta grande pode ser construída com múltiplas unidades. Nesse sentido, os SMR podem ser utilizados em locais com redes elétricas bem desenvolvidas ou em locais menos acessíveis, como pequenas ilhas, áreas com acesso limitado à refrigeração por água, áreas com limitações técnicas (redes elétricas pequenas) e áreas com capital disponível limitado (IAEA, 2021).

A nova geração de reatores representa um significativo avanço na tecnologia nuclear prometendo maior flexibilidade, maior segurança, custos mais baixos, melhor viabilidade de financiamento, melhor compatibilidade com redes elétricas nacionais de porte limitado e riscos de projeto reduzidos. Uma outra grande vantagem dos reatores modulares é permitirem um substancial processo de descentralização da produção de energia, adequada para regiões remotas ou para complementar redes elétricas existentes (IAEA, 2021).

Esses pequenos reatores têm potencial para serem utilizados não apenas para a geração de energia elétrica, mas também para produção de calor para processos industriais, dessalinização de água e produção de hidrogênio, por exemplo. Existem vários projetos de SMR em desenvolvimento, com a China e a Rússia já operando alguns desses reatores. A grande maioria dos projetos está em busca de demonstração de viabilidade técnica e comercial e considera o uso do combustível HALEU, urânio enriquecido abaixo de 19,75%, sendo futuramente uma grande oportunidade para o Brasil a exportação desse combustível.

Os reatores que utilizam HALEU podem ser projetados com características de segurança aprimoradas, como sistemas de segurança passivos, onde não há necessidade de intervenção humana para desligamento do sistema, em caso de emergência. Além disso, eles podem operar por períodos de três a sete anos sem

¹⁹ LOCA — *Loss of Coolant Accident*.

necessidade de reabastecimento, reduzindo os custos operacionais e a logística complexa.

No cenário nacional, o Brasil tem participado de diversos congressos, workshops e seminários promovidos por instituições nacionais e internacionais como a Associação Brasileira para Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN), Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN) e AIEA, com apoio de outras instituições e empresas, a fim de discutir o desenvolvimento dos SMR e futura implantação no território nacional, como consta no PNE 2050 (Brasil, 2020).

Nesse contexto, em 2023, o Laboratório Nacional de Idaho (INL) dos Estados Unidos publicou um documento conjunto com a EPE sobre as oportunidades e desafios de implementação de SMR no Brasil (INL, 2023). O relatório fornece informações econômicas e tecnológicas para auxiliar o país na elaboração de políticas de longo prazo em planejamento energético, exemplificando o interesse do governo brasileiro neste tipo de tecnologia, impulsionando uma futura instalação de um SMR no território brasileiro.

O Brasil tem, também, potencial para se tornar um exportador de conhecimento e tecnologia nuclear, devido a vasta experiência adquirida nas últimas décadas. A parceria com países que estão se estruturando na área de SMR é vista como uma oportunidade promissora, podendo oferecer soluções avançadas para outros países.

Nesse sentido, a AMAZUL e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) promoveram um curso sobre “Introdução à Tecnologia de Pequenos Reatores Nucleares (SMR)”, de 1º de julho a 2 de agosto, explorando conceitos teóricos fundamentais e de funcionamento de um SMR, por meio da operação do simulador do Pequeno Reator Modular Integrado da IAEA, localizado no CINA. A capacitação tecnológica e a inovação são fundamentais para um futuro próspero no setor nuclear.

Diante do exposto, com a expansão da energia nuclear na geração de eletricidade, principalmente com a tecnologia dos SMR, que são mais seguros e menos custosos, a tendência é que os impactos ambientais sejam minimizados pela diminuição das emissões de CO₂. A energia nuclear pode ajudar na diversificação da matriz energética mundial, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, o que tenderá a mudanças na geopolítica mundial. Com isso, o Brasil terá a oportunidade de ocupar um lugar de destaque, podendo se tornar um exportador de urânio e do conhecimento da tecnologia nuclear.

4 CONCLUSÃO

A questão da transição energética ganhou relevância internacional, nas Conferências das Partes das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, devido à preocupação com o desequilíbrio das temperaturas mundiais. Os Estados discutiram estratégias para redução das emissões de gases de efeito estufa na geração de energia, com a substituição de combustíveis fósseis, de suas matrizes energéticas, por recursos renováveis ou com baixa emissão de carbono.

Isso posto, os países têm investido em pesquisas e inovação, a fim de fomentar o descobrimento de novas formas de gerar e armazenar energia limpa, bem como aperfeiçoar as tecnologias já existentes, com o objetivo de serem mais eficientes e economicamente viáveis. Assim, a geopolítica das energias tenderá a ser influenciada pela descoberta e exploração de novas fontes de energia, o que poderá modificar o equilíbrio de poder nas relações internacionais.

Uma das estratégias discutidas para a descarbonização diz respeito à utilização da energia nuclear, que mesmo não sendo uma fonte renovável, é considerada uma energia limpa, pois, as usinas nucleares não produzem emissões de dióxido de carbono durante a geração de eletricidade. Ela destaca-se, também, por oferecer segurança energética e ser capaz de se adaptar às mudanças climáticas, garantindo um fornecimento contínuo e estável de energia.

Apesar das energias renováveis apresentarem algumas vantagens em relação a energia nuclear, quanto aos custos e complexidade, elas são influenciadas por variações climáticas, o que pode comprometer a confiabilidade e a disponibilidade na geração de energia. No caso do Brasil, que possui uma matriz elétrica predominantemente hidrelétrica, já enfrentou dificuldades relacionadas a falta de chuvas, com reflexos para o consumidor, devido ao aumento nas tarifas de energia elétrica.

O Brasil já ocupa uma posição de destaque por possuir uma matriz elétrica em grande parte renovável. Porém, precisa aumentar a sua capacidade instalada para atender ao crescimento da demanda até 2050. Sendo assim, a combinação de energia nuclear com renovável no mix energético brasileiro pode ser uma estratégia para uma matriz que proporcione confiança e segurança energética.

No cenário mundial, durante a COP 28, alguns países se comprometeram a triplicar a sua capacidade nuclear até 2050, a fim de atingirem a meta de descarbonização estabelecida no Acordo de Paris. Outros estudam, também, a possibilidade de substituição das termelétricas a carvão por pequenos reatores modulares, que tendem a ser os modelos utilizados nas usinas nucleares nas próximas décadas.

Os pequenos reatores modulares podem ser aliados no combate as emissões de GEE e na redução da temperatura mundial por possuírem algumas vantagens em relação aos reatores tradicionais, com destaque para a modularidade, menor porte e sistemas de segurança passivos. Ademais, a modularização dos SMR permite um cronograma de construção mais rápido e custos reduzidos, facilitando a instalação em locais menos acessíveis.

Embora existam algumas desvantagens na utilização da energia nuclear, ela desponta, também, como uma opção viável para os países alcançarem suas metas climáticas devido a possibilidade da usina nuclear poder ser instalada próxima aos centros consumidores, ter a produção regulada de acordo com a demanda, além de possuir uma alta densidade energética.

Portanto, com a tendência de expansão da energia nuclear é provável que aumente a demanda por urânio, combustível mais utilizado nas usinas nucleares. Por ser o Brasil um dos poucos países em condições de extrair, beneficiar e transformar o urânio em combustível nuclear, além de estar entre os maiores detentores de reservas desse minério, abre-se a oportunidade de o país exportar urânio enriquecido.

A exportação do urânio pode levar o Brasil a ocupar uma posição de destaque na geopolítica dos Estados, uma vez que os recursos energéticos desempenham um papel fundamental, influenciando as relações e oferecendo vantagens econômicas e políticas significativas.

Para o desenvolvimento da energia nuclear no Brasil, um dos grandes desafios que precisa ser superado é a conscientização da população quanto às vantagens dessa tecnologia, uma vez que a opinião pública pode ter influência sobre a implementação de políticas que visem a sua expansão e uma maior participação das empresas privadas nacionais nos projetos em desenvolvimento.

Assim, conclui-se que foram identificadas oportunidades para o Estado brasileiro com a transição energética de baixo carbono, tais como a exportação do urânio enriquecido e o desenvolvimento da energia nuclear, baseado nos pequenos

reatores modulares. O país tem, ainda, potencial para se tornar um exportador de conhecimento e tecnologia nuclear, devido a expertise adquirida principalmente com o processo de enriquecimento do urânio. Com isso, confirmou-se a hipótese apontada na introdução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, R.A.F. **A Geopolítica das Energias Renováveis: o Brasil em meio ao cenário de transição energética.** Artigo publicado na Revista Monções, v. 11, nº 22. Mato Grosso do Sul, 2022.

Acordo de Paris 2015. Publicado em 12 de dezembro de 2015. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf

Balanço Energético Nacional 2023, **Relatório Síntese 2023, Ano base 2022.** Ministério das Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023> Acesso em: 10 de jul.2024.

BRASIL, Ministério das Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio Final do PNE 2050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoesdados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf)>. Acesso em: 26 de abr. 2024.

CARMONA, R. G. **Geopolítica & Energia.** Rio de Janeiro: Synergia, 2020.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Geopolítica da Energia.** 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-718/CadernoTransiçãoEnergetica - V0.2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-718/CadernoTransiçãoEnergetica_V0.2.pdf). Acesso em: 23 de mai. 2024.

GALETTI, Diogenes; LIMA, Celso L. **Energia nuclear com fissões e com fusões.** São Paulo: Editora UNESP, 2010.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **Benefits and challenges of small modular fast reactors.** Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL – INB. Nossas Atividades. [online]. [2024]. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

INL - Idaho National Laboratory. United States–Brazil Joint Study: **A Preliminary Assessment of Opportunities and Challenges for Small Modular Reactors in Brazil.** INL/RPT-22-67191, Revision 0, Idaho Falls, 2023.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica.** 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LOVINS, Amory B. **Um Plano Energético para 50 anos.** 2012. Disponível em: https://www.ted.com/talks/amory_lovins_a_40_year_plan_for_energy?language=pt-br. Acesso em: 15 de jun. 2024.

LUY, N.K. **Estado e setor elétrico brasileiro no contexto da transição energética de baixo carbono.** 2020. 132f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2020.

MESQUITA, J.C. **Estudo sobre a transição energética na matriz elétrica brasileira.** 2022. 65f. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MEZA, C.G. **Transição energética global e desenvolvimento sustentável: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo.** 2018. 200 f. Tese (Doutorado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

MINGST, Karen A.; ARREGUÍN-TOFT, Ivan M; tradução: SERRA, Cristiana de A. **Princípios de relações internacionais.** 6ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

PEREIRA, R. C. **Geopolítica e transição energética na Alemanha: Potencialidades e desafios do hidrogênio verde.** 2022. 105f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Relações Internacionais) – Universidade Anhembí, São Paulo, 2022.

Portal EnerVision. **Energia Nuclear ocupa gargalos da transição energética.** Disponível em: <https://enervision.com.br/energia-nuclear-ocupa-gargalos-da-transicao-energetica>. Acesso em: 10 de jul.2024.

RANGEL, M. B.S.C. **A Geopolítica do Petróleo e seus reflexos para a MB.** 2021. 108f. Tese apresentada à Escola de Guerra Naval para a conclusão do Curso de Política e Estratégia Marítimas. Escola de Guerra Naval. Rio de Janeiro, 2021.

Revista Full Energy, 46ª edição. 2024. 74f. Grupo Mídia. Disponível em: <https://fullenergy.grupomidia.com/> Acesso em: 28 de jul.2024.

SILVA NETO, S.R. **Planejamento Estratégico/Gestão Estratégica: Modelos para a MB: A indústria de combustível nuclear no Brasil – Modelos de gestão.** 2022. 97f. Tese apresentada à Escola de Guerra Naval para a conclusão do Curso de Política e Estratégia Marítimas. Escola de Guerra Naval. Rio de Janeiro, 2022.

SOUSA, F.G. **A matriz elétrica brasileira e a transição energética no Brasil.** 2019. 52f. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes Renováveis da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.

TAVARES, F.B. **Política Energética em um contexto de transição: A construção de um regime de baixo carbono.** 2019. 216f. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Uranium 2022: Resources, Production and Demand. 29th edition of the “Red Book”. Agência da Energia Nuclear (AEN) e Agência Internacional da Energia Atômica (AIEA), Disponível em: [7634 uranium - resources production and demand 2022.pdf \(oecd-nea.org\)](https://www.oecd-nea.org/uranium-resources-production-and-demand-2022.pdf) Acesso em: 27 de jul.2024.

WNA - World Nuclear Association, Reactor Database. Disponível em: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary>. Acesso em: 31 de ago.2024.

73rd Statistical Review of World Energy. Energy Institute. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review> Acesso em: 27 de jul.2024.