



Universidade de Brasília

FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E GESTÃO
DE POLÍTICAS PÚBLICAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

SILMAR ALVES DE OLIVEIRA

SUSTENTABILIDADE, ECONOMIA E SEGURANÇA: Explorando a
Transição do Brasil para um Futuro Energético Baseado em Energias
Hidrelétrica, Eólica e Solar

Brasília/DF

2023

SILMAR ALVES DE OLIVEIRA

SUSTENTABILIDADE, ECONOMIA E SEGURANÇA: Explorando a
Transição do Brasil para um Futuro Energético Baseado em Energias
Hidrelétrica, Eólica e Solar

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia, do Departamento de Economia da Faculdade de Administração, Economia, Contabilidade e Gestão Pública da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Gestão Econômica de Inovação e Tecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Michele Cristina Silva Melo.

Brasília/DF

2023

SILMAR ALVES DE OLIVEIRA

SUSTENTABILIDADE, ECONOMIA E SEGURANÇA: Explorando a
Transição do Brasil para um Futuro Energético Baseado em Energias
Hidrelétrica, Eólica e Solar

A Comissão Examinadora, abaixo identificada, aprova o Trabalho de Dissertação de Mestrado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Economia, do Departamento de Economia da Faculdade de Administração, Economia, Contabilidade e Gestão Pública da Universidade de Brasília.

Prof.^a Dra. Michele Cristina Silva Melo (Orientadora)
Departamento de Economia (UnB)

Prof.^a Dra. Andrea Felipe Cabello
Departamento de Economia (UnB)

Prof.^a Dra. Amelia Naomi Onohara
Agência Espacial Brasileira (AEB)

Brasília – DF, 13 de junho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas exerceram um papel significativo, tanto diretamente quanto indiretamente, na minha trajetória até o presente. Minha gratidão se estende a todos eles, com uma menção especial a:

Ao meu pai, Abidias Domingues de Oliveira (em memória), que com dedicação incansável assegurou minha formação educacional e me ensinou que a busca pelo conhecimento era o percurso mais precioso a ser trilhado. Agradeço-lhe por continuar a me orientar espiritualmente. À minha mãe, Rosália Alves de Oliveira, sou grato pelo apoio, carinho e compreensão em relação à minha ausência durante esta fase.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha esposa, Maria da Glória Fernandes Oliveira, pela paciência, apoio, incentivo e cuidado inestimáveis. Sem você, este trabalho não teria sido possível, pois em cada etapa, esteve presente de forma entusiasta, transmitindo confiança e segurança de que tudo daria certo e eu seria bem-sucedido. Sua presença constante e seu apoio incansável foram fundamentais para meu progresso e conquistas. Sou grato por tê-la ao meu lado.

À minha orientadora, Prof.^a Dra. Michele Cristina Silva Melo por sua notável perspicácia intelectual na formulação de ideias que se alinharam perfeitamente à minha proposta de trabalho. Sua capacidade de oferecer insights e orientação precisa foi fundamental para o sucesso deste projeto. Expresso meu sincero agradecimento pelo seu apoio e contribuição significativa para o meu desenvolvimento acadêmico.

Ao Prof. Dr. Anésio de Leles Ferreira Filho, do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo incentivo e apoio desde o início do meu interesse em participar deste projeto de estudo. Sua atuação e encorajamento foram fundamentais para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Ao corpo docente do curso de Mestrado Profissional em Economia, cujos ensinamentos e orientações desempenharam um papel fundamental no aprimoramento da minha qualificação acadêmica.

À Universidade de Brasília, instituição que sempre me propiciou inúmeras oportunidades e possibilidades em minha jornada acadêmica e profissional.

A todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, torcem para o meu crescimento e sucesso, expresso meu sincero agradecimento. Sem o apoio e incentivo de cada um de vocês, eu não estaria onde estou hoje.

RESUMO

Esta dissertação avalia o potencial de expansão da energia hidrelétrica, eólica e solar na condução da transição energética do Brasil, examinando as implicações econômicas resultantes. O Brasil é reconhecido como uma das nações com maior potencial de energia renovável em todo o mundo, conforme destacado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e pela Agência Internacional de Energia (IEA). A expansão da oferta de energia elétrica por fontes de energia renováveis no país tem sido respaldada por um conjunto de estudos realizados por vários órgãos, incluindo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Portal Solar. Apesar de ser rico em recursos, a jornada do Brasil em direção a um futuro de energia sustentável encontra múltiplos desafios, incluindo obstáculos técnicos, políticos, regulatórios e econômicos. Elas vão desde flutuações climáticas que afetam a geração de energia até a falta de incentivos adequados, entraves burocráticos e instabilidade política que podem desestimular o investimento no setor renovável. A transição para um sistema de energia sustentável também pode gerar benefícios econômicos, desde a criação de empregos no setor de energia renovável até a economia na importação de combustíveis fósseis e a redução dos custos sociais relacionados à poluição do ar e às mudanças climáticas. A realização desses benefícios depende de estruturas regulatórias apropriadas, investimento em pesquisa e desenvolvimento e implementação de tecnologias avançadas de geração e armazenamento de energia. Esta dissertação investiga essas dinâmicas complexas, fornecendo uma análise holística das oportunidades e desafios apresentados pelo setor de energia renovável do Brasil.

Palavras-chave: energia renovável, transição energética, hidrelétrica, energia eólica, energia solar.

ABSTRACT

This dissertation evaluates the potential expansion of hydroelectric, wind, and solar energy in guiding Brazil's energy transition, examining the ensuing economic implications. Brazil is recognized as one of the nations with the greatest renewable energy potential globally, as highlighted by the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the International Energy Agency (IEA). The expansion of the electricity supply from renewable energy sources in the country has been endorsed by a series of studies conducted by various entities, including the Energy Research Company (EPE), the Brazilian Wind Energy Association (ABEEÓLICA), the Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy (Absolar), the National Electric System Operator (ONS), and Portal Solar. Despite being resource-rich, Brazil's path towards a sustainable energy future encounters multiple challenges, including technical, political, regulatory, and economic obstacles. These range from climatic fluctuations affecting energy generation to the lack of adequate incentives, bureaucratic hindrances, and political instability, which could deter investment in the renewable sector. The transition to a sustainable energy system could also yield economic benefits, from job creation in the renewable energy sector to savings on fossil fuel imports and a reduction in the social costs related to air pollution and climate change. The realization of these benefits depends on appropriate regulatory structures, investment in research and development, and the implementation of advanced energy generation and storage technologies. This dissertation investigates these complex dynamics, offering a holistic analysis of the opportunities and challenges presented by Brazil's renewable energy sector.

Keywords: renewable energy, energy transition, hydroelectric power, wind energy, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tendência energética durante a pandemia.....	36
Figura 2 - Variação percentual da demanda final média anual de energia.	47
Figura 3 - Variação do consumo de energia versus Produto Interno. Compilado de EPE (2015) e IBGE (2017).....	53
Figura 4 - A Oferta Interna de Energia no Brasil registrou, em 2021, um acréscimo de 4,5% em relação ao ano anterior.	54
Figura 5 - Matrizes Elétricas (2019).	57
Figura 6 - Matriz energética brasileira e capacidade (MW) instalada no SIN, por fonte.	59
Figura 7 - Capacidade de energia instalada - 2022_IRENA.....	61
Figura 8 - Queda da oferta de energia hidráulica na participação de renováveis na matriz energética no ano 2021.	63
Figura 9- Quadro da mudança na matriz elétrica em decorrência da escassez hídrica ocorrido ao longo do ano de 2021.....	64
Figura 10 - Movimento de queda da oferta hidráulica.	64
Figura 11 - Geração elétrica (GWh) em 2021.	65
Figura 12 - Elasticidade-renda da demanda de eletricidade: Histórico x Projeção....	67
Figura 13 - Consumo de eletricidade na rede vs. PIB.....	67
Figura 14 - Sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil - SIN.	69
Figura 15 - capacidade total de geração de energia elétrica.....	75
Figura 16 - Energia e investimentos em fontes eólicas (CG + GD) de 2000 a 2020 (esquerda) e solar fotovoltaica (direita)..	84
Figura 17 - Adições de capacidade renovável no Brasil, 2020-2027 (à esquerda) e energia solar fotovoltaica em escala de utilidade e capacidade eólica onshore por registro de mercado (à direita).	86
Figura 18 - Curva de CAPEX para Eólica “onshore” com projeções entre os anos de 2015 a 2050.	88
Figura 19 - Curva de CAPEX para Eólica “offshore” com projeções entre os anos de 2015 a 2050.	89
Figura 20 - Evolução da Capacidade Instalada de parques eólicos.....	91
Figura 21 - Evolução da geração eólica (GWh).....	92

Figura 22 - Geração e Representatividade da Fonte Eólica.....	93
Figura 23 - Inserção Eólica no SIN referente ao mês de abril/2023.	94
Figura 24 - Sazonalidade do potencial de geração solar fotovoltaica para os 12 meses do ano, em termos de rendimento energético anual para todo o Brasil (medido em kWh/kWp.mês no perfil de cores), admitindo uma taxa de desempenho de 80% para geradores fotovoltaicos fixos.	98
Figura 25 - Capacidade Fotovoltaica, Brasil, 2000-2027.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Capacidade hidrelétrica, Brasil, 2000-2027.....	61
Gráfico 2- Tendência de crescimento constante na participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira ao longo dos anos.	74
Gráfico 3 - Projeções de demandas de eletricidade e três projeções de oferta de energia eólica e Solar fotovoltaica para o Brasil de 2019-2050.....	85
Gráfico 4 - Fator de capacidade referente ao ano 2021.....	92
Gráfico 5 - Investimentos em novos projetos no setor Eólico (Em milhões de US\$).	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de Geração de Eletricidade por Recursos Energéticos.....	58
Tabela 2 - instituições que compõem o setor elétrico brasileiro.	76
Tabela 3 - Principais fontes geradoras de energia na matriz elétrica com destaque para a energia Eólica.	90
Tabela 4 - Montante de geração verificado para cada estado brasileiro com participação eólica.....	93
Tabela 5 - Desafios para a Implementação e Expansão da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica.
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CEBRI	Centro Brasileiro de Relações Internacionais.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
GWk	Gigawatt-hora.
IEA	International Energy Agency.
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável.
kWh	Quilowatt-hora.
kWp	Quilowatt de potência de pico.
MME	Ministério de Minas e Energia.
MWh	Megawatt-hora.
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
Proinfra	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas.
Wh/m ²	Watt por hora por metro quadrado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	ABORDAGENS SOBRE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA, PARADIGMAS TECNOLÓGICOS, TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS: PROSPECÇÃO CONCEITUAL E INTERCONEXÃO ENTRE OS TERMOS.....	17
	2.1 TECNOLOGIA: UMA ANÁLISE DA DEFINIÇÃO DA PALAVRA.....	17
	2.2 INOVAÇÃO: UM CONCEITO EM EVOLUÇÃO	20
	2.3 EXPLORANDO OS PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E AS TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS: ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS E INFLUÊNCIAS.....	23
3	ENERGIA: CONCEITOS FUNDAMENTAIS E SUAS APLICAÇÕES.....	29
	3.1 COMPREENDENDO A ÁREA DA ECONOMIA DA ENERGIA E SEUS IMPACTOS NO MUNDO MODERNO.	33
	3.2 VINCULAÇÕES DE ENERGIA, FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA, CRESCIMENTO ECONÔMICO E NOVAS TECNOLOGIAS.	38
	3.2.1 Importância da Energia como Componente do Crescimento Econômico: Perspectiva Contextual.....	38
	3.2.2 Segurança energética: um conceito dinâmico e complexo.....	41
	3.2.3 Energia Renovável: Um dos pilares de um futuro energético sustentável.....	43
	3.3 ENERGIA RENOVÁVEL: A CHAVE PARA O FUTURO SUSTENTÁVEL ATRAVÉS DAS NOVAS TECNOLOGIAS.....	48
4	PERSPECTIVAS DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO: AVALIAÇÃO HOLÍSTICA DA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL COM ÊNFASE NAS FONTES DE ENERGIA HÍDRICA, EÓLICA E SOLAR.....	52
	4.1 RECURSOS ENERGÉTICOS NO BRASIL: ANÁLISE DA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL	55
	4.2 A DEPENDÊNCIA DA HIDRELÉTRICA NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: IMPACTOS E SOLUÇÕES	60
	4.3 ELETRIFICAÇÃO EM ALTA: MOVIDA PARA A SUSTENTABILIDADE E A SEGURANÇA ENERGÉTICA	66

4.4	A PARTICIPAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: TENDÊNCIAS E DESAFIOS.....	70
4.5	DESAFIOS CONTEMPORÂNEOS DA SEGURANÇA ENERGÉTICA NO BRASIL:	79
4.6	EXPLORANDO O POTENCIAL DAS ENERGIAS EÓLICA E SOLAR NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	81
4.6.1	Energia Eólica: A Nova Força da Matriz Energética Brasileira.....	87
4.6.2	Perspectivas e Desafios da Energia Solar no Brasil – Potencial Fotovoltaico.....	96
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
6	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

É importante observar que nem todas as áreas temáticas expostas nessa dissertação estão igualmente relacionadas com os desafios energéticos ou climáticos, embora todas elas sejam, de fato, relevantes para a discussão desses problemas globais e nacionais. Portanto, se adotou uma abordagem crítica e reflexiva, a fim de avaliar as contribuições de cada área temática para o debate sobre energia e clima, e como elas podem ser articuladas e integradas de forma eficaz para a busca de soluções mais abrangentes e sustentáveis.

Este estudo propõe um arcabouço atualizado para o debate em torno da transição energética, tendo como objetivo um futuro mais sustentável, e proporciona uma análise crítica e abrangente sobre como as fontes de energia renováveis, hidrelétrica, eólica e solar, estão sendo utilizadas no Brasil, para enfrentar desafios e otimizar oportunidades. Estabelecendo assim uma conexão entre progressos tecnológicos e a aplicação de inovações no contexto das energias renováveis. Ao identificar esses aspectos, a pesquisa disponibiliza visões valiosas, para acadêmicos, profissionais e outros stakeholders focados no desenvolvimento de estratégias no âmbito da transição energética, destacando os desafios e oportunidades associadas à implantação de um sistema energético mais sustentável no país.

O campo da economia da energia é central para a compreensão das complexidades da sociedade industrial moderna e, mais especificamente, do modo como as atividades cotidianas são impulsionadas e alimentadas pelo consumo de energia. Sob esse prisma, Nina (2020), ressaltou que o consumo de energia está, por sua vez, intimamente ligado aos indicadores de desenvolvimento socioeconômico.

Nos últimos anos, houve uma ruptura de paradigmas e modernização dos processos dos sistemas elétricos, tendo como principais impulsionadores os avanços tecnológicos e crescentes preocupações com as questões relacionadas às mudanças climáticas, sustentabilidade, eficiência, segurança e transição energética. Destacando que a transição energética é um processo integrado que reconhece a interconexão entre tecnologia, sociedade e economia, e a necessidade de integrar esses aspectos para alcançar um sistema energético mais eficiente e sustentável. Nesse sentido, se observa um crescente movimento de integração de fontes de energia elétrica, o qual

tem promovido a diversificação da matriz energética brasileira e impulsionado mudanças nos processos de gestão, regulação, planejamento e operação.

Considerando as especificidades do assunto em questão, o problema de pesquisa proposto se concentra na transição para um futuro energético sustentável no Brasil, que apesar de ser rica em recursos renováveis, enfrenta uma série de desafios para aproveitá-los de maneira eficaz. Esses desafios englobam a capacidade de geração de energia das fontes renováveis, limitações tecnológicas, políticas públicas e regulamentações. Como as energias hidrelétrica, eólica e solar podem ser maximizadas efetivamente para impulsionar esta transição e quais são as implicações econômicas desta transformação?

Dentro dessa ampla compreensão, este estudo visa responder à seguinte questão: Quais são os principais desafios e oportunidades econômicos associados à transição para um sistema energético mais sustentável no Brasil, e como as energias hidrelétrica, eólica e solar podem contribuir para superar esses desafios e aproveitar essas oportunidades?

Tendo como objetivo principal se aprofundar nas temáticas apresentadas em relação ao setor elétrico no Brasil, no que tange as potencialidades e desafios econômicos da transição para um sistema energético sustentável, com foco nas energias hidrelétrica, eólica e solar, e explorando as estratégias para maximizar os benefícios e minimizar os obstáculos desta transição. Para atingir o objetivo principal a pesquisa abordou os seguintes aspectos: a) contextualização da transição energética no Brasil: análise do cenário atual e histórico da produção de energia na matriz elétrica do país, considerando as fontes de energia predominantes e a infraestrutura existente; b) análise das potencialidades e desafios das energias hidrelétrica, eólica e solar e levantamento das capacidades de geração, custos, impactos ambientais e outros fatores relevantes associados a cada uma dessas fontes de energia, juntamente com a identificação das principais barreiras e oportunidades para sua expansão no país; c) Identificação das estratégias para superar os desafios e aproveitamento das oportunidades, com base na análise dos desafios e potencialidades, identificando medidas e estratégias implementadas pelos tomadores de decisão, empresas de energia e outros stakeholders visando facilitar a transição energética no país.

Esse trabalho foi concebido por meio de um estudo que investigou e avaliou extensivamente as publicações existentes sobre o tema, buscando um entendimento

profundo e holístico da matéria em análise. A revisão bibliográfica envolveu um exame minucioso de documentos governamentais e acadêmicos, relatórios técnicos e mapas temáticos provenientes de instituições e associações nacionais como MME, EPE, ANEEL, ONS, ABEEólica e ABSOLAR, bem como organizações internacionais como IEA, IRENA e OCDE. São expostos estudos que evidenciam o potencial das energias hidrelétrica, eólica e solar no Brasil, sublinhando a complementariedade desses recursos em regiões específicas. A dissertação ainda aborda o panorama atual da infraestrutura para geração de energia renovável no país, apresentando um levantamento do progresso da estrutura que incentiva a implementação de usinas de energia eólica e solar.

É importante mencionar que os leilões de energia renovável constituem um instrumento fundamental para a integração dessas fontes no mercado elétrico brasileiro, estabelecendo um cenário regulamentado para a aprovação e venda de projetos energéticos por empresas privadas. Estas empresas fornecem dossiês completos com informações essenciais, auxiliando no processo de aprovação e venda. Esses leilões, integrados na reforma do setor elétrico e apoiados por diversas instituições do setor, se completaram os pilares do modelo institucional de energia desde 2004.

Nesse contexto, as fontes renováveis de energia têm se tornado cada vez mais atrativas para atender à crescente demanda por energia e reduzir a dependência de fontes não renováveis, que geram emissões de gases de efeito estufa. O Brasil, com sua vasta extensão territorial e recursos naturais privilegiados, como água, sol, vento e biomassa, possui a oportunidade de expandir sua matriz elétrica de forma sustentável. As fontes renováveis de energia já representam a maior parte da matriz energética nacional e com um grande potencial para aumentar ainda mais a sua participação. Entre suas principais fontes renováveis estão a hidreletricidade, a energia eólica e a energia solar, cada uma com desafios e oportunidades específicas para seu aproveitamento no país.

É fundamental que a segurança energética seja considerada uma peça chave para uma estratégia nacional de desenvolvimento, tendo em vista a importância de garantir um abastecimento de energia confiável e sustentável para atender às crescentes necessidades da economia e promover a competitividade do Brasil no cenário global. No entanto, é preciso destacar que a alocação desses recursos energéticos entre as diferentes regiões do país ainda apresenta desigualdades, bem como o nível de desenvolvimento econômico de cada uma delas, o que evidencia a

necessidade de um planejamento integrado e sustentável para o setor elétrico, com o objetivo de assegurar um aproveitamento eficiente e equilibrado desses recursos e promover uma distribuição equilibrada dos benefícios gerados.

A crescente demanda por energia no país nas próximas décadas não poderá ser totalmente suprida pela expansão da oferta hidrelétrica. Nesse sentido, a participação relativa da hidroeletricidade na matriz energética brasileira irá diminuir gradualmente (NINA, 2020). No entanto, essa redução não deve ser interpretada como uma diminuição da importância das hidrelétricas. Na verdade, o complexo já existente, com seus grandes reservatórios de água e interconexão com um sistema de transmissão nacional, é um ativo de valor inestimável para a produção de energia elétrica. Ele compõe um sistema interligado de geração e transmissão de energia de dimensões continentais, operado de forma centralizada.

Devido as consideráveis dimensões geográficas, as fontes de energia renováveis apresentam particularidades diversas entre si em diferentes regiões. Essas particularidades são evidenciadas em relação ao regime hidrológico dos rios, à intensidade da radiação solar e à velocidade média dos ventos ao longo do dia e do ano. Essas variações geoclimáticas têm um impacto direto na viabilidade e eficiência das tecnologias de energia renovável em cada localidade, bem como nas estratégias de aproveitamento desses recursos em nível regional (EPE, 2022). O país enfrenta uma série de obstáculos decorrentes das condições econômicas, geográficas, políticas e estruturais que permeiam o setor energético.

Nesse sentido a energia térmica, com sua versatilidade e eficácia custo-benefício, desempenha um papel estratégico essencial no contexto energético brasileiro, especialmente durante crises hídricas quando a oferta de hidroeletricidade é insuficiente. Sua capacidade de derivar de fontes renováveis ou de menor impacto ambiental, como a luz solar e gás natural, enriquecendo o panorama energético nacional, apesar do desafio ambiental representado pelo potencial combustível dos combustíveis fósseis. Dada a crescente gravidade das crises hídricas e o encorajamento dos Encargos de Serviço do Sistema (ESS) para manter os abastecimentos e evitar o racionamento energético, a gestão responsável da energia térmica emerge como uma necessidade para garantir a eficiência do abastecimento energético do país. No entanto, o país pode se valer da compreensão do processo global de transição energética como uma fonte de insights para enfrentar tais desafios de maneira eficiente.

2 ABORDAGENS SOBRE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA, PARADIGMAS TECNOLÓGICOS, TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS: PROSPECÇÃO CONCEITUAL E INTERCONEXÃO ENTRE OS TERMOS.

O presente capítulo propõe uma abordagem introdutória acerca dos principais aspectos relacionados à tecnologia, inovação, paradigmas tecnológicos e trajetórias tecnológicas. No entanto, é importante ressaltar que essa abordagem não visa esgotar a discussão conceitual desses temas complexos. O enfoque principal consiste em fornecer uma perspectiva teórica dessas temáticas e suas interconexões, estabelecendo assim uma estrutura conceitual e lógica que servirá como base e orientação para a fundamentação dos capítulos subsequentes, que se concentram especificamente na área da economia da energia.

2.1 Tecnologia: Uma análise da definição da palavra

À luz das evidências apresentadas por Joseph Schumpeter¹ em 1937 (1997, p. 33), “o ideal tecnológico, que não leva em conta as condições econômicas, é modificado. A lógica econômica prevalece sobre a tecnológica”. Outro aspecto básico, é que a tecnologia é utilizada primordialmente para atender às demandas econômicas (HUNG et al. 2022). Embora, os métodos produtivos somente são utilizados quando existe uma demanda pelos bens produzidos por meio deles, o que significa que eles são empregados apenas quando atendem às necessidades econômicas. Em decorrência dessa realidade, tais métodos são economicamente viáveis apenas quando produzem bens que podem ser comercializados por um preço que cubra os custos de produção. Ao levar em consideração essas perspectivas, é importante situar que a relação entre tecnologia, demanda econômica e métodos produtivos é intrinsecamente interdependente.

¹ Schumpeter foi um pensador proeminente e suas ideias foram influentes na compreensão do desenvolvimento econômico, da inovação e do papel do empreendedorismo na economia.

Conforme sugerido na literatura desenvolvida por Dosi² (2006, p.151), a “tecnologia compreende um amplo espectro de recursos, habilidades, métodos, procedimentos, experiências e dispositivos físicos que estão vinculados a uma tecnologia específica”. Esses aspectos se relacionam à resolução de problemas práticos e constitui um elemento essencial para o progresso e a inovação em diversas áreas. Outro aspecto a ser levado em conta são as mudanças no mercado, novas descobertas científicas e avanços em outras áreas tecnológicas, no qual influenciam a tecnologia em suas diversas aplicações. O crescente interesse pelas tecnologias é um fenômeno relativamente recente, influenciado pelas mudanças nos sistemas de produção e consumo, assim como pelas preocupações ambientais globais (EDWARDS, 2018).

Seguindo a linha de raciocínio de Schumpeter (1937) e Dosi (2006), a tecnologia pode evoluir independentemente das condições econômicas e ter impacto na economia sem atender necessariamente às demandas econômicas ou produzir bens e serviços. Nessa tônica discursiva, os economistas consideram a tecnologia uma parte relevante da economia, incluindo habilidades, conhecimentos e práticas. Considerando tais colocações, esses fatores incluem não somente os processos físicos de transformação de insumos em produtos, mas também os conhecimentos e habilidades necessários para estruturar as atividades que facilitam essa transformação.

Dado o ponto de vista articulado por Kim (2005, p. 16), “a tecnologia é utilizada para tornar possíveis mudanças, melhorias e expansões nas condições existentes, bem como para projetar e aprimorar a produção”. Considerando a interpretação oferecida pelo autor, se observa que a tecnologia representa a aplicação prática de conhecimentos e habilidades. Essa característica assume uma grande relevância para impulsionar o crescimento econômico e estimular a inovação, permitindo que empresas e indústrias melhorem suas operações e criem novos produtos e serviços. A otimização de despesas e a maximização do desempenho são componentes indispensáveis que podem impulsionar a

² Giovanni Dosi é um destacado economista que fez contribuições expressivas nas áreas de economia da inovação e economia evolucionária, fornecendo insights valiosos sobre como a inovação e a tecnologia impulsionaram o desenvolvimento econômico.

competitividade em mercados globais. Em consonância com as observações expostas, Christensen (2011, p. 23), discorre que a tecnologia surge como o “conjunto de processos pelos quais uma organização transforma mão de obra, capital, materiais e informação em produtos e serviços de grande valor”. Baseado nesse contexto, se pode afirmar que todas as empresas têm tecnologias.

No que tange o objetivo de maximizar seus resultados, as organizações precisam estar atentas às tendências do mercado e investir em pesquisa e desenvolvimento para criar soluções tecnológicas inovadoras. No entanto, esse processo de desenvolvimento tecnológico é complexo, pois envolve uma série de fatores e é influenciado por várias forças, tanto internas quanto externas às empresas. Levando em consideração estas circunstâncias, se torna essencial que as organizações estejam preparadas para acompanhar as mudanças no ambiente tecnológico e adaptar suas estratégias de acordo, visando garantir sua posição no mercado e impulsionar seu crescimento.

Sob esse prisma a International Energy Agency (IEA, 2020), ressalta que as decisões relacionadas à tecnologia são tomadas em um ambiente que está em constante evolução, à medida que empresas, consumidores, políticas, tecnologias concorrentes, infraestrutura e normas sociais mudam. Esse acompanhamento e adaptação são ainda mais importantes em um contexto de constante evolução tecnológica, uma vez que a inovação é uma chave para o sucesso empresarial.

Dadas estas condições, o sucesso do desenvolvimento tecnológico é influenciado pela acumulação gradual de pequenas inovações ao longo do tempo, o que constitui a difusão tecnológica (DAS et al., 2018). Ao considerar essas perspectivas, é fundamental destacar que o avanço tecnológico é um processo constante e progressivo que inclui a adoção de novas ideias e inovações, mesmo que esses progressos possam parecer modestos em um determinado período. As novas tecnologias ultrapassam as formas mais antigas de realizar tarefas e oferecer novos serviços para a sociedade. Em decorrência dessa realidade, o progresso tecnológico não segue uma trajetória linear e é afetado por vários fatores, incluindo mudanças nas demandas do mercado, novas descobertas científicas e avanços em outras áreas da tecnologia.

Tendo essas considerações em vista, quando uma nova tecnologia é desenvolvida, é comum que surjam desafios de mercado ou engenharia. Por essa razão, soluções temporárias alternativas são exploradas para lidar com esses

desafios. Com o passar do tempo, essas soluções temporárias são amplamente adotadas e utilizadas para resolver problemas maiores, levando a uma estrutura em expansão (HUNG et al., 2022). A busca por soluções para desafios iniciais evolui para uma abordagem exploratória de novas possibilidades e aplicações da tecnologia. Tal contexto denota que, a ênfase inicial em resolver problemas específicos impulsiona o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas e amplia o escopo de uso da tecnologia. A jornada de inovação de qualquer tecnologia é um processo evolutivo (IEA, 2020).

Sob a perspectiva dos inúmeros fatores mencionados, é possível concluir que, a tecnologia é uma área de estudo vasta e complexa, que envolve muitas definições distintas. No entanto, a maioria das definições concorda que a tecnologia consiste em um conjunto de conhecimentos, habilidades e técnicas utilizadas para produzir, desenvolver e aplicar produtos, serviços e sistemas que atendam às necessidades humanas. Se alia a esse fato que a tecnologia é considerada a aplicação prática da ciência para solucionar problemas e criar soluções, o que torna possível a criação de novas soluções para problemas antigos e a inserção de novos produtos e serviços no mercado, associando-a ao progresso e à inovação.

2.2 Inovação: Um conceito em evolução

Na obra de Joseph Schumpeter (1937), foram expostas as primeiras concepções sobre o fenômeno da inovação e sua relevância como vetor propulsor para o desenvolvimento econômico. O autor analisa a inovação sob uma perspectiva macroeconômica e afirma que esta pode levar ao contínuo desenvolvimento econômico, mudanças no mercado e nas atitudes do consumidor. Ressalta Schumpeter 1943 (2017, p. 58 – 59), que “o sistema capitalista se caracteriza por um processo de evolução constante”. A raiz dessa natureza evolutiva é que impulsiona a transformação interna do capitalismo, gerando de maneira contínua o novo e desfazendo de maneira contínua o antigo. Essa contextualização se trata da inovação.

A ampla variedade de fontes disponíveis na literatura deixa poucas dúvidas quanto à importância da inovação no processo de crescimento econômico e no

desenvolvimento socioeconômico. A inovação tem recebido cada vez mais atenção, visto que desempenha um papel extremamente decisivo na promoção do crescimento econômico moderno, bem como no bem-estar social e no interesse político. Em regra geral, a inovação pode ser entendida como o objetivo da humanidade em constante desenvolvimento, o que pode ser explicado pela capacidade criativa de invenção como uma fonte geradora de mudanças tecnológicas, sociais e culturais (EDWARDS, 2018).

De acordo com a IEA, a inovação tecnológica é um processo que envolve a criação de novas ideias para produtos ou processos de produção, que são iniciados desde o laboratório até a sua distribuição no mercado. No decorrer de cada etapa do processo, existem riscos financeiros, técnicos e de mercado, que são influenciados por fatores sociais e políticos. Como consequência, somente uma minoria dos produtos inovadores chega a ser implantada com sucesso no mercado de massa.

Tendo consciência dessa complexidade, a inovação é um conceito que engloba diversas interpretações e perspectivas em diferentes áreas do conhecimento (EDWARDS, 2018). Como indicado por Tidd et al. (2008, p.86), “o ato de inovar consiste em transformar oportunidades em novas ideias e implementá-las de forma prática e ampla”. De maneira análoga ao que foi expresso, Kim (2005, p. 30), define o termo inovação como “atividade pioneira, baseada principalmente nas competências internas de uma empresa de desenvolver e introduzir um novo produto no mercado”.

Essas tônicas discursivas conotam que a inovação vai além de ter uma ideia, mas envolve também o desenvolvimento de meios eficientes e úteis para aplicá-la. É justamente essa capacidade de inovar que permite às empresas e organizações se adaptarem e evoluírem em um mundo em constante mudança, criando soluções para problemas e oportunidades. Conforme o conceito schumpeteriano, a inovação está relacionada com mudanças de grande (radicais) ou pequena (incrementais) escala, as quais impactam significativamente as mudanças estruturais das indústrias individuais e segmentos de mercado (KOTSEMIR et al., 2013).

Outro aspecto fundamental é a distinção entre dois tipos de inovação: a de “fronteira”, que se trata de inovações na fronteira da ciência e tecnologia, e a de “recuperação”, que aproxima um país da fronteira tecnológica. Ambas são essenciais para o crescimento econômico e a adaptação das empresas e organizações ao mundo em constante mudança (SCHNEIDER; REYNOLDS, 2020,

p. 2). Certamente, a inovação se configura como um fator indispensável à adaptação das empresas e organizações em um contexto de incessantes transformações.

A execução efetiva de inovações demanda uma abordagem holística, que leve em consideração aspectos intrínsecos e extrínsecos à organização. Internamente, é essencial que a empresa possua a capacidade de explorar e adotar novas tecnologias, implementar práticas de inovação e adaptar mecanismos internos para explorar e desenvolver novas ideias. No entanto, existem barreiras tanto internas quanto externas que podem impedir o sucesso da implementação de inovações (DAS et al., 2018). Para muitas empresas, a dependência de fontes externas de conhecimento e tecnologia é essencial para inovar. Esse fato é evidente nas estruturas industriais de muitas economias desenvolvidas, onde as empresas produtoras de tecnologia e os setores de alta tecnologia geralmente representam uma parcela relativamente pequena das empresas, empregos e produção totais (O'Brien, 2020).

Considerando a totalidade dos pontos discutidos anteriormente, se pode dizer que o conceito de inovação é constantemente aprimorado e evoluído em diversas áreas, tais como tecnologia, negócios e políticas públicas. A inovação tecnológica é um impulsionador da mudança estrutural. De igual forma, a inovação pode ser entendida como a introdução de novos conceitos, produtos, processos ou serviços já existentes. É relevante mencionar que a inovação é um elemento essencial para o progresso e crescimento econômico, pois permite que empresas e indústrias criem novos produtos e serviços e aprimorem suas operações.

De forma análoga, a inovação impacta significativamente muitos aspectos da sociedade, como a economia, a tecnologia e a cultura. Por fim, o conceito de inovação é dinâmico e está em constante evolução, de acordo com o surgimento de novas abordagens e tecnologias e a evolução das necessidades de mercados.

2.3 Explorando os paradigmas tecnológicos e as trajetórias tecnológicas: análise das tendências e influências

Como referido por Dosi (2006, p. 41 - 42), “A pesquisa tecnológica é orientada por paradigmas tecnológicos que se constituem como modelos para a solução de problemas específicos e se fundamentam em princípios e conhecimentos científicos e tecnológicos específicos”. Esses paradigmas são importantes direcionadores para o avanço do conhecimento e da produção de soluções práticas, mas também podem excluir ideias não consideradas viáveis ou relevantes. Por outro lado, é possível compreender a maneira pela qual as tecnologias são desenvolvidas e utilizadas em um domínio específico por meio do conceito de paradigma tecnológico. Esse conceito é influenciado por fatores como a disponibilidade de recursos, a eficiência e o impacto ambiental. E ao considerar essa perspectiva, se torna essencial avaliar criticamente esses paradigmas tecnológicos para garantir a inclusão de novas ideias e abordagens que possam contribuir para o avanço científico e tecnológico.

O paradigma, como abordagem, proporciona uma visão ampla da área em questão, evidenciando os pontos essenciais que devem ser abordadas e as metodologias de pesquisa apropriadas para analisá-las. Esses paradigmas são orientados para atender às necessidades dos usuários e às características valorizadas nos produtos ou serviços relevantes, sustentados por recursos de conhecimento e processos de pesquisa confiáveis (DOSI; NELSON, 2013).

Mas nesse jogo de interlocuções surge uma mudança no paradigma tecnológico, onde se torna necessário praticamente recomeçar do zero na resolução de problemas. E em razão dessa situação se pode gerar impactos significativos nas trajetórias tecnológicas, envolvendo distintas bases de conhecimento e protótipos de artefatos, além de provocar alterações nas dimensões tecno-econômicas da inovação. E diante desse contexto, algumas características que antes eram desejáveis podem se tornar mais fáceis de serem alcançadas, enquanto outras podem perder importância, e novas características desejáveis podem surgir (DOSI; NELSON, 2013).

Um exemplo relevante é a transição de paradigma tecnológico que ocorre na mudança de tecnologias baseadas em combustíveis não renováveis para

tecnologias baseadas em fontes de energia renovável. Enquanto o paradigma de energia fóssil dominou por muitos anos a utilização de fontes de energia não renováveis, o paradigma de energias renováveis tem se destacado recentemente. Essa evidência ocorre porque o paradigma de energia fóssil tem sido questionado devido aos impactos ambientais negativos da produção e utilização de energia fóssil, como a contribuição para a mudança climática. O paradigma de energias renováveis se concentra no desenvolvimento e uso de fontes renováveis de energia, como a eólica, a solar e a hidrelétrica. Esse paradigma tem ganhado importância devido à necessidade de reduzir a dependência de fontes não renováveis de energia e proteger o meio ambiente. Como resultado, a transição energética que está ocorrendo em muitos países busca aumentar a produção de energia a partir de fontes renováveis e diminuir a dependência de fontes de energia não renováveis.

Outro aspecto se refere ao progresso tecnológico que pode ser entendido como uma evolução na forma como os equilíbrios entre os diferentes aspectos da tecnologia são alcançados, de modo que o paradigma tecnológico orienta a direção do progresso, restringindo outras possibilidades de desenvolvimento. Considerando tais colocações, DOSI (2006, p. 42). Define que “as trajetórias tecnológicas são caminhos possíveis que a tecnologia pode seguir, mas que estão limitados pelo paradigma atual”

Existem diversos fatores que podem influenciar a trajetória tecnológica, tais como alterações nas necessidades dos usuários, avanços científicos e tecnológicos, e variações nas condições econômicas e políticas. É importante lembrar que a trajetória tecnológica pode apresentar variações significativas dependendo do setor e da região em análise (NELSON; WINTER, 1977). Para complementar, Kim (2005, p. 137), se refere ao desenvolvimento tecnológico como a "direção evolucionária do progresso tecnológico observável na indústria como um todo e em diferentes setores industriais". As trajetórias tecnológicas podem ser representadas como uma série de atividades de resolução de problemas que incluem um padrão cíclico de fluxo de informação divergente-convergente (HUNG et al., 2022).

Portanto, se percebe que os avanços tecnológicos representam uma progressão contínua de conhecimentos que se acumulam ao longo do tempo, buscando soluções para problemas específicos em distintos setores. Nesse sentido, Teece (2005, p. 159) destaca que “a dependência das trajetórias tecnológicas

aumenta consideravelmente quando há condições de retorno crescente pela sua utilização, o que está diretamente relacionado à demanda”. Essa condição tende a tornar as tecnologias e produtos que as abarcam cada vez mais atrativos e, conseqüentemente, amplia a sua adesão.

Conforme afirmado por Teece (2005, p. 159), “as empresas possuem a possibilidade de competir passivamente ou estrategicamente por meio de atividades de apoio à tecnologia quando há retornos crescentes”. O conceito de dependência de trajetórias tecnológicas se faz essencial na avaliação de oportunidades tecnológicas em um setor industrial, caracterizado por um conjunto de procedimentos limitados pelo próprio paradigma tecnológico. A fronteira tecnológica, por sua vez, representa o ponto mais avançado da trajetória tecnológica, considerando as dimensões tecnológicas e econômicas relevantes. Desse modo, a trajetória tecnológica é acumulativa, já que as possibilidades de desenvolvimento dependem da posição atual em relação à fronteira.

Nessa perspectiva, a trajetória tecnológica depende de ações e decisões tomadas no passado, sendo fundamental compreender como os agentes mediadores no processo de inovação podem influenciar o rumo da inovação e a trajetória de uma tecnologia ou setor. Esse processo de inovação engloba diversos participantes, incluindo governamentais, investigadores, investidores, empreendedores, empresas e sociedade civil. Cada um desempenha um papel importante na geração de ideias para novas tecnologias ou na melhoria das tecnologias existentes, bem como no financiamento e na implementação dessas inovações no mercado.

Consoante o argumento de Kim (2005, p. 153), ressalta que “a mudança tecnológica é um processo pelo qual uma empresa busca solucionar problemas reais ou potenciais, desenvolvendo ativamente novos conhecimentos, seja por meio de imitação ou inovação”. Nesse sentido, a trajetória tecnológica pode ser compreendida como um processo acumulativo de conhecimentos, visando encontrar soluções para problemas específicos em determinados setores. No qual a dependência das trajetórias tecnológicas aumenta quando existem condições de retorno crescente pela sua utilização, o que é um fenômeno relacionado à demanda e tende a tornar as tecnologias e produtos que as incorporam cada vez mais atraentes quanto maior for sua adesão.

Como evidenciado por NINA (2020), a transição para uma nova tecnologia pode ser difícil quando a trajetória dominante envolve um grande investimento. O paradigma tecnológico dominante limita as opções de desenvolvimento e o grau de inovação também influencia as trajetórias. Dadas estas condições, o retorno esperado, o custo de produção e a demanda do mercado influenciam e estas podem ser complementares ou restritivas em relação a outras trajetórias, dificultando a transição para uma trajetória alternativa quando a trajetória dominante é forte. Um exemplo de trajetória tecnológica que enfrenta desafios é a transição energética, que requer a introdução de novas tecnologias energéticas, a substituição de equipamentos ineficientes e a mudança de infraestruturas de distribuição e transporte. O custo elevado associado a essas mudanças é o desafio mais claro a ser considerado

Sob a perspectiva expressa por Tidd et al. (1994, p. 42), “as organizações desenvolvem capacidades com base em uma trajetória tecnológica específica, o que pode gerar dificuldades na transição para a próxima fase”. No entanto, é cada vez mais importante aprofundar a análise das trajetórias tecnológicas, pois elas podem variar entre empresas de um mesmo segmento de mercado. Essas variações estão sujeitas a oportunidades, aplicabilidade, capacidade de absorção e características de base tecnológica. Em tal contexto, “a trajetória tecnológica é vista como um curso inerente à resolução de problemas que surgem em um determinado paradigma produtivo” (OLIVEIRA, 2009, p. 23).

Outro aspecto relevante a ser considerado é que o design de um produto tem o potencial de impactar a plataforma tecnológica e desencadear mudanças tecnológicas. Onde é relevante adotar uma abordagem estratégica para avaliar quando uma nova tecnologia emergente substitui outra já existente, o que pode ser feito por meio da utilização de curvas-S. Essas curvas representam o ciclo de vida de uma tecnologia, incluindo inovações incrementais, disruptivas e radicais. Conforme sugerido na literatura desenvolvida por CHRISTENSEN (2011, p. 83 – 96), “para gerir a estratégia tecnológica, é essencial identificar quando a curva-S atual atinge o ponto de inflexão e desenvolver uma tecnologia sucessora que possa substituí-la”.

Com base nessa perspectiva, a mudança da curva da tecnologia estabelecida é o fator determinante nesse processo. Quando a curva atinge seu ponto de inflexão e sua segunda derivada se torna negativa, isso indica que a tecnologia está melhorando a uma taxa decrescente, o que pode levar ao

surgimento de uma nova tecnologia para substituí-la. Para avançar para uma nova curva de tecnologia, é necessário abandonar a tecnologia atual e adotar uma nova, o que pode ser um desafio para as empresas. O progresso ao longo de uma curva-S pode ser alcançado por meio de inovações incrementais, mas mudar para uma nova curva exige uma mudança radical na abordagem tecnológica, (CHRISTENSEN, 2011).

Em sua essência, a curva-S da tecnologia é uma representação da evolução dinâmica da tecnologia, que inclui o papel do aprendizado e da experimentação como base para o desenvolvimento tecnológico subsequente. Embora originalmente utilizada na gestão e medição de tecnologia, a curva-S tem sido principalmente aplicada na estratégia de inovação. A ideia central é que, enquanto as empresas estabelecidas têm vantagem comparativa em inovação ao longo de uma trajetória tecnológica, as startups podem obter vantagem competitiva em uma nova curva-S da tecnologia.

Sob a perspectiva expressa por Tidd et al. (1994), é possível distinguir diferentes trajetórias de acumulação tecnológica entre as empresas, cada uma com suas características específicas. As empresas que dependem de fornecedores para insumos de produção tendem a se concentrar em melhorias nos métodos de produção e insumos relacionados, devido ao custo dos insumos ser um fator importante a ser considerado. Em contraste, as empresas intensivas em escala tendem a investir em pesquisa e desenvolvimento para acumular tecnologia por meio do projeto, construção e operação de sistemas de produção e/ou produtos complexos, o que aumenta sua eficiência e produtividade, permitindo se destacar no mercado e atender às demandas dos consumidores.

Por outro lado, Tidd et al. (1994, p. 193), destaca que “as empresas de base científica acumulam tecnologia principalmente por meio de pesquisa e desenvolvimento realizados em laboratórios internos, utilizando conhecimentos, competências e técnicas provenientes da pesquisa acadêmica”. Nessas empresas, a busca por novos mercados de produtos e tecnologias relacionadas é uma das principais direções de acumulação tecnológica. No entanto, mesmo que o avanço em novas áreas possa ser atrativo, pode não haver incentivos suficientes para que as empresas redirecionem recursos de suas atividades tradicionais.

É necessário sublinhar que a trajetória de acumulação tecnológica proposta por Tidd et al. (1994) é uma representação simplificada, e que as empresas podem

estar presentes em mais de uma categoria de trajetória. Empresas de grande porte, em especial, podem ter capacidade de tecnologia intensiva em escala, especialmente em máquinas e instrumentação, para garantir uma produção eficiente.

Tendo em vista a ampla gama de questões analisadas, sob a ótica da dinâmica do desenvolvimento tecnológico, os paradigmas tecnológicos exercem um papel essencial ao orientar as pesquisas e resolução de problemas em um domínio específico. No entanto, eles também podem limitar a inclusão de novas ideias e abordagens, demonstrando a necessidade de avaliação crítica desses paradigmas. A mudança em tais paradigmas pode acarretar significativas alterações nas trajetórias tecnológicas, as quais dependem de diversos fatores, como necessidades dos usuários, avanços científicos, e variações nas condições econômicas e políticas. A dependência de trajetórias tecnológicas se torna mais acentuada com o retorno crescente pela sua utilização, promovendo uma maior adesão às tecnologias e produtos. Dada a complexidade dessa dinâmica, é fundamental o papel dos diferentes participantes no processo de inovação para a efetivação de transições tecnológicas.

Cabe ainda ressaltar que a transição para uma nova tecnologia pode ser dificultada pelo investimento necessário e pelo paradigma tecnológico dominante. Compreender o ciclo de vida de uma tecnologia, através das curvas-S, se torna uma estratégia relevante, possibilitando identificar o ponto de inflexão e o surgimento de novas tecnologias. As empresas, por sua vez, podem seguir diferentes trajetórias de acumulação tecnológica, cada uma com suas especificidades, tendo em vista as demandas de seus setores e mercados. Assim, a compreensão das complexidades inerentes aos paradigmas e trajetórias tecnológicas é fundamental para a inovação e desenvolvimento tecnológico em diversos setores.

3 ENERGIA: CONCEITOS FUNDAMENTAIS E SUAS APLICAÇÕES

A definição do conceito de energia é amplamente reconhecida como uma tarefa desafiadora. Diante desse desafio, o presente capítulo tem como objetivo apresentar conceitos fundamentais relacionados à energia, especialmente no contexto de um sistema energético que requer a contínua conversão de energia de uma forma para outra. Para tanto, se adotou uma definição que leva em consideração o conceito de desenvolvimento sustentável, sem, contudo, contrariar os princípios estabelecidos pela Física. Com base nessa análise, e de acordo com Jannuzzi et al. (2018, p. 22), a energia é entendida como “uma força motriz ou trabalho derivado de diversas fontes que, quando conscientemente aproveitada, pode promover o desenvolvimento humano dentro dos limites ambientais.

Dada essa perspectiva, a energia é basicamente compreendida como a capacidade de realizar trabalho e, como tal, pode ser encontrada em diversas formas, como a mecânica, elétrica, térmica, radiante, química ou nuclear (JANNUZZI et al., 2018). No qual qualquer alteração no estado físico, como ocorre durante o processo de produção, requer a utilização de uma ou mais dessas formas de energia. Essas duas afirmações simples evidenciam a importância fundamental da energia e, portanto, sugerem que economistas responsáveis pela distribuição de recursos escassos entre diferentes usos precisam levar em consideração, de maneira explícita ou implícita, as transformações de energia envolvidas nos processos de produção e consumo (WEBB; RICKETTS, 1980).

A demanda por energia é uma necessidade premente na sociedade moderna, equiparada a serviços essenciais como a infraestrutura de abastecimento de água, saneamento, transporte e saúde pública (JANNUZZI et al., 2018). Considerando que a energia é um recurso básico para o funcionamento da sociedade moderna, a sua falta pode ter graves consequências econômicas e sociais. Exceto em situações em que a subsistência é possível sem o uso de recursos energéticos, como em algumas comunidades remotas (ZWEIFEL, 2017). Sendo a energia a essência da civilização moderna e impulsionadora das atividades cotidianas. Tal relação se deve ao fato de que o consumo está intimamente ligado a indicadores de desenvolvimento socioeconômico, tais como a taxa de analfabetismo, mortalidade infantil e expectativa de vida (NINA, 2020).

De acordo com essa linha de pensamento, a energia se configura como um dos fatores centrais na produção, juntamente com o trabalho, o capital e as matérias-primas, sendo absolutamente indispensável para a realização de qualquer atividade econômica. De fato, a energia se releva essencial, pois viabiliza o funcionamento de máquinas e sistemas que tornam possível a produção de bens e serviços, impulsionando assim a atividade econômica. Sem energia, muitas atividades produtivas simplesmente não poderiam ocorrer.

Portanto, é razoável inferir que, a energia se estabelece como um elemento fundamental e insubstituível dentro do sistema produtivo, exercendo um papel determinante para a operação e expansão da economia. Por outro lado, a gestão adequada e sustentável dessa energia pode, conseqüentemente, influenciar de forma significativa a produtividade, a competitividade e a sustentabilidade ambiental a longo prazo das atividades econômicas.

Não se pode deixar de considerar que a energia ocupada um papel político significativo nas relações internacionais, exercendo influência sobre os principais países exportadores de energia e seu status econômico e social (ZWEIFEL, 2017) (NOURUZI; NOURUZI, 2020). Tendo em mente esta perspectiva, nações como Arábia Saudita, Rússia e Estados Unidos, conhecidas por suas exportações substanciais de petróleo, experienciam um impacto significativo em suas políticas econômicas e diplomáticas, decorrente da geopolítica energética.

Levando em conta esses fatores, países com índices elevados de desenvolvimento humano tendem a consumir mais energia, uma vez que esta é considerada um fator primordial para o avanço e crescimento da humanidade. Por outro lado, a sua escassez está diretamente relacionada a altos índices de pobreza e baixos indicadores econômicos e sociais (NINA, 2020). Com relação ao desenvolvimento humano, se nota um vínculo expressivo entre altos índices de desenvolvimento humano (IDH) e alto consumo de energia. A Dinamarca, por exemplo, se destaca por possuir alto IDH e também por ser uma grande consumidora de energia per capita, principalmente devido à sua sofisticada indústria e infraestrutura bem desenvolvida. Em contra partida, no que tange a escassez de energia, um exemplo de situação pode ser observado em países do continente africano, como o Chade ou a Somália, onde o acesso à energia é limitado e essa condição reflete diretamente nos seus índices de desenvolvimento humano, que são consideravelmente baixos. Desse ponto de vista, é relevante que haja um

equilíbrio entre o consumo e a preservação dos recursos energéticos para garantir um desenvolvimento sustentável e uma melhoria na qualidade de vida das populações.

Com base no contexto atual e na urgência de mudanças rápidas nos sistemas de energia, bem como nas crescentes preocupações globais, a adoção de abordagens sociotécnicas³ emerge como um componente importante para entender e superar os desafios relacionados à energia (SOVACOOOL et al. 2020). A transição energética pode ser vista como um processo de transformação sociotécnica, que reconhece que as mudanças no sistema energético transcendem a esfera puramente tecnológica, englobando também mudanças sociais, políticas e energéticas mais abrangentes, assim como a resistência a essas mudanças (LAZARO et al., 2022). Em função dos diferentes pontos de vista que cercam o tema, a análise sociotécnica da energia pode oferecer uma visão mais abrangente e integrada dos desafios enfrentados pela sociedade contemporânea, permitindo a elaboração de estratégias mais efetivas e sustentáveis para enfrentar esses desafios.

É relevante ressaltar que a energia possui um papel significativo em diversos setores de demanda final, tais como residências, indústrias, comércio/serviços, transporte e agricultura. A demanda de energia destinada ao consumo final é conhecida como demanda de energia final e não inclui o consumo energético associado ao processo de transformação, como é o caso da utilização de carvão para a produção de eletricidade. Nesse cenário, aponta Timilsina (2020), que a distinção primordial entre o consumo de energia primária e a demanda de energia final reside no fato de que o primeiro abrange todo o consumo energético, tanto na fase de transformação quanto na fase de consumo final, enquanto o segundo não leva em consideração o consumo energético destinado aos fins de transformação. A teoria econômica geral oferece diversas percepções relevantes para a análise dos

³ A perspectiva da transição sociotécnica oferece um arcabouço conceitual para compreender a complexidade dos processos envolvidos nas transições. Dentro dessa abordagem analítica, as transições nos regimes de energia são compreendidas como configurações sociotécnicas que exigem a participação das partes interessadas na construção de mudança de governança que possibilitam mudanças nas práticas do regime vigente. A vinculação do regime sociotécnico ao Estado é uma estratégia chave para facilitar as transições, uma vez que o governo nacional possui uma ampla gama de instrumentos para intervir na sociedade. Para legitimar e consolidar os novos regimes sociotécnicos, os atores utilizam recursos materiais, informacionais e simbólicos, ao mesmo tempo em que constroem subsistemas políticos em torno de políticas de interesse do regime (SOARES et al., 2021).

mercados de energia, destacando que as fontes de energia são consideradas bens escassos, mesmo que sejam fisicamente abundantes. De maneira similar a outros mercados, os preços coordenam as decisões individuais na oferta e na demanda, possibilitando a alocação eficiente dos recursos escassos (ZWEIFEL, 2017).

Outro ponto a ser considerado é que nos últimos anos, a preocupação de especialistas com o uso de combustíveis fósseis e seus impactos na sociedade e no suprimento de energia tem se tornado cada vez mais evidente. Com o esgotamento desses recursos, bem como os riscos associados à segurança energética⁴ e às mudanças climáticas, se torna importante repensar a estrutura atual de produção de energia e buscar alternativas viáveis. A crescente participação das fontes de energia renovável (ER) na matriz energética global se torna um fator de relevância essencial no qual a transição para um sistema energético mais sustentável é uma tendência em ascensão, que oferece tanto oportunidades quanto desafios para o desenvolvimento econômico.

De acordo com o relatório da *International Renewable Energy Agency* de 2023, a adoção de fontes de ER pode trazer segurança e independência energética, estabilidade de preços e redução de emissões de gases de efeito estufa, fatores essenciais para alcançar metas de desenvolvimento sustentável e mitigação das mudanças climáticas. A fim de atingir essa meta, é necessário transferir um capital significativo dos combustíveis fósseis para as fontes de ER em um ritmo mais acelerado, com um aumento de mais de três vezes nos investimentos em energias renováveis em relação ao nível atual.

Em consonância com o que foi mencionado é importante ressaltar que há várias tecnologias disponíveis para enfrentar os desafios da transição energética e promover o desenvolvimento de um sistema energético mais sustentável. Dessa forma, a transição energética é um processo integrado que reconhece a interconexão entre tecnologia, sociedade e economia, e a necessidade de integrar esses aspectos para alcançar um sistema energético mais eficiente.

⁴ A Agência Internacional de Energia (IEA, 2005) define segurança energética como “a oferta e disponibilidade de serviços energéticos a todo momento, em quantidade suficiente e a preços acessíveis”.

Paralelamente, essa transição energética implica uma dimensão social significativa, compreendendo nas práticas e padrões de consumo de energia por parte da sociedade. Mudanças dessa natureza podem ser incentivadas por meio de campanhas de conscientização, estímulos governamentais e regulamentações que favorecem a adoção de comportamento mais consciente em relação ao consumo de energia. No que diz respeito ao meio ambiente econômico, a transição energética demanda um investimento considerável em infraestruturas de energia renovável, e definição de políticas públicas e negociação de mercado que suportem a viabilidade econômica desses investimentos. Tal transição possui o potencial de originar efeitos econômicos relevantes, tais como a geração de emprego, o incentivo para a criação de novas indústrias, redução de custos ligados a problemas ambientais e climáticos.

3.1 Compreendendo a área da Economia da Energia e seus impactos no mundo moderno.

A Economia da Energia é uma ramificação da Economia Aplicada que se dedica a analisar questões relacionadas ao setor energético por meio de princípios e ferramentas econômicas, com o intuito de oferecer uma compreensão bem informada dos problemas e equipar os leitores com ferramentas analíticas para entender demanda e oferta ⁵ investimentos, interações energia-economia e aspectos políticos relacionados (NOURUZI; NOURUZI, 2020). A origem dessa área de estudo e pesquisa remonta a um estudo influente publicado em 1972 pelo Clube de Roma, denominado, Os Limites do Crescimento (MEADOWS et al. 1972), que apresentou pela primeira vez ao mundo os limites físicos impostos ao crescimento econômico. De forma inequívoca, o relatório concluiu que a manutenção do atual

⁵ Na atualidade, as estimativas de demanda e oferta de energia derivam de sistemas altamente integrados de processamento de informações, que utilizam modelos integrados técnico-econômicos combinados com ferramentas matemáticas para prever variáveis relevantes. Uma grande quantidade de simuladores, baseados em modelos técnico-econômicos, está disponível para estudos em planejamento integrado de recursos energéticos em instituições acadêmicas e governamentais (JANNUZZI et al., 2018).

paradigma de sociedade e o conseqüente esgotamento de recursos inevitavelmente levariam o mundo, no decorrer do século XXI, a um dramático colapso (ZWEIFEL, 2017).

Após a divulgação do estudo mencionado, eventos inesperados como os choques de preços do petróleo em 1973 e 1979 causaram preocupações globais e fortaleceram a perspectiva pessimista em relação à disponibilidade e aos impactos ambientais e econômicos associados ao uso do petróleo como principal fonte de energia (ZWEIFEL, 2017). A partir desses eventos, houve um questionamento do modelo de desenvolvimento predominante, que dependia essencialmente do uso de petróleo como fonte de energia, e o fim da era da energia barata foi marcado pelo aumento significativo nos preços do petróleo juntamente com o aumento das taxas de juros. Essa crise do petróleo foi uma encruzilhada histórica que revelou as limitações e vulnerabilidades do modelo energético vigente. À vista dos fatos que foram expostos, se destacou a urgência de buscar alternativas sustentáveis e eficientes para a geração e uso de energia (JANNUZZI et al., 2018).

Diante da crise do petróleo na década de 1970, com a alta expressiva do preço, juntamente com o aumento das taxas de juros, colocou um fim abrupto à época da energia de baixo custo, o que provocou uma profunda reflexão sobre o modelo de desenvolvimento então vigente, que era, em grande parte, pautado na utilização dessa fonte energética (JANNUZZI et al., 2018), alguns economistas passaram a desenvolver novos modelos econômicos, que enfatizavam o impacto do preço no comportamento dos participantes do mercado. Segundo tais modelos, o aumento do preço do petróleo é esperado para incentivar a adoção de alternativas de substituição antes do esgotamento completo dos recursos petrolíferos. Nesse sentido, o aumento do preço do petróleo é visto como um passo em direção à solução do problema energético. Como resultado, o consumo global de petróleo começou a diminuir, como previsto por tais modelos (ZWEIFEL, 2017).

Dentre as contribuições notáveis da época, se ressaltam o modelo Hudson-Jorgensen e o modelo ETA-MACRO de Manne (ZWEIFEL, 2017). O primeiro, desenvolvido em 1974 e aprimorado em 1978, é um modelo econômico de grande relevância para a análise da dinâmica da oferta e demanda de energia em âmbito nacional, sendo utilizado para examinar o papel do preço da energia na inovação tecnológica, na alocação de recursos e no comportamento do consumidor. Onde, esse modelo se concentra em quatro setores principais: energia, transformação, consumo e governamental, e tem sido amplamente aplicado na análise de políticas

energéticas em diferentes contextos, fornecendo soluções eficientes e sustentáveis para o setor energético.

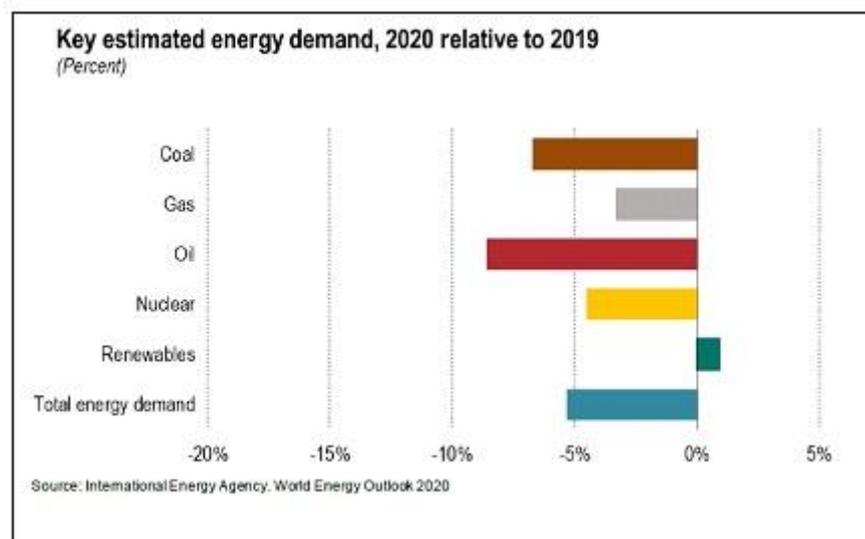
No que tange o modelo ETA-MACRO, criado por William D. Nordhaus e William A. P. Manne, é um modelo de equilíbrio geral utilizado para avaliar políticas energéticas, com o objetivo de estimar a relação bidirecional entre o setor de energia e o equilíbrio econômico. No qual consiste na fusão de dois modelos distintos: o ETA, uma análise de processo para Avaliação de Tecnologia Energética, e um Modelo de Crescimento Macroeconômico que prevê a substituição entre insumos de capital, trabalho e energia. Seu objetivo é estimar a relação entre o setor de energia e a economia, considerando fatores como interações de economia de energia, conservação econômica, substituição Inter combustível e novas tecnologias de abastecimento, levando em conta as incertezas em relação às datas e taxas de introdução (MANNE, 1981).

Esses modelos, juntamente com outros iniciais, foram fundamentais para a melhoria da compreensão dos mercados de energia e aprimoramento das recomendações que orientam a política energética (ZWEIFEL, 2017). A relevância desses modelos econômicos para a análise do setor energético e para incentivar soluções que visem a sustentabilidade é inegável. Entretanto, é notório que os desafios e incertezas que assolam o sistema energético global atingem um ápice jamais visto desde os grandes choques energéticos da década de 1970, precedidos por uma série de eventos geopolíticos, como a guerra no Iraque em 2003 e a disputa de gás entre Rússia e Ucrânia em 2005/2006, bem como a problemas técnicos, como o apagão ocorrido em 2003 no Nordeste dos EUA, greves, como a ocorrida na Venezuela em 2002/2003, e fenômenos climáticos extremos, a exemplo do furacão Katrina em 2005, que impactaram negativamente o fornecimento de energia (LÖSCHEL et al., 2010).

Em um contexto semelhante, conforme observado pelo Banco Mundial, a pandemia de COVID-19, por meio da sua disseminação global e medidas de contenção, causou uma diminuição significativa na demanda por energia, transporte e serviços em diversos setores econômicos. Essa redução de demanda, por sua vez, contribuiu para a recessão global mais intensa experimentada desde a Segunda Guerra Mundial, com impactos negativos significativos sobre as economias nacionais e a vida das pessoas. Em contraposição ao modelo de demanda energética convencional, a produção de energia renovável (ER) tem se

mostrado resiliente no período subsequente à crise da COVID-19. Essa crise trouxe consigo uma oportunidade para inovar em tecnologias de ER, proporcionando aos governos uma chance única em uma geração de voltar a priorizar e apoiar a inovação, incluindo pesquisa e desenvolvimento (P&D), como parte dos esforços de estímulo com o objetivo de alcançar uma transição de longo prazo para emissões líquidas zero⁶ (IEA, 2020). Em termos globais, o emprego de ER em todos os setores registrou um aumento de 1,5%, resultando na ampliação da participação dessas fontes na demanda de eletricidade em diversas regiões (Figura 1), incluindo partes da Europa e dos Estados Unidos (DEB, 2021).

Figura 1 - Tendência energética durante a pandemia.



Fonte: Creative Destruction During Crises: An Opportunity for a Cleaner Energy Mix – Dep, 2021.

Em função dos impactos que podem ser gerados, recessões como essa podem ter um efeito de reestruturação, em que tecnologias obsoletas e menos rentáveis são eliminadas e substituídas por novas formas de produção que utilizam tecnologias mais avançadas. Essa dinâmica é denominada “destruição criativa”, conceito cunhado por Schumpeter em 1937 (2017, p.655), e tem sido amplamente

⁶ Emissões Líquidas Zero se refere ao equilíbrio entre a quantidade produzida de gás de efeito estufa e a parcela removida da atmosfera (CODEX).

reconhecida como um agente impulsionador da inovação no âmbito econômico. Entre outros, a atual guerra em curso na Ucrânia representa uma ameaça à escassez de alimentos e energia, o que pode prejudicar de forma significativa a saúde e o bem-estar em todo o mundo. Reestruturar o sistema energético global é urgentemente imprescindível diante de episódios como estes.

Em decorrência dos desafios que se apresentam no campo da energia, a demanda por habilidades e conhecimentos que extrapolam as áreas tradicionais de engenharia e geofísica tem se tornado cada vez mais complexa e interdisciplinar. À luz do contexto em que se insere, a economia da energia, por sua vez, é uma área científica ampla que aborda questões relacionadas à oferta e ao uso de energia nas sociedades, com o objetivo de encontrar soluções mais eficientes para o aproveitamento dos recursos energéticos. Tal como referido por Worthy (2011), outro ponto a ser considerado é que, como compartilha diversos métodos e conceitos com outras disciplinas acadêmicas, é considerada uma subdisciplina aplicada da economia.

A história mostra que há sempre uma energia de referência ou dominante que orienta as trajetórias do setor energético, podendo ter reflexos significativos na economia como um todo (COSTA; PLATES, 2005). Sob esse ponto de vista, a análise econômica das diferentes fontes de energia, como a hidráulica, solar, eólica, nuclear, carvão e gás natural, bem como a avaliação dos custos e benefícios de cada uma delas, são tópicos importantes da economia da energia. De forma equivalente, para o BID (2022), a eficiência energética, que diz respeito à capacidade de se alcançar determinado resultado com menor uso de energia, e a ideia de transição energética, se refere a mudanças substanciais na composição da matriz energética primária global, com o intuito de seguir a economia em direção a uma redução na pegada ambiental e uma sociedade de baixo teor de carbono.

Com base nas informações fornecidas até o momento, fica evidente que a economia da energia é essencial por várias razões, incluindo a disponibilidade de energia acessível e confiável, que é essencial para o crescimento econômico e o bem-estar da população. As políticas energéticas têm um impacto direto na competitividade de uma economia, influenciando os custos de produção e o acesso a diferentes fontes de energia. Outro ponto a ser considerado é que a produção e o consumo de energia têm um papel estratégico na emissão de gases de efeito estufa, tornando a economia da energia uma importante ferramenta na identificação de

medidas para reduzir essas emissões sem comprometer as necessidades energéticas da sociedade. No contexto específico deste estudo, o tema da energia exige habilidades e conhecimentos multidisciplinares, abrangendo áreas como análise econômica de fontes energéticas, eficiência energética e transição para um sistema energético mais sustentável. A economia da energia é fundamental para garantir a segurança energética de um país, prevenindo continuamente o fornecimento de energia que pode ter impactos negativos na economia e no bem-estar da população.

3.2 Vinculações de energia, fontes renováveis de energia, crescimento econômico e novas tecnologias.

3.2.1 Importância da Energia como Componente do Crescimento Econômico: Perspectiva Contextual.

Na academia, a relação entre energia e crescimento econômico é um tema amplamente estudado, sendo a literatura empírica da economia da energia responsável por investigar essa relação através da utilização de diferentes conjuntos de dados e métodos econométricos (GOZGOR et al., 2018). A complexidade dessa relação é refletida nos resultados variados obtidos, o que evidencia a necessidade de considerar vários fatores que podem influenciá-la, como políticas energéticas, mercados de energia e impactos ambientais e sociais do consumo de energia. (NOURUZI; NOURUZI, 2020).

Segundo o ponto de vista de TUGCU e TOPCU (2018), é necessário abordar esses fatores para entender a dinâmica do consumo e produção de energia e suas implicações nos padrões de consumo e investimento de empresas e consumidores. A disponibilidade adequada de energia, em termos de quantidade e qualidade, é indispensável para o funcionamento pleno da economia e, portanto, é um fator crítico a ser considerado na análise e compreensão das dinâmicas econômicas (SOYTAS; SARI, 2020).

De acordo com Timilsina (2020), foi observada uma clara relação entre o consumo de energia e indicadores planejados⁷, como o crescimento econômico e a renda per capita, com base em dados coletados em mais de 150 países. O crescimento econômico, por sua vez, é o principal fator que impulsiona o consumo de energia a longo prazo, devido ao aumento na demanda de bens e serviços que consomem energia, especialmente nos setores industrial, comercial e residencial em países em desenvolvimento (JANNUZZI et al., 2018). No entanto, fatores como preços, condições climáticas e eventos específicos também afetam o consumo de energia no curto prazo.

Outro aspecto relevante a ser considerado é que existe uma relação estreita entre o crescimento econômico e a infraestrutura de energia, que consiste no conjunto de estruturas físicas e organizacionais necessárias para a operação de uma sociedade ou empresa. A infraestrutura energética, que compreende usinas, redes de transmissão e distribuição, além de instalações de armazenamento, é a principal forma de armazenar e distribuir valor de maneira eficiente na sociedade (CHRISTESENSEN, 2019). O planejamento desse setor é um processo altamente complexo, devido à necessidade de um grande volume de recursos projetados, planos com longos prazos de vencimentos e os impactos socioambientais associados a essa atividade (JANNUZZI et al., 2018).

Portanto, o investimento e desenvolvimento dessa infraestrutura é fundamental para garantir a continuidade da oferta de energia e a estabilidade dos preços, permitindo assim o crescimento econômico. Convém destacar, que a infraestrutura de energia geralmente é caracterizada por ciclos longos de planejamento, investimento e operação, o que acarreta uma adaptação lenta às mudanças econômicas e sociais. Essa limitação é agravada pela complexidade do sistema energético, que envolve diversas variáveis interdependentes, tais como tecnologia, regulação, infraestrutura e fatores sociais. Como consequência, podem ocorrer períodos prolongados de excesso ou escassez de capacidade (ZWEIFEL, 2017).

⁷ Os indicadores planejados são medidas ou projeções antecipadas para avaliar o progresso e o desempenho de uma determinada atividade, projeto, programa ou organização em relação aos objetivos alcançados. Esses indicadores são definidos durante o processo de planejamento, como parte integrante de um plano ou estratégia, com o objetivo de monitorar o progresso em direção aos resultados esperados.

Diante desse cenário, é essencial o desenvolvimento de políticas públicas que estimulem a inovação e a flexibilidade no setor, visando mitigar os efeitos negativos dessas variações imprevisíveis na oferta e demanda de energia. A inovação envolve uma ampla gama de participantes, mas os governos têm um papel fundamental que vai muito além de simplesmente financiar pesquisa e desenvolvimento. Eles estabelecem objetivos e prioridades nacionais gerais e são vitais para determinar as expectativas do mercado, garantindo o fluxo de conhecimento, investindo em infraestrutura essencial e permitindo que grandes projetos de demonstração avancem (IEA, 2020).

São muitos os obstáculos a serem enfrentados durante as etapas de pesquisa, desenvolvimento e demonstração de uma nova tecnologia. A fim de alcançar a fase de plena efetivação de uma tecnologia renovável, é indispensável que o setor industrial esteja apto a fornecer suporte e alinhado com os objetivos estabelecidos para as ER (COSTA; PRAYES, 2005).

Portanto, a importância da inovação e avanços radicais é cada vez mais reconhecida como elementar para atingir os objetivos de diversificação. Ao invés de se concentrar apenas em tecnologias tradicionais de energia ou clima, há uma crescente compreensão de que novas formas de inovação devem ser exploradas e integradas aos objetivos climáticos. Esse processo requer o uso de tecnologias de informação e comunicação (TIC), inteligência artificial (IA), internet das coisas (IOT), nanotecnologias, biotecnologias e robótica, que são fundamentais para o progresso na luta contra as mudanças climáticas (SOVACOOOL, 2020).

A adoção de uma estratégia conjunta, como a diversificação das fontes de energia, pode ser a solução para diminuir a dependência de uma fonte de energia, garantindo maior estabilidade para o sistema energético como um todo. Neste cenário, a exploração de recursos internos, como o desenvolvimento de tecnologias alternativas, incluindo a energia solar, eólica e hidrelétrica, aparecem como opções viáveis para alcançar essa diversificação (LÖSCHEL et al., 2010).

Em suma, podemos concluir que a interdependência entre energia e crescimento econômico, demonstrada na literatura acadêmica, é permeada por complexidades e variáveis. É necessário considerar fatores de múltiplas dimensões como políticas energéticas, mercados de energia, e impactos socioambientais do consumo energético. A disponibilidade de energia adequada em termos de quantidade e qualidade é fundamental para a economia, e o crescimento econômico

é, por sua vez, um importante motor do consumo energético. A infraestrutura energética é vital para armazenar e distribuir valor de forma eficiente na sociedade, exigindo um planejamento complexo e a aplicação de grandes volumes de recursos. Se reconhece a necessidade de políticas públicas que promovam a inovação e a flexibilidade no setor energético, com o objetivo de mitigar possíveis oscilações de oferta e demanda. Em paralelo, a inovação e o desenvolvimento de tecnologias de energia renovável são fundamentais para a diversificação energética e, conseqüentemente, para a mitigação das mudanças climáticas.

3.2.2 Segurança energética: um conceito dinâmico e complexo.

O conceito de segurança energética é dinâmico e sofre mudanças de acordo com o contexto em que está inserido, o qual pode incluir o nível de desenvolvimento econômico de um país, a avaliação de riscos envolvidos, a estrutura do sistema energético em operação e a posição geopolítica do país em questão (NINA, 2020). O termo segurança energética reflete uma concepção abstrata que sugere uma intencionalidade estratégica subjacente. A ideia é que não é apenas uma preocupação detalhada, mas sim uma abordagem estratégica que envolve a garantia do abastecimento confiável, acessível e sustentável de energia para atender às necessidades da sociedade e economia. Portanto, a compreensão das dinâmicas do consumo e produção de energia é essencial para a análise econômica e tomadas de decisões estratégicas (SOYATAS; SARI, 2020). Para alcançar esse objetivo, é necessário investir na infraestrutura energética e na elaboração de políticas públicas que levem em consideração a complexidade do sistema energético e a relação entre segurança energética e crescimento econômico.

É relevante destacar que a análise das fontes energéticas se constitui em uma das tarefas mais estratégicas a serem empreendidas pelas nações, porquanto sua presença configura uma salvaguarda para a manutenção dos processos produtivos e a continuidade do suprimento interno, ensejando, assim, a delimitação das relações externas, no que diz respeito à mitigação da dependência de importações.

Levando em conta esse contexto, a IEA é reconhecida pela sua excelência técnica e pelas políticas energéticas integradas, em particular, no que diz respeito aos países que consomem energia. Conforme sugerido na literatura desenvolvida por Nina (2020, p.27), para a IEA, a segurança energética é definida como a “disponibilidade contínua de fontes de energia a preços acessíveis” Esse conceito é amplamente utilizado graças à credibilidade e base técnica estabelecida pela IEA, onde sugere que um país é considerado seguro do ponto de vista energético quando é capaz de reduzir sua vulnerabilidade em relação à interrupção do fornecimento de energia ou a flutuações abruptas nos preços do mercado (NINA, 2020).

Sob essa perspectiva, a segurança energética é fundamental para garantir a continuidade do fornecimento de energia, independentemente de possíveis interrupções ou perturbações no fornecimento. É importante destacar que essas interrupções podem ser causadas por diversos fatores, como desastres naturais, conflitos, embargos e outras questões políticas e geopolíticas.

No que tange aos desafios relacionados à segurança energética, há um leque variado de abordagens a serem adotadas, tais como políticas governamentais, acordos internacionais e tecnologias alternativas. Em relação aos papéis desempenhados pelos governos, é indiscutível que estes ainda ocupam a posição de atores dominantes em questões políticas nacionais e internacionais. Entretanto, é preciso reconhecer que a crescente complexidade da governança global, bem como a dinâmica entre as entidades subnacionais e a conectividade entre os diversos atores envolvidos, tais como empresas transnacionais e movimentos globais da sociedade civil, estão adquirindo cada vez mais importância na tomada de decisão política e na efetividade das políticas implementadas.

Nesse sentido, é importante destacar iniciativas globais, como o Acordo de Paris, as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) dos países e as Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que têm gerado cooperação tanto na esfera interna (entre governos e suas respectivas sociedades) quanto na esfera internacional (entre governos) com objetivos comuns em prol do bem-estar humano (EPE, 2020). Essas iniciativas exemplificam a crescente importância da cooperação internacional e da participação de múltiplos atores na governança global.

Para finalizar, a energia desempenha um papel fundamental no crescimento econômico, pois está diretamente relacionada à produção e ao consumo de bens e serviços. Aspectos como a oferta de energia a preços estáveis e previsíveis, o

acesso à energia, a elasticidade-preço da oferta de energia⁸, a infraestrutura energética, a segurança energética e a competitividade econômica são críticas para garantir a continuidade desse crescimento. Nesse sentido, a política energética se torna imprescindível para a promoção de uma oferta diversificada de fontes de energia, o aumento da eficiência energética, o desenvolvimento da infraestrutura energética e a garantia da segurança energética, bem como o desenvolvimento social. Para impulsionar o crescimento econômico de forma contínua e sustentável, é indispensável adotar medidas estratégicas que garantam a oferta de energia adequada e sustentável, a preços razoáveis e estáveis.

3.2.3 Energia Renovável: Um dos pilares de um futuro energético sustentável.

A noção de crescimento sustentável surge de um procedimento de análise e reanálise das conexões entre a sociedade e o ambiente. Se tratando de um processo contínuo, inúmeras estratégias foram construídas e passadas por modificações progressivas ao longo da história, almejando um equilíbrio entre as esferas sociais, econômicas e ambientais. Portanto, a estrutura econômica começa a ser reestruturada pela sustentabilidade ambiental, que surge como um parâmetro regulador e busca harmonizar as contraposições dialéticas do desenvolvimento: o meio ambiente e a expansão econômica (PEREIRA et al., 2017).

O mundo está passando por mudanças sem precedentes para mitigar os efeitos prejudiciais das mudanças climáticas (IRENA, 2022). Enquanto buscam aproveitar as imensas oportunidades econômicas, os países estão trabalhando para aumentar a diversidade e resiliência das cadeias de abastecimento de energia limpa. As principais economias estão adotando uma abordagem integrada, combinando políticas climáticas, de segurança energética e industriais (IEA, 2023).

⁸ A elasticidade-preço da oferta de energia é uma medida que quantifica a sensibilidade ou responsividade da quantidade de energia oferecida no mercado em relação às mudanças no preço dessa energia. É uma medida que reflete a capacidade de resposta da oferta de energia a variações nos preços do mercado.

Os combustíveis fósseis do mundo possuem uma quantidade limitada e, considerando a perspectiva histórica, seu uso é transitório e de curta duração. Apesar da alta dependência da sociedade desses recursos, a transição para fontes alternativas pode requerer urgência. Por essas razões, o interesse em iniciativas de apoio às fontes de ER nunca esteve tão elevado. Os limites enfrentados pelos sistemas de energia em relação à exaustão dos combustíveis fósseis e às mudanças climáticas são amplamente reconhecidos hoje em dia, o que torna necessária a transição de recursos fósseis para uma sociedade de baixo carbono. De acordo com a IEA (2023), a crescente urgência para essas transições é impulsionada por políticas energéticas e climáticas ambiciosas, progresso tecnológico e preocupações com a segurança energética, principalmente após a invasão Rússia na Ucrânia

A invasão da Ucrânia pela Rússia desencadeou a primeira crise energética global, impulsionando o desenvolvimento das energias renováveis de forma significativa. A interrupção contínua no fornecimento de combustíveis fósseis evidenciou os benefícios da segurança energética obtida por meio da geração doméstica de eletricidade renovável, levando muitos países a fortalecerem suas políticas de apoio a essas fontes de energia. Paralelamente, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis em escala global tem melhorado a competitividade da geração de energia solar fotovoltaica (PV) e eólica em relação a outras opções de combustíveis (IEA, 2023 b).

No cenário atual, é indispensável que essas questões sejam inseridas nas políticas energéticas dos países, dado que desempenham um papel relevante para garantir a sustentabilidade do sistema energético (COSTA; PRATES, 2005).

A transição para um futuro energético sustentável requer a adoção de fontes de ER, as quais são geradas a partir de recursos naturais que se renovam continuamente e, por isso, consideradas inesgotáveis do ponto de vista humano. Conforme destacado por Costa e Prates (2005), a terminologia Energia Renovável é empregada para designar uma vasta variedade de recursos energéticos que se renovam naturalmente de maneira cíclica. Tais fontes renováveis podem ser exploradas com a finalidade de produzir eletricidade, calor e combustíveis líquidos destinados ao setor de transporte. Dentre as principais fontes estão a hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, ondas e marés, sendo que tais tecnologias são

consideradas fundamentais para garantir a segurança energética e reduzir a dependência de fontes de energia fósseis.

É importante destacar que se faz necessário considerar que o nosso consumo de energia está relacionado com o desenvolvimento sustentável, uma vez que as escolhas energéticas que fazemos hoje terão um impacto significativo no meio ambiente e na disponibilidade de bens e serviços para as gerações futuras (GÜNEY, 2021). Uma economia sustentável é aquela que assegura o seu desenvolvimento social, econômico e ambiental de forma ótima e contínua, sem exaurir os recursos existentes (UDEMBA; ATOSUN, 2022). A adoção de FER contribui para a preservação dos recursos energéticos naturais, o que incentiva a adoção de práticas de consumo sustentável.

Desde a assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997⁹, a utilização de ER tem sido um foco global, levando a uma ampla expansão na produção e consumo de energias renováveis em todo o mundo. Essa abordagem impulsionou não só o crescimento econômico, mas também o desenvolvimento social. É importante destacar que o uso de fontes de ER não é limitado aos países desenvolvidos, pois os países em desenvolvimento também estão rapidamente reconhecendo o potencial dessas fontes de energia como um importante força motriz para o crescimento econômico e o desenvolvimento social.

A fim de promover o crescimento econômico de maneira sustentável, é preciso utilizar fontes de energia que não esgotem os recursos naturais e que tenham um impacto ambiental mínimo. É notável que harmonização do crescimento econômico, da oferta de energia e da redução de emissões de gases de efeito estufa e outras metas de proteção ambiental é um grande desafio para economias emergentes (ALMEIDA et al., 2016). Por essa razão, uma transformação profunda nos sistemas de energia é imprescindível para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e evitar as implicações de longo prazo das mudanças climáticas globais. Contudo, a maioria dos tomadores de decisão se preocupa mais com os efeitos imediatos e de âmbito nacional das políticas energéticas, em detrimento

⁹ O Protocolo de Kyoto se trata de um acordo internacional assinado em 1997 que estabeleceu metas obrigatórias de redução das emissões de gases de efeito estufa por parte dos países industrializados.

daqueles de longo prazo e escala global. Entre as preocupações imediatas de alcance nacional, se destaca a segurança energética.

Estabelecer padrões consistentes de segurança energética que estejam em linha com projeções realistas de crescimento econômico e que levem em conta os efeitos das mudanças climáticas requerem cálculos complexos e baseados em premissas de risco. Esses cálculos e decisões são essenciais para evitar futuras interrupções no fornecimento de energia e possíveis crises econômicas (ALMEIDA et al., 2016). Para tanto, é necessário desenvolver estudos de longo prazo e elaborar cronogramas de expansão que permitam a análise de diferentes estratégias, incluindo aspectos econômicos, tecnológicos, socioambientais e regulatórios, que não se limitem apenas ao setor elétrico, mas que também avaliem sua interface com o sistema energético (EPE, 2022).

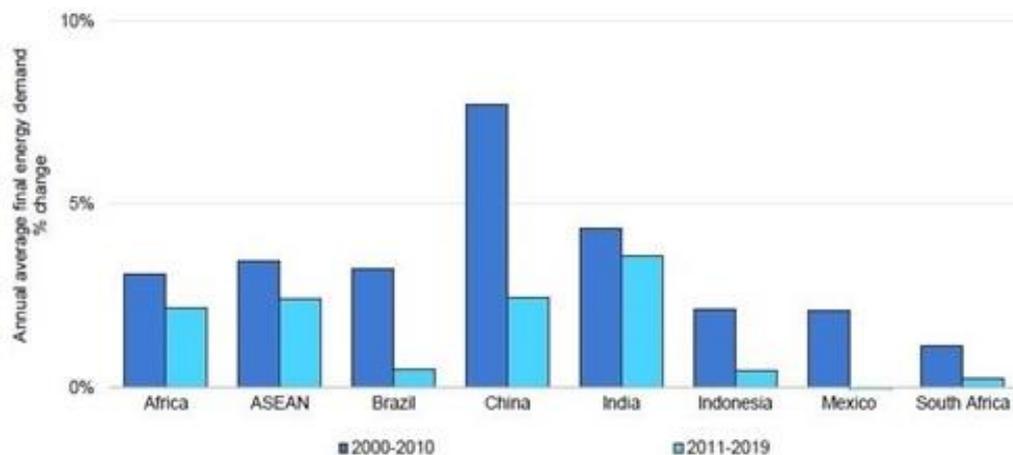
A indústria de ER está recebendo cada vez mais atenção de governos, empresas e academia em vários países e regiões, o que pode ser atribuído a muitos fatores. A recente volatilidade nos preços do petróleo e os desafios à segurança energética têm sido agravados por uma série de outras preocupações, incluindo questões de saúde, impactos econômicos, mudanças climáticas, sustentabilidade e o uso de fontes de energia fóssil. Portanto, tem havido uma mudança em direção às fontes de ER, que são capazes de atender às necessidades de energia de maneira mais limpa e sustentável.

Diante desse cenário, a ER assume um papel fundamental para suprir as demandas energéticas da sociedade. É notável o aumento significativo de sua relevância na última década, sendo inclusive a fonte de energia que mais cresce desde o final dos anos 2000 (GOZGOR et al., 2018). O motivo é que a energia renovável é limpa, inesgotável e acessível, o que a torna uma opção atraente para governos, empresas e consumidores. A utilização de fontes de ER utilizadas na matriz energética global é extremamente importante para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos para 2030 (GÜNEY, 2021). Especificamente, a parcela de FER no fornecimento total de energia primária deverá aumentar substancialmente, partindo de um patamar de 14% em 2019 para uma meta de cerca de 40% em 2030 (IRENA, 2022).

No que tange, os países que compõem os Mercados Emergentes e em Desenvolvimento (MEDs), estes representam em conjunto uma proporção significativa, cerca de 60%, da demanda mundial de energia final. Embora haja uma

desaceleração na taxa de crescimento da demanda em muitos desses países (Figura 2), é esperado que, sob as políticas regulatórias atuais, ocorra um aumento de quase 20% na demanda de energia final até 2030. Dessa forma, a participação global dos MEDs na demanda de energia será ampliada em 5%, tendo em vista que a demanda de energia nas economias avançadas tende a se manter relativamente estável (IEA, 2022).

Figura 2 - Variação percentual da demanda final média anual de energia.



Fonte: IEA – Energy Efficiency 2022 – International Energy Agency.

É importante considerar as particularidades de cada país nas políticas ambientais e energéticas, para garantir o desenvolvimento sustentável. Essa consideração requer a ponderação de diversos fatores inter-relacionados, como o crescimento econômico, a proteção ambiental e a melhoria do bem-estar social. Na academia, é amplamente aceito que o crescimento econômico deve ser harmonizado com a preservação do meio ambiente e a promoção do bem-estar social, o que é essencial para alcançar um desenvolvimento sustentável equilibrado. A rápida expansão da produção e do consumo de energia, sem planejamento adequado, pode gerar impactos ambientais negativos que podem colocar em risco o desenvolvimento econômico e social (JANNUZZI et al., 2018). Portanto, para atingir tais objetivos, é necessário um esforço colaborativo em escala global.

3.3 Energia Renovável: A chave para o futuro sustentável através das novas tecnologias.

A inovação e o desenvolvimento de tecnologias para a conversão e utilização de recursos energéticos naturais são questões essenciais para o avanço do desenvolvimento sustentável. Embora a demanda por energia seja inegável para o progresso de um país, a adoção de tecnologias voltadas para o aumento da eficiência energética e a sustentabilidade da produção garantem um desenvolvimento com impactos ambientais reduzidos, assegurando assim um equilíbrio entre o crescimento econômico e a preservação do meio ambiente (PEREIRA et al., 2017).

É imprescindível que se promova uma implementação célere e efetiva da tecnologia de energia limpa, tendo em vista o cumprimento das metas estabelecidas para o combate às alterações climáticas. A transição para fontes de ER assume um papel preponderante na busca por um futuro sustentável e, para tanto, é notória a ampla utilização de inovações tecnológicas com vistas a acelerar esse processo de transição (IEA, 2023). Para se alcançar o objetivo de emissões líquidas zero até 2050, se faz necessário acelerar a inovação em tecnologias de energia limpa. Embora boa parte da redução das emissões de dióxido de carbono possa ser alcançada até 2030 por meio das tecnologias já existentes, o caminho rumo a 2050 depende da utilização de tecnologias ainda em desenvolvimento e não plenamente aceitas, sobretudo nos setores difíceis de descarbonizar, como a indústria pesada e o transporte de longa distância (IEA, 2022, b).

Existe uma diferença entre a participação atual de fontes de ER no mundo e o nível ideal de consumo. Nesse contexto, os investimentos em fontes de energia convencionais tendem a ser maiores do que os investimentos em ER (ABOLHOSSEINI; HESHMATI, 2014). No qual reflete ainda a falta de incentivo e apoio para a expansão da produção e consumo (AQUILA et al., 2017). A dependência de combustíveis fósseis, como petróleo e gás, tem sido a principal fonte de energia para a maior parte da humanidade, mas esses recursos são finitos e sua queima libera gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global e os problemas ambientais. Por outro lado, fontes de ER, como a solar, eólica e hidrelétrica, não emitem gases de efeito estufa durante sua produção de energia.

Cabe ressaltar que o progresso de fontes de ER não se restringe ao cumprimento de responsabilidades ambientais ou mandatos regulatórios, mas busca igualmente o aperfeiçoamento de tecnologias internas, com o objetivo de diminuir eventuais necessidades de tecnologias avançadas para a geração de energia (COSTA; PRATES, 2005).

Comparada com a energia fóssil tradicional, a ER tem diferenças significativas em tecnologia teórica, custo de uso, impacto ambiental e métodos de gestão (ZHANG et al., 2021). A sua produção é uma realidade em muitos países, e ao longo dos anos, diversas estratégias têm sido propostas para incentivar o investimento nesta área (AQUILA et al., 2017). Estas incluem: subsídios, créditos fiscais, garantias de compra de energia renovável e metas de energia limpa. A implementação dessas medidas tem resultado no aumento da produção de ER e na transição para uma economia mais sustentável em todo o mundo.

Desde a década de 1960, a preocupação com o declínio das reservas mundiais de petróleo tem crescido, especialmente após a crise do petróleo de 1973. Como resultado, houve um aumento significativo nos investimentos no setor de ER, com o objetivo de desenvolver novas tecnologias e torná-las uma opção viável e atraente em comparação aos sistemas baseados em combustíveis fósseis. Esse esforço visa garantir a segurança energética e a sustentabilidade a longo prazo, bem como reduzir a dependência dos países em relação a fontes de energia voláteis ou dependentes de importação, o que pode ter um impacto negativo na economia e na segurança energética (AQUILA et al., 2017).

A utilização em larga escala de ER nos sistemas tradicionais de energia é afetada por barreiras significativas, como os custos elevados de tecnologia e a desvantagem de custo-benefício em comparação às fontes convencionais de energia (AQUILA et al., 2017). Profissionais especializados em energia frequentemente se dedicam à análise das reduções de custo de tecnologias emergentes, com o objetivo de avaliar o impacto de tais tecnologias sobre a dinâmica competitiva do setor energético em longo prazo (COSTA; PRATES, 2005). Para serem competitivas, as tecnologias renováveis devem estar em condições de igualdade com as tecnologias baseadas em combustíveis fósseis. Esse processo requer uma análise cuidadosa dos custos envolvidos em todas as fases do ciclo de vida, desde a produção até a operação e manutenção, e a avaliação dos retornos sobre o investimento (ABOLHOSSEINI; HESHMATI, 2014). Para superar essas

barreiras, é importante que haja progresso tecnológico e uma maior disseminação do uso de fontes de ER, do ponto de vista econômico (AQUILA et al., 2017).

Competir de forma efetiva em todas as partes das cadeias de suprimentos de tecnologia de fontes de ER relevantes não é uma meta realista para a maioria dos países (IEA, 2023). De acordo com o IRENA *and* CPI (2023), em 2022, o investimento global em tecnologias de transição energética, incluindo eficiência energética, atingiu um recorde histórico de US\$ 1,3 trilhão. No entanto, para manter o progresso no caminho certo, os investimentos anuais precisarão ser pelo menos quadruplicados. Em um cenário onde as fontes de ER apresentam custos comparativamente superiores aos dos combustíveis fósseis, a adoção antecipada dessas fontes no mercado se fundamenta em razões que se relacionam com os benefícios e externalidades¹⁰ positivas que essas fontes oferecem (COSTA; PRATES, 2005).

É importante verificar se as escolhas tecnológicas são adequadas para o contexto no qual estão inseridas e se possuem um grau de flexibilidade suficiente para permitir a entrada de outras tecnologias que possam ser potencialmente competitivas. Entretanto, é fundamental que o efeito de "lock-in"¹¹ seja minimizado, de modo que, caso necessário, seja possível rompê-lo com facilidade (COSTA; PRATES, 2005).

Outro ponto a ser considerado é que o progresso tecnológico é vital para a adoção e promoção de FER em qualquer nação (ALAM; MURAD, 2020). A tecnologia é uma ferramenta poderosa para aumentar a eficiência energética e para tornar a utilização de fontes de ER mais viável e acessível. Apesar do avanço tecnológico, as fontes de ER ainda figuram uma pequena parte da matriz energética global.

Para aproveitar o mercado de ER, os governos podem intervir utilizando diferentes estratégias, tanto de curto quanto de longo prazo. Os investimentos em

¹⁰ As externalidades, como impactos ambientais e sociais, podem ser mensuradas qualitativamente ou quantificadas através de custos associados. Uma das formas de atribuir esses custos é por meio de impostos ou taxas sobre as emissões de gases poluentes, que são suportadas pelas empresas geradoras de energia elétrica. Esse custo extra pode influenciar no preço da eletricidade gerada, levando em conta a tecnologia e a fonte energética utilizada oferta (JANNUZZI et al., 2018)

¹¹ O efeito lock-in é um conceito que se refere à situação em que uma determinada tecnologia, produto ou sistema se torna dominante em um mercado ou setor, tornando difícil ou custoso para outras alternativas competirem ou serem adotadas. O efeito lock-in pode ocorrer devido a diversos fatores, como economias de escala, redes de usuários, regulamentações ou barreiras tecnológicas, o que pode resultar em uma persistência ou "travamento" de determinada opção, mesmo que outras possam ser mais eficientes ou autônomas. O efeito lock-in pode ter projeções em termos de inovação, concorrência, sustentabilidade e transições tecnológicas.

estratégias de curto prazo são esgotados após o estabelecimento da política, enquanto os investimentos em estratégias de longo prazo continuam após a implementação da política, já que há a criação de mercado (AQUILA et al., 2017). Nesse sentido, é possível observar os avanços tecnológicos refletidos nos registros de patentes, que oferecem insights interessantes sobre as direções tomadas pelas tecnologias de ER. A relação entre o avanço tecnológico e o uso de ER é complexa e ainda está sendo explorada em profundidade, no entanto, é cada vez mais claro que o progresso tecnológico desempenha um papel importante na promoção do uso de ER e na transição para uma economia mais sustentável (ALAM; MURAD, 2020).

Existe uma diferença entre a participação atual de ER no mundo e o nível ideal de consumo. Nesse direcionamento, os investimentos em fontes de energia convencionais tendem a ser maiores do que os investimentos em ER (ABOLHOSSEINI; HESHMATI, 2014). No qual reflete ainda a falta de incentivo e apoio para a expansão da produção e consumo de ER em alguns países (AQUILA et al., 2017). À medida que o tempo passa, se espera que a participação das fontes de ER no mercado global aumente, concomitantemente pelo crescimento dos investimentos nessas fontes.

Tão quanto, é importante que haja um esforço global para conscientizar a população sobre os benefícios das fontes de ER, tanto em termos ambientais quanto econômicos. Para que esse esforço seja efetivo, é necessário que haja uma comunicação clara e eficaz sobre as vantagens das tecnologias renováveis e a importância da transição energética para um futuro sustentável. Desse modo, a conscientização pública pode levar a uma demanda maior por fontes de ER, o que, por sua vez, pode aumentar a competição com as tecnologias baseadas em combustíveis fósseis e incentivar mais investimentos em fontes de ER.

Em suma, investir em ER é uma escolha significativa por diversos motivos. Por um lado, a tecnologia pode minimizar os impactos ambientais, reduzindo o uso de matérias primas e o desperdício de recursos. No entanto, a transição para uma economia mais sustentável depende de diversos fatores, como a viabilidade econômica das tecnologias renováveis, políticas governamentais e os padrões de consumo e produção. Portanto, é imprescindível abordar esses fatores de forma equilibrada e integrada para garantir o sucesso da transição. Igualmente, a adoção de fontes de ER tem a vantagem de ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a dependência de combustíveis fósseis e garantir a segurança energética.

4 PERSPECTIVAS DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO: AVALIAÇÃO HOLÍSTICA DA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL COM ÊNFASE NAS FONTES DE ENERGIA HÍDRICA, EÓLICA E SOLAR.

A atenção global, cada vez mais, volta sua atenção para práticas inovadoras e ecologicamente responsáveis, exigindo medidas que beneficiam não somente as nacionalmente, mas também o globo terrestre e a humanidade como um todo (TAKATA, et al., 2022). A sustentabilidade econômica de um país está diretamente associada à capacidade de prover de forma segura, competitiva e ambientalmente sustentável os insumos essenciais para o desenvolvimento de sua produção, dentre eles a energia (PEREIRA et al., 2017).

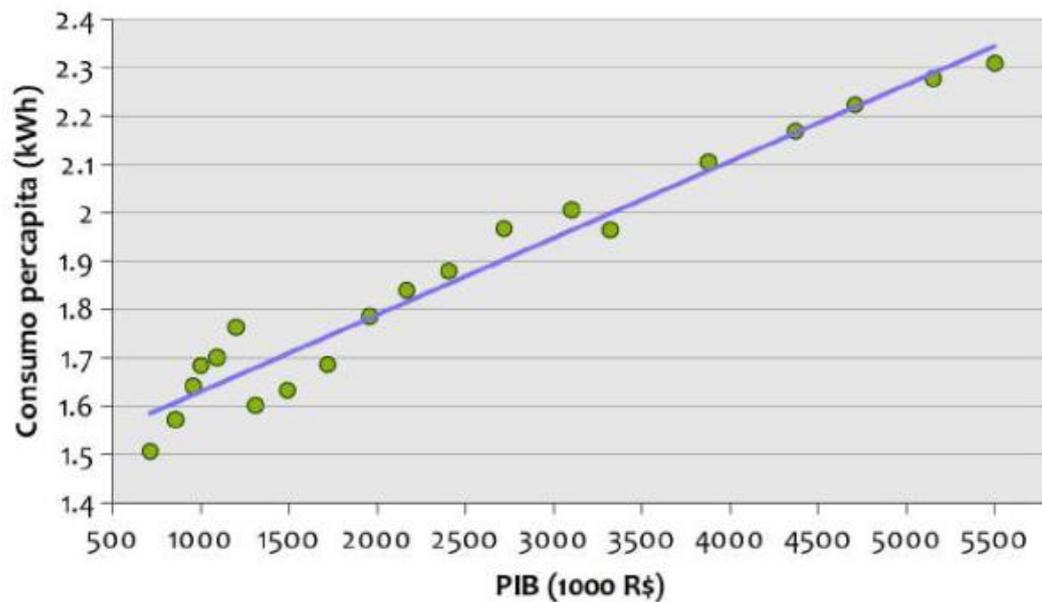
Diante desse panorama, o Brasil tem o potencial para assumir um papel de destaque e liderança mundial na busca pelo incremento das fontes de energia limpa, sustentável e competitiva. O país já possui uma matriz energética satisfatória e relativamente limpa, com grande parte da eletricidade gerada a partir de hidrelétricas. No entanto, possui potencial considerável para a expansão de outras fontes de ER, como a energia eólica e solar. Com políticas adequadas, o país poderia se posicionar como líder no campo da energia sustentável, beneficiando tanto a economia nacional quanto o meio ambiente global.

O crescimento econômico no Brasil resulta em uma demanda cada vez maior por energia. O rendimento da renda de parte significativa da população tem contribuído para melhorar a qualidade de vida, permitindo o acesso a serviços básicos como habitação, saneamento e transporte. A eletrificação rural também teve um impacto relevante, com a inclusão de milhões de domicílios residenciais ao sistema elétrico. Em decorrência dessa situação, o consumo de energia per capita, especialmente elétrico, tem evoluído em consonância com o Produto Interno Bruto (PIB) (Figura 3), aumentando a intensidade energética da economia brasileira em cerca de 2% ao ano (PEREIRA et al., 2017).

No que tange a intensidade energética, se refere a uma medida do consumo de energia em relação à produção econômica. Se a intensidade energética está aumentando, essa tendência indica que o Brasil está apresentando um maior consumo de energia para cada unidade de Produto Interno Bruto (PIB) gerada. No contexto de sustentabilidade, essa tendência pode ser motivo de preocupação, uma

vez que sugere que o país pode estar enfrentando uma menor eficiência energética. Portanto, é de fundamental importância a integração de políticas voltadas para a eficiência energética, visando garantir que o crescimento econômico seja sustentável e que o uso de energia seja o mais eficiente possível. Uma abordagem estratégica nesse sentido pode envolver a implementação de incentivos para a adoção de tecnologias de consumo energético mais eficientes, como lâmpadas de LED, eletrodomésticos com alta eficiência energética e veículos elétricos. Tais medidas podem contribuir para a redução da intensidade energética do país, promovendo assim uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos disponíveis.

Figura 3 - Variação do consumo de energia versus Produto Interno.
Compilado de EPE (2015) e IBGE (2017).

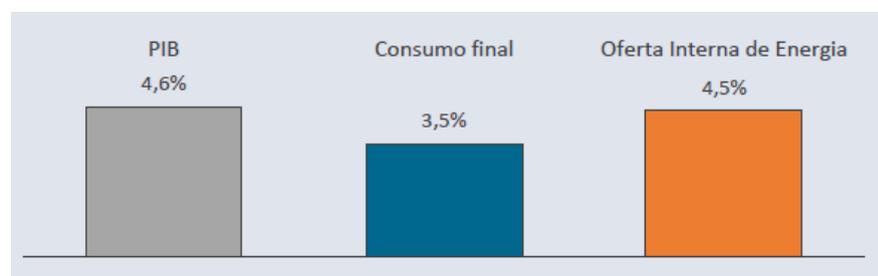


Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar – INPE, 2017.

O Brasil tem o privilégio de contar com diversos recursos naturais que permitem a expansão de sua matriz elétrica de forma sustentável. A água, o sol, o vento e a biomassa apresentam uma complementaridade única que possibilita uma geração de energia elétrica competitiva e confiável. Como indicado por Nascimento et al., (2021), o setor elétrico desempenha um papel fundamental no crescimento econômico, uma vez que o fornecimento de energia precisa acompanhar o aumento da demanda relacionada ao crescimento do Produto Interno Bruto.

De acordo com dados recentes, o país apresentou um aumento de 4,5% na sua oferta interna de energia em 2021, em comparação ao período anterior (Figura 4). Essa evidência estatística aponta para uma tendência de crescimento significativo no setor energético nacional, indicando um progresso notável no abastecimento de energia interna no país. Essa informação é de significativa importância para a compreensão e análise do panorama energético brasileiro, oferecendo uma base sólida para estudos e reflexões adicionais relacionadas à política energética, desenvolvimento sustentável e projeções futuras no campo da energia.

Figura 4 - A Oferta Interna de Energia no Brasil registrou, em 2021, um acréscimo de 4,5% em relação ao ano anterior.



Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – (EPE, 2022 b).

Com efeito, é importante destacar que o país possui uma vasta extensão geográfica, abrangendo uma distribuição heterogênea de recursos energéticos, tanto renováveis quanto não renováveis. No entanto, a alocação desses recursos entre as diferentes regiões apresenta disparidades, assim como o nível de desenvolvimento econômico de cada uma delas. No que se refere a segurança energética é um elemento prioritário para a estratégia nacional de desenvolvimento. Portanto, se torna indispensável garantir um suprimento confiável e sustentável de energia para atender às necessidades crescentes da economia, bem como para apoiar o progresso socioeconômico e promover a competitividade do país no cenário global.

Desde o século passado, as hidrelétricas têm assumido uma posição de destaque no atendimento às crescentes necessidades de energia elétrica no país, com a busca pela utilização do vasto potencial hidrelétrico e com uma participação minoritária em geração termelétrica baseada em combustíveis fósseis. Contudo, no

século XXI, se tem observado que o desenvolvimento do potencial hidrelétrico¹² ainda não explorado tem apresentado desafios crescentes, enquanto novas fontes e tecnologias têm surgido como alternativas competitivas e renováveis. De acordo com a EPE (2022), estudos de planejamento de longo prazo para a expansão da oferta de energia elétrica têm estabelecido uma estratégia que busca a expansão de diversas fontes geradoras, visando atender a demanda futura de maneira econômica, confiável e sustentável.

Com base nas informações que foram apresentadas até o momento, é possível afirmar que o Brasil tem desempenhado um papel de destaque na área energética, sendo citado como exemplo mundial no seu parque hidrelétrico, na crescente exploração da energia eólica e energia solar fotovoltaica, no seu sistema de transmissão de energia elétrica extenso e integrado e, especialmente, na renovabilidade de sua matriz energética e na produção de energia elétrica. O país é reconhecido mundialmente como um importante ator no que tange à produção energética e ambientalmente sustentável. Essa posição não se deve apenas à riqueza em alternativas de produção de energia provenientes de diversas fontes disponíveis no país, mas também à oferta abundante de matéria-prima e à capacidade de produção em larga escala, o que o torna um exemplo para diversas nações.

4.1 Recursos energéticos no Brasil: análise da matriz elétrica nacional

A utilização de fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sido destacada como uma premissa fundamental para a consecução das metas climáticas em várias economias. De acordo com essa perspectiva, o CEBRI (2021), ressalta que o setor elétrico exerce um papel central no processo de transição energética, uma vez que a descarbonização dos segmentos de consumo passa, necessariamente, pela geração de eletricidade limpa.

¹² O termo "potencial hidrelétrico" se refere à capacidade de aproveitamento técnico e econômico da energia hidrelétrica nas condições atuais de tecnologia (EPE, 2021 - BEN).

Portanto, é razoável inferir que, o setor elétrico é central na transição energética, já que a geração de eletricidade limpa é um pré-requisito para a descarbonização de diferentes segmentos de consumo. Segmentos como o setor de transportes, onde veículos elétricos alimentados por energia renovável poderiam substituir veículos movidos a combustíveis fósseis, e indústria, onde os processos produzidos podem ser eletrificados para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, se enquadram nessa descrição. Nesse sentido, a eletrificação dos processos produtivos e dos meios de transporte, associada à produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, se torna, portanto, uma condição fundamental para a efetivação da transição energética.

Levando em conta as perspectivas que se apresentam, a eletricidade é vista como um serviço público de vital importância apoiado na sociedade moderna. Esta consideração se dá em virtude do papel fundamental que a eletricidade desempenha no funcionamento cotidiano de diversas esferas da sociedade, desde residências e instituições de ensino, até hospitais, empresas e infraestruturas. Se observa a dependência da eletricidade em inúmeras atividades: iluminação, eletrodomésticos, sistemas de aquecimento e automóveis, computadores, acesso à internet, recarga de dispositivos móveis, entre outros. Na ausência de eletricidade, a maioria desses componentes essenciais da vida moderna se tornaria inoperante, ressaltando, assim, a essencialidade deste serviço público.

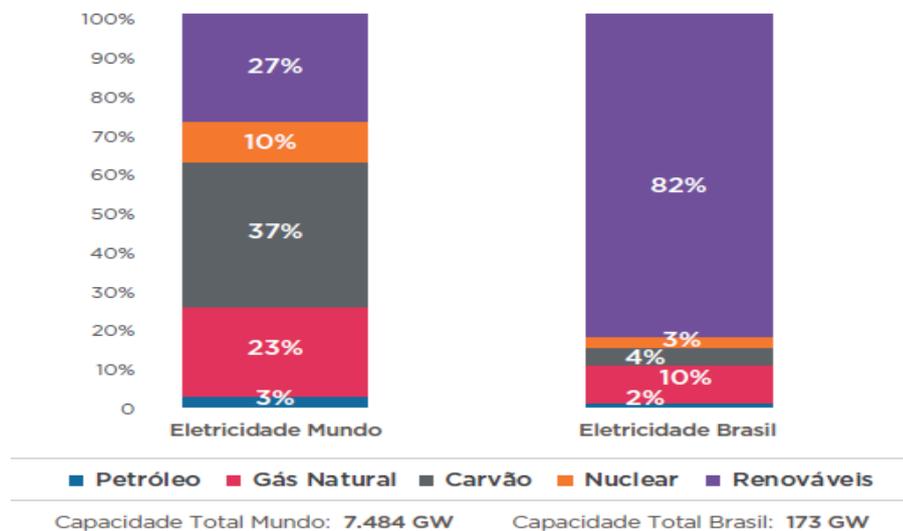
Para avançar na análise, a garantia da oferta de eletricidade é considerada um serviço público fundamental para a sociedade moderna. A extensão desse serviço para toda a população é uma parte essencial do planejamento da infraestrutura energética (JANNUZZI et al., 2018). É preciso entender que garantir o acesso universal à eletricidade não implica apenas na viabilização do funcionamento das múltiplas esferas da vida contemporânea, mas também na promoção da equidade e inclusão social. Concluindo, a eletricidade, sob a perspectiva de um serviço público fundamental, desempenha um papel crítico na sociedade moderna, tornando o planejamento cuidadoso de sua distribuição um desafio primordial para o setor de infraestrutura energética.

Não se pode deixar de frisar que a atual matriz elétrica brasileira tem se destacado por sua adaptação às demandas da descarbonização em outros setores da economia, proporcionando algumas vantagens em uma economia de baixo carbono. No qual a descarbonização é um aspecto essencial da transição

energética. Se refere à redução de emissões de carbono na geração de eletricidade. Essa descarbonização é realizada substituindo fontes de energia que emitem carbono, como o carvão, por fontes que emitem menos ou nenhum carbono, como a energia solar ou eólica.

Diferentemente de outros países que buscam reduzir a geração por carvão, o Brasil já possui uma matriz com 82% de fontes renováveis, como hidrelétricas, eólicas e solares (Figura 5). Essa condição permite ao país uma posição privilegiada para liderar a transição energética global e se tornar referência na produção de energia limpa e sustentável.

Figura 5 - Matrizes Elétricas (2019).



Fonte: Centro Brasileiro de Relações Internacionais – CEBRI. Tendências e Incertezas da Transição Energética no caso brasileiro – 2021.

Neste cenário, se observa que o setor de energia elétrica no país se baseia fortemente em fontes de ER, mas o país também possui uma variedade de recursos energéticos, incluindo fontes não renováveis (Tabela 1), em quantidade suficiente para suprir a demanda elétrica projetada até o ano de 2050 (EPE, 2022). De acordo com as informações contidas no relatório anual da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico)¹³, ratifica que a maior parte, ou seja, 82% da matriz energética do

¹³ O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), tem como missão garantir o suprimento de energia no país, com qualidade e equilíbrio entre segurança e custo global da operação (ONS, 2022).

Brasil é composta por fontes de ER. Existe uma complementaridade significativa entre o potencial de energia eólica, solar e hidrelétrica, que pode ser explorado de forma integrada.

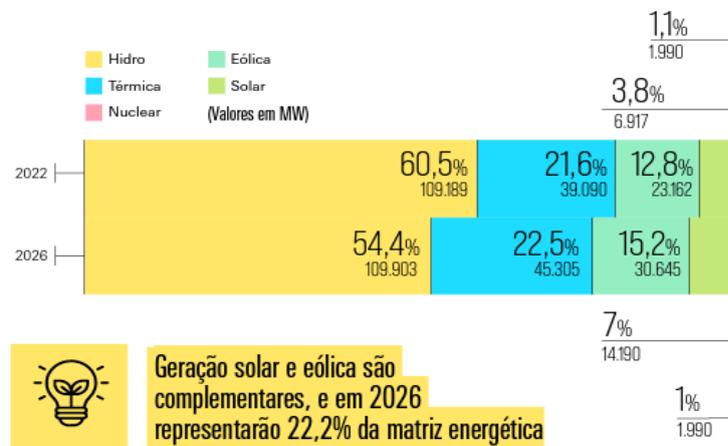
Tabela 1 - Fontes de Geração de Eletricidade por Recursos Energéticos.

Ano	Geração de Eletricidade por Fonte/ GWh									
	Carvão	Diesel	Gás Natural	Biodiesel	Nuclear	Hidro	Vento	Outras Fontes	Solar PV	Desperdício
1990	4.754	4.937	326	3.859	2.237	206.708	-	-	-	-
1995	5.522	7.501	560	5.594	2.519	253.905	-	-	-	-
2000	11.006	15.169	4.068	7.844	6.046	304.403	2	372	-	-
2005	10.742	11.678	18.812	13.591	9.855	337.457	93	805	-	-
2010	11.338	16.065	36.475	31.463	14.523	403.289	2.177	383	-	-
2015	27.046	28.696	79.490	49.672	14.734	359.743	21.626	390	59	32
2020	17.539	10.736	53.464	58.742	14.053	396.327	57.051	268	10.750	2.269

Fonte: O Autor, os dados são baseados nas informações divulgadas da IEA World Energy Balances 2022.

Na análise da Figura 6, é possível constatar uma predominância significativa da geração hidrelétrica na matriz energética, correspondendo a 60,5% da totalidade ao término do ano de 2022. Este dado reafirma o papel dominante da energia hidrelétrica no conjunto de fontes energéticas do país, reflexo de um cenário hidrológico favorável e de décadas de investimento na infraestrutura de geração de energia a partir de recursos hídricos. Entretanto, um aspecto relevante que emerge dessa análise, é o crescimento contínuo na participação das fontes solar e eólica na matriz energética. Esta tendência ascendente na produção de energia a partir dessas fontes renováveis é um indicativo do comprometimento progressivo do país em diversificar suas fontes de energia e reduzir sua dependência de combustíveis fósseis.

Figura 6 - Matriz energética brasileira e capacidade instalada no SIN, por fonte.



Fonte: Relatório anual - ONS 2022.

Dadas estas condições, em 2022, a contribuição conjunta da geração solar e eólica para a matriz energética foi de 16,6%. Projeções apontam que esta percentagem deve experimentar uma expansão considerável nos próximos anos, esperando-se que alcance a marca de 22,2% em 2026. Este aumento representativo sinaliza a consolidação da geração solar e eólica como componentes vitais da matriz energética, corroborando o papel fundamental destas fontes de energia na transição para mais sustentável e ambientalmente responsável.

Esses dados evidenciam a proteção das fontes renováveis na matriz energética brasileira, com a energia hidrelétrica liderando como a principal fonte de geração de eletricidade, seguida pela contribuição crescente da energia eólica e energia solar. Caracterizando assim, a forte presença de fontes renováveis, colocando o Brasil em posição de destaque na transição energética global. O país surge como uma nação preparada para ser um modelo de produção de energia sustentável, principalmente devido à sua expressiva utilização de hidrelétricas, eólicas e solares. A capacidade do país de suprir sua demanda energética até 2050, inclusive com fontes não renováveis, sugere uma diversidade energética saudável, essencial para a estabilidade e autonomia do setor.

Com o objetivo de garantir a confiabilidade da operação elétrica, em conformidade com os padrões de qualidade desejados, é necessário combinar a expansão de fontes de ER intermitente, como eólica e solar, com outras fontes que possuam capacidade de resposta rápida às variações dessas fontes, tais como

usinas hidrelétricas e termelétricas a gás natural em ciclo simples¹⁴ (EPE, 2020). A energia solar fotovoltaica apresenta potencial para se tornar economicamente viável em um futuro próximo, em linha com a recente trajetória da geração de energia eólica. No entanto, a integração mais ampla dessas fontes no sistema elétrico requer o desenvolvimento de tecnologias adicionais que podem mitigar os desafios associados à sua intermitência e variabilidade inerentes.

O potencial de integração entre energia eólica, solar e hidrelétrica, também apontado, poderia aumentar a eficiência da produção energética e melhorar a gestão de recursos. O aumento previsto na participação de energia solar e eólica no total da geração reforça a tendência de maior uso de fontes limpas com as demandas ambientais contemporâneas.

4.2 A dependência da hidrelétrica na matriz elétrica brasileira: impactos e soluções

Embora a dependência em relação à geração hidrelétrica tenha sido gradualmente reduzida ao longo do tempo, a matriz elétrica brasileira ainda é predominantemente composta por essa fonte (BID, 2022). Cabe ressaltar que a matriz elétrica¹⁵ se destaca por ser ainda mais predominantemente composta por fontes renováveis do que em comparação da matriz energética¹⁶ (EPE, 2021), que engloba todas as fontes de energia utilizadas em diversas atividades de energia, não apenas na produção de eletricidade. Esse aspecto ocorre porque a produção de eletricidade no país é fortemente baseada em fontes renováveis, enquanto

¹⁴ O termo "gás natural em ciclo simples" se refere a um tipo de ciclo de geração de energia em que o gás natural é utilizado como combustível. Nesse ciclo, o gás natural é queimado em uma turbina a gás, gerando energia mecânica que é então convertida em eletricidade por meio de um gerador. Esse processo é chamado de ciclo simples porque a energia térmica gerada durante a combustão não é aproveitada de forma adicional para a produção de eletricidade, resultando em uma eficiência menor em comparação com outros ciclos mais avançados, como o ciclo combinado.

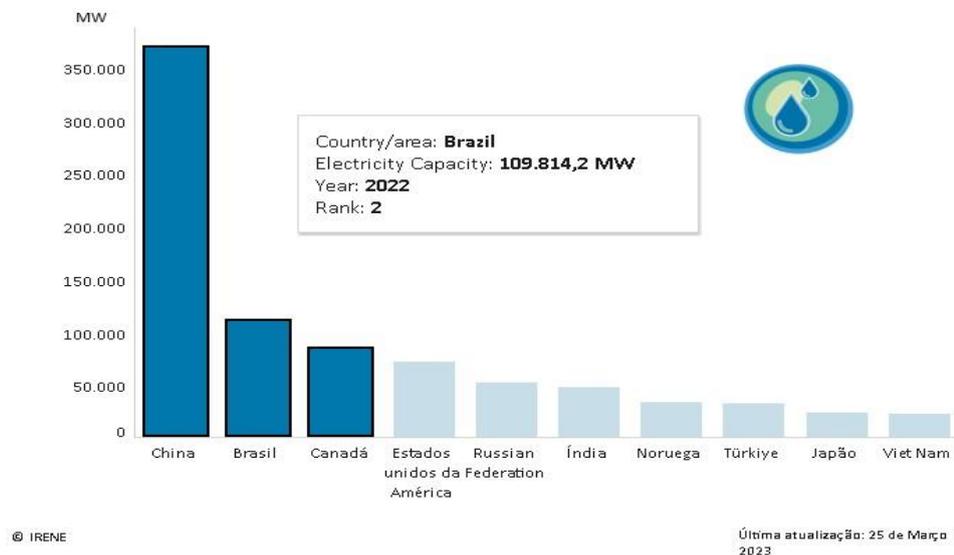
¹⁵ Matriz elétrica é a combinação de diferentes fontes de geração de eletricidade.

¹⁶ Matriz energética é a composição das diferentes fontes de energia utilizadas, incluindo fontes como petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear, hidrelétrica, eólica, solar, biomassa, entre outras.

outras atividades motivacionais, como o transporte e a indústria, ainda são altamente dependentes de combustíveis fósseis.

Ainda que a energia hidrelétrica tenha mantido sua posição como a fonte predominante de ER globalmente no ano de 2022, com um incremento de capacidade de 9%, predominantemente liderado por China, Brasil e Canadá, conforme pode ser observado na (Figura 7), o Brasil, em particular, se confronta com obstáculos significativos em relação à expansão de sua capacidade hidrelétrica.

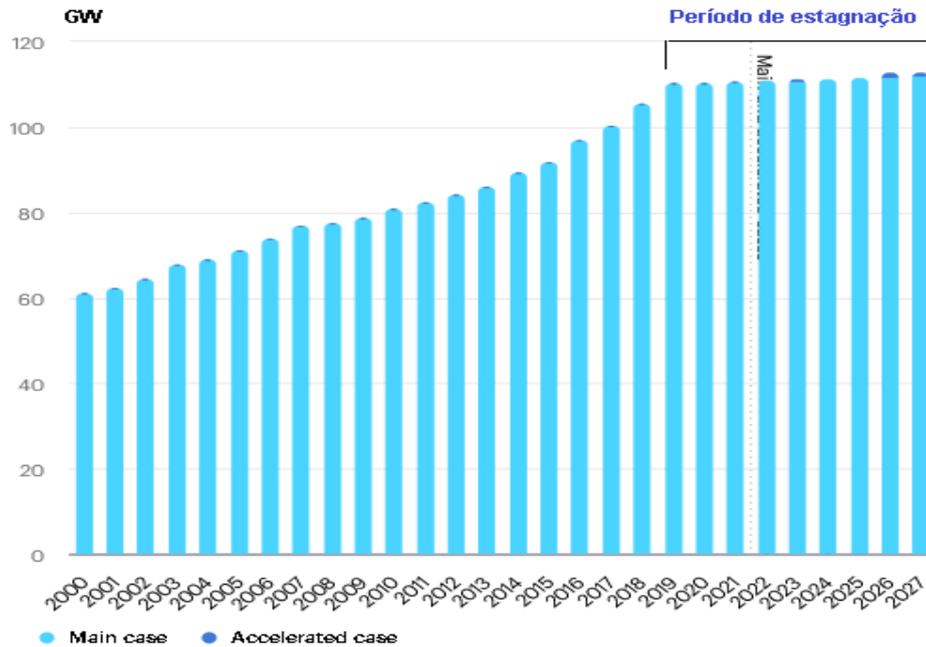
Figura 7 - Capacidade de energia instalada - 2022_IRENA



Fonte: IRENA - <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>.

Com base no Gráfico 1, é evidente que este país da América do Sul está navegando por um mar de desafios em seu caminho para o crescimento do setor hidrelétrico. Uma das principais dificuldades reside na limitação de locais viáveis economicamente para a construção de novas usinas hidrelétricas. A maior parte dos locais de alta produtividade já foram explorados e os remanescentes apresentam desafios econômicos, técnicos e logísticos que tornam seus desenvolvimentos mais complexos e custosos.

Gráfico 1 - Capacidade hidrelétrica, Brasil, 2000-2027.



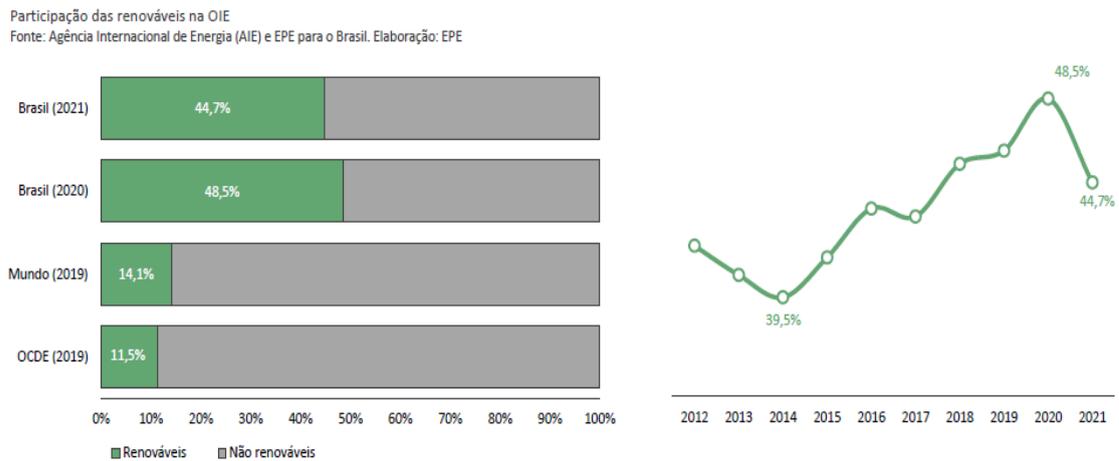
Fonte: IEA, Renewables Data Explorer, link: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer> acessado: 15/05/2023.

Tendo em vista essas considerações, os impactos socioambientais decorrentes da implantação de usinas hidrelétricas são atualmente o principal desafio para o desenvolvimento do potencial ainda não explorado, sobretudo na região amazônica (EPE, 2022). Nesse contexto, a construção de hidrelétricas pode gerar mudanças na estrutura econômica e social das regiões protegidas, muitas vezes desconsiderando a participação das comunidades locais no processo decisório. Os executivos responsáveis pela construção de hidrelétricas e as autoridades governamentais devem levar em consideração os processos socioambientais das obras e implementar medidas de mitigação e compensação, além de aprimorar os processos de consulta e participação das comunidades locais. Tais iniciativas são essenciais para minimizar os fatores negativos decorrentes da implantação desses empreendimentos, preservar o meio ambiente e garantir o desenvolvimento sustentável das regiões protegidas.

No entanto, a expansão da oferta hidrelétrica não será capaz de acompanhar o ritmo de crescimento da demanda por energia ao longo das próximas décadas, o que significa que a participação proporcional das hidrelétricas na matriz energética brasileira irá diminuir gradualmente (NINA, 2020). De acordo com o Relatório

Síntese do Balanço Energético Nacional 2022, a presença das fontes renováveis na matriz energética no ano de 2021(Figura 8), foi impactada pela redução da disponibilidade de energia hidráulica ocasionada pela escassez hídrica e pelo acionamento das usinas termoelétricas.

Figura 8 - Queda da oferta de energia hidráulica na participação de renováveis na matriz energética no ano 2021.

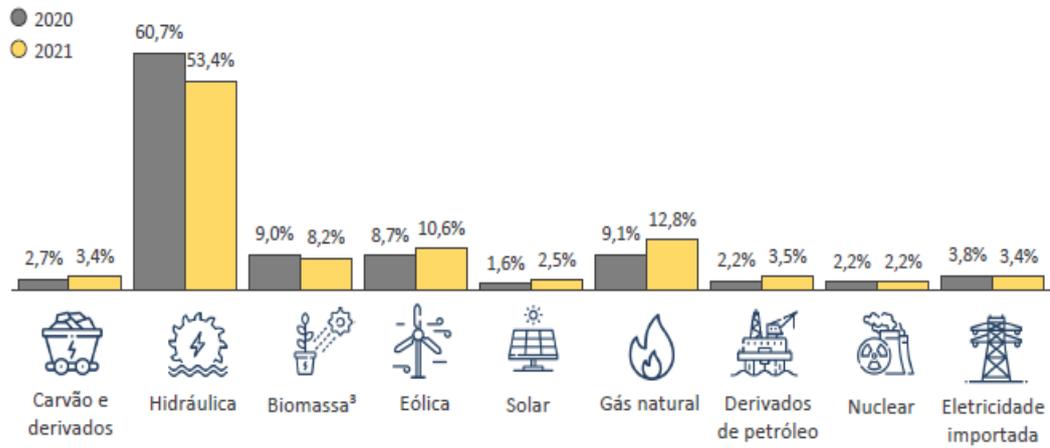


Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – EPE.

Quanto ao recurso estratégico de mobilizar usinas termoelétricas durante períodos de escassez na produção hidrelétrica, essa condição destaca a necessidade emergente de aperfeiçoamento nas tecnologias de armazenamento de energia. Este aprimoramento possibilitaria a retenção do excedente de energia gerado durante momentos de produção abundante de energia renovável, para posterior utilização quando a produção se encontrar reduzida.

Tais episódios de escassez, inevitavelmente, geram alterações consideráveis na composição da matriz elétrica brasileira, conforme evidenciado na (Figura 9).

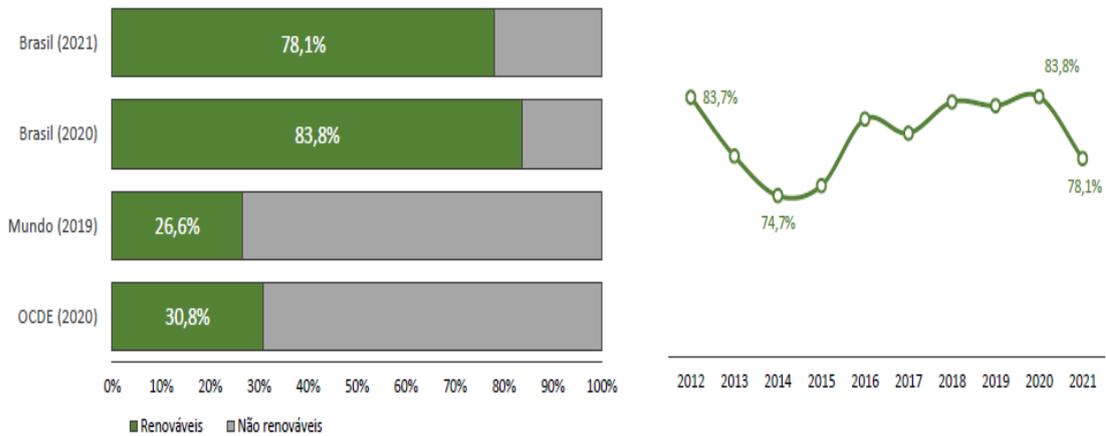
Figura 9- Quadro da mudança na matriz elétrica em decorrência da escassez hídrica ocorrido ao longo do ano de 2021.



Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – EPE.

Especificamente, essas alterações se manifestam em um declínio de 5,7% na participação de ER na matriz energética, culminando em um índice de renovabilidade de 78,1% como retratado na (Figura 10).

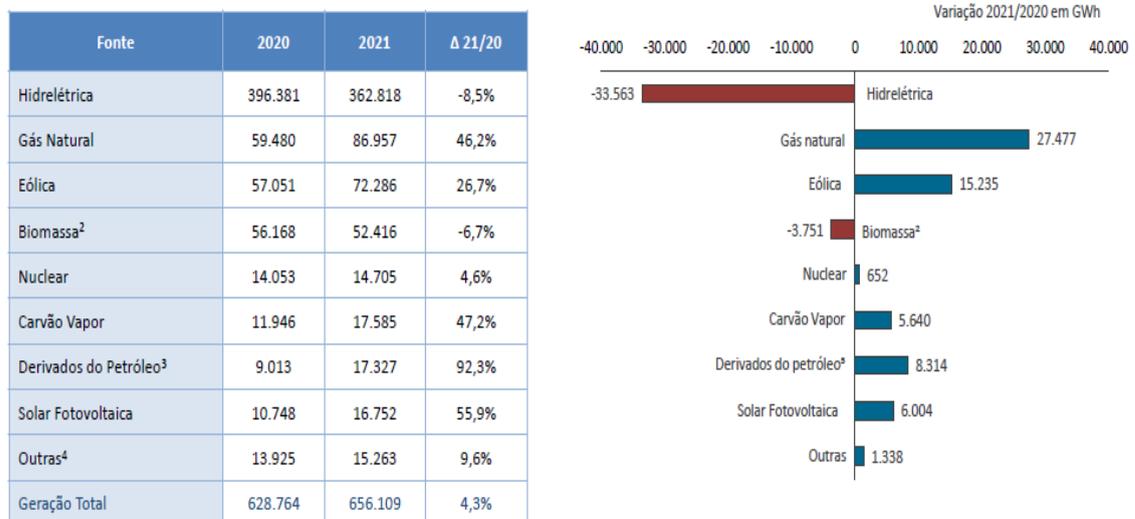
Figura 10 - Movimento de queda da oferta hidráulica.



Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – EPE.

Ao examinar a produção de energia elétrica (GWh)¹⁷, fica evidente a presença desses fatores combinados que resultaram na diminuição da participação das fontes renováveis na matriz elétrica (Figura 11). O declínio na participação da energia hidrelétrica na matriz energética também se evidencia o aumento na demanda por energias não renováveis, a menos que outras fontes de energia renovável possam ser expandidas para preencher uma lacuna.

Figura 11 - Geração elétrica (GWh) em 2021.



Fonte: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – EPE.

Esses dados explicam a importância crítica do contínuo desenvolvimento e implementação de tecnologias de armazenamento de energia eficientes e confiáveis, capazes de equilibrar a produção de energia renovável em momentos de excesso e escassez, demonstrando a necessidade de diversificar ainda mais as fontes de ER do país, para não depender fortemente de um único recurso, neste caso, a água. A implementação dessa estratégia pode implicar em investimentos

¹⁷ O símbolo "GWh" representa giga watt-hora, uma unidade de medida de energia. Um giga watt-hora equivale a um bilhão de watts de potência utilizada durante uma hora. É comumente utilizado para medir a quantidade de eletricidade gerada, consumida ou armazenada em larga escala. É uma unidade de medida amplamente utilizada no setor de energia para representar grandes corpos de energia.

mais robustos em energia eólica e solar, que não sofram tanto impacto em períodos de escassez hídrica.

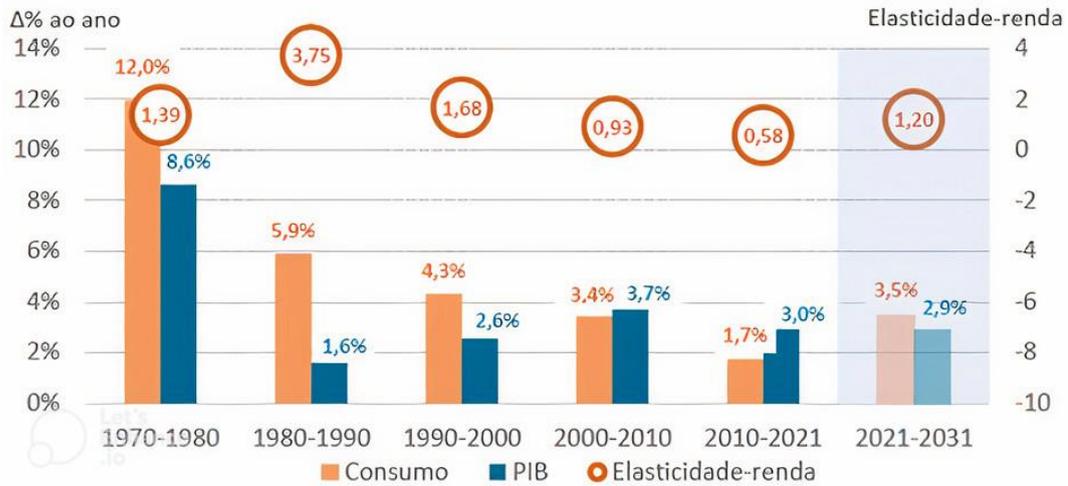
Contudo, essa circunstância não implica em uma diminuição da importância das hidrelétricas. Ao contrário, o complexo hidrelétrico existente, com seus reservatórios de água de grande capacidade e sua interconexão a um sistema de transmissão interligando os subsistemas nacionais, continua sendo um ativo de grande valor para a geração do abastecimento de energia elétrica no país, se constituindo em um sistema interligado de geração e transmissão de dimensão continental, coordenada de forma centralizada.

4.3 Eletrificação em alta: movida para a sustentabilidade e a segurança energética

Questões referentes à segurança energética e às mudanças climáticas têm provocado os governos de diferentes países, entre eles o Brasil, a adotarem políticas energéticas que objetivam incentivar a eficiência energética, promover a diversificação da matriz energética e ampliar a participação de ER na geração de energia elétrica.

De acordo com projeções do Ministério de Minas e Energia para os próximos dez anos, se espera que haja uma tendência de aumento na eletrificação do consumo de energia. A expectativa é de que a demanda total por eletricidade aumente a um ritmo superior ao do crescimento econômico, resultando em uma elasticidade-renda de 1,20, conforme ilustrado na Figura 12. Este indicador sugere que, na medida em que ocorre uma elevação na renda dos consumidores, a demanda por eletricidade também aumentará em uma proporção maior do que o aumento da renda.

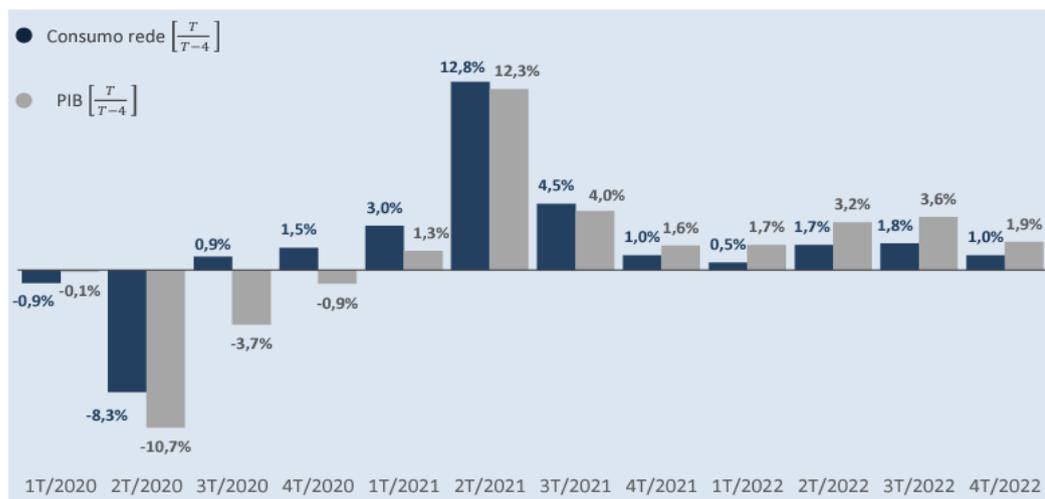
Figura 12 - Elasticidade-renda da demanda de eletricidade: Histórico x Projeção.



Fonte: MME - Plano Decenal de Expansão de Energia 2031.

Durante o último trimestre de 2022, houve um aumento de 1,0% no consumo de eletricidade em comparação com o mesmo período do ano anterior. conforme apresentado na Figura 13, nesse mesmo trimestre, a atividade econômica apresentou um crescimento mais robusto (+1,9%) em relação ao consumo de eletricidade.

Figura 13 - Consumo de eletricidade na rede vs. PIB.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Boletim Trimestral de Consumo de Eletricidade, referente ao ano de 2022. (EPE, 2022 c).

No quarto trimestre de 2022, as tendências regionais no consumo de energia elétrica apresentaram variações significativas: a região Norte (+5,7%) liderou com

o maior aumento, enquanto o Nordeste (-2,8%) foi a única região a registrar uma queda. Apesar do Sudeste (+2,5%) ter apresentado a segunda maior taxa, houve uma desaceleração no crescimento quando comparado com os dois trimestres anteriores. Da mesma forma, tanto o Centro-Oeste (+1,6%) quanto o Sul (+1,17%) mostraram incrementos no consumo, porém com taxas de crescimento menores em comparação aos respectivos trimestres imediatamente anteriores (EPE, 2022 c).

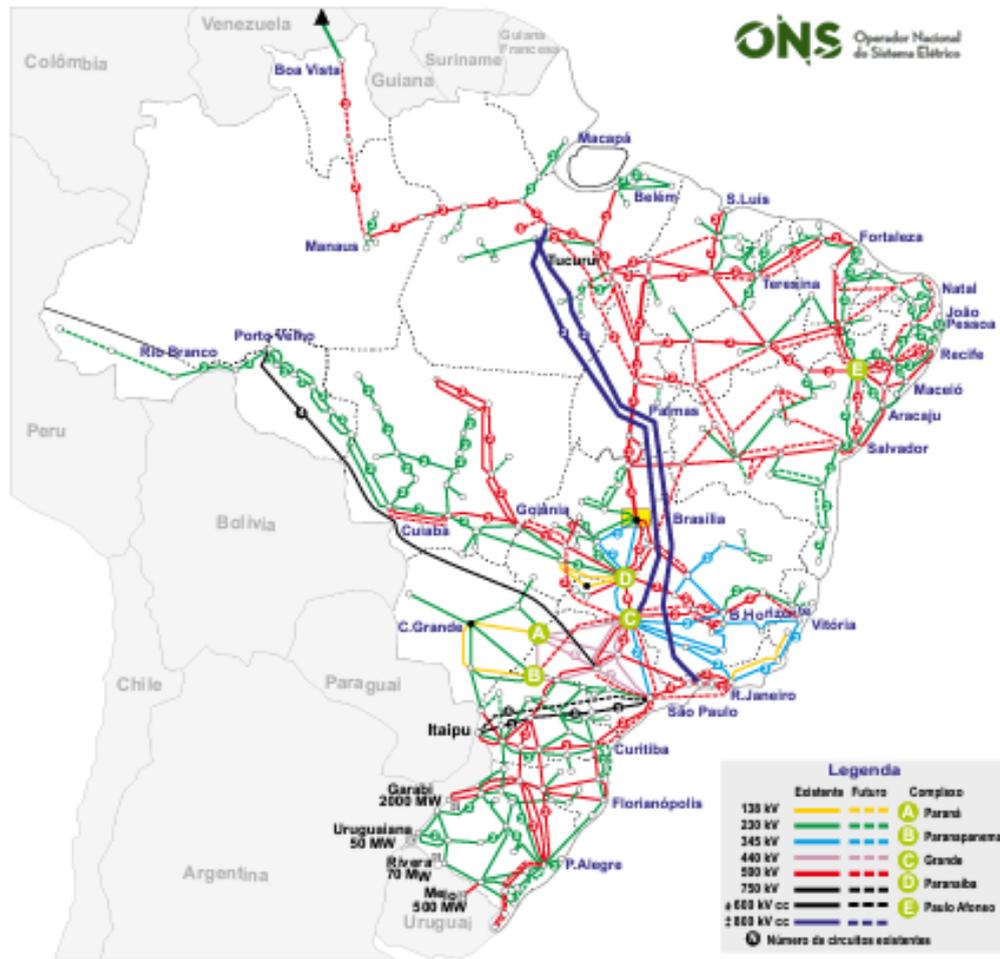
Sob a perspectiva dos inúmeros fatores mencionados, quando se trata da matriz energética elétrica brasileira, é importante destacar que, apesar da grande variedade de fontes de energia disponíveis no país, a sua vasta extensão territorial torna a transmissão de energia das usinas produtoras aos centros consumidores um grande desafio (NINA, 2020). Essa dificuldade pode ter consequências diretas para a segurança energética nacional.

Em razão das consideráveis dimensões geográficas, as fontes de ER exibem particularidades distintas de uma região para outra. Essas diferenças são evidenciadas em termos de regime hidrológico dos rios, intensidade de radiação solar e velocidade média dos ventos ao longo do dia e do ano. Tais variações geoclimáticas têm um impacto direto na viabilidade e eficiência das tecnologias de ER em cada localidade, bem como nas estratégias de aproveitamento desses recursos em âmbito regional.

O país conta com uma rede de transmissão de 156 mil km (Figura 14), a maior parte integrada ao Sistema Interligado Nacional (SIN)¹⁸. No entanto, é importante ressaltar que a rede de transmissão de energia ainda é um aspecto crítico da infraestrutura energética brasileira, que precisa ser continuamente aprimorado para garantir a segurança energética do país.

¹⁸ SIN - O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termoelétrico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. É constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. O SIN cobre quase todo o território nacional, se estendendo do Amapá ao Rio Grande do Sul, do extremo oriental ao Acre. A única capital ainda isolada é Boa Vista (RR). O Sistema atende praticamente todo o consumo de energia elétrica do país (ONS).

Figura 14 - Sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil - SIN.



Fonte: Operador do Sistema Nacional, 2023.

Fontes ER, como a geração centralizada de energia solar e a eólica, são estrategicamente implantadas em áreas de alto potencial de geração, o que resulta em uma concentração desse tipo de expansão. Embora o sistema como um todo seja capaz de lidar com a volatilidade desse crescimento em escala global, é importante considerar que as linhas de transmissão podem enfrentar sobrecargas para acomodar o escoamento da geração de energia proveniente de Fontes ER.

De acordo com informações da principal análise da Agência Internacional de Energia sobre o setor de energia renovável publicado no ano 2022, as energias renováveis assumirão a posição de maior fonte de geração global de eletricidade até o início de 2025, ultrapassando o carvão. Sua participação na composição energética deve aumentar em 10 pontos percentuais ao longo do período de previsão, alcançando 38% em 2027. As energias renováveis são as únicas fontes

de geração de eletricidade cuja participação se espera que cresça, enquanto as parcelas de carvão, gás natural, energia nuclear e geração a óleo apresentaram declínio. A eletricidade proveniente de energia eólica e solar fotovoltaica mais que dobrará nos próximos cinco anos, representando quase 20% da geração global de energia em 2027. Essas tecnologias de fontes geradoras serão responsáveis por 80% do aumento na geração global de energias renováveis ao longo do período de previsão, o que requer fontes adicionais de flexibilidade para o sistema de energia. Esta dinâmica enfatiza a necessidade de incorporar elementos flexíveis adicionais ao sistema energético.

Contudo, a ascensão das energias renováveis despacháveis¹⁹, que englobam a energia hidrelétrica (quando associada a reservatórios que podem armazenar energia), bioenergia e energia geotérmica, tem sido retida, mesmo diante de sua importância vital para integrar a energia eólica e a solar fotovoltaica nos sistemas elétricos globais. As energias renováveis despacháveis são fontes de energia que podem ser usadas sob demanda a qualquer momento, independentemente das condições externas. Significando que podem ser geradas e fornecidas conforme necessário, em vez de serem dependentes de condições climáticas ou de tempo específicas.

4.4 A participação das energias renováveis na matriz energética brasileira: tendências e desafios.

O setor de energia brasileiro é notável por sua matriz energética²⁰ composta por fontes renováveis, algo observado em poucos países ao redor do mundo, como

¹⁹ É importante salientar que, apesar da terminologia "despachável" ser frequentemente associada a fontes de energia fósseis como o carvão ou o gás natural, devido à sua capacidade de geração constante e controlável, ela também se aplica a algumas fontes de energia renovável, desde que estas possam ser controladas para fornecer energia conforme necessário.

²⁰ A matriz energética e a matriz elétrica são conceitos distintos, embora frequentemente confundidos. Enquanto a matriz energética engloba o conjunto de fontes de energia empregadas para diversos fins, como a propulsão de veículos, o aquecimento de alimentos em fogões e a geração de eletricidade, a matriz elétrica é composta exclusivamente pelas fontes utilizadas para a produção de energia elétrica. Nesse contexto, se pode inferir que a matriz elétrica é uma subcategoria da matriz energética.

destacado pelo BID (2022). Sendo um dos países com menor intensidade de carbono e mantendo sua posição como um dos principais mercados globais de ER (OCDE, 2021). A atual matriz energética é em larga medida a resultante de um processo de reforma orientado à redução da dependência das importações de petróleo (BID, 2022). Ao contrário da maioria dos demais países, harmoniza tradição e vantagens comparativas para produzir ER, notadamente hidroeletricidade e biomassa. Os mercados de energia solar e eólica são emergentes e continuam a crescer, graças ao vasto potencial que ainda pode ser explorado, principalmente na Região Nordeste, mas essas tecnologias apresentam custos de geração ainda muito elevados. Esses custos têm tendência declinante e a sua redução é função da capacidade instalada²¹ (NINA,2020).

As fontes de ER, juntamente com a hidrelétrica, são dominantes na composição energética, com as hidrelétricas predominando no setor elétrico (UDEMBA; ATOSUN, 2022). No entanto, entre 2013 e 2014, houve uma redução no uso dessas fontes hídricas, devido à diminuição na oferta de energia hidrelétrica causada pela falta de chuvas. A partir de 2015, ocorreu uma recuperação significativa no uso de fontes de ER, impulsionada pelo crescimento na produção de biocombustíveis, energia eólica e derivada da cana-de-açúcar (PEREIRA et al., 2017). É pertinente apontar que a alocação de recursos em projetos de hidroelétricas de grande porte acentua a influência da matriz elétrica diante das variações no regime de precipitações, desempenhando um papel substancial no que concerne à segurança energética nacional.

A presença significativa das hidroelétricas na matriz elétrica brasileira confere singularidade ao sistema elétrico do país em termos de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, é importante ressaltar que a hidroeletricidade, assim como outras fontes renováveis de energia, está suscetível à influência de fatores climáticos, causados em variações no armazenamento de energia (representado pelo nível de água acumulada nos reservatórios). Durante

²¹ A capacidade instalada se refere a um termo utilizado na área de energia para se referir à capacidade máxima de geração de energia elétrica que uma usina ou sistema de geração de energia é projetada para produzir de forma contínua em determinado período de tempo, geralmente em condições ideais de operação.

períodos de seca, essa disponibilidade de energia pode atingir níveis críticos, afetando a segurança energética.

Conforme destacado por PEREIRA et al. (2017), com a redução desse recurso natural, a oferta de energia diminui, aumentando os riscos para o sistema energético e acarretando aumento dos preços da energia no país. A crise hídrica emergiu como o principal fator de motivação que levou o governo a incentivar a diversificação da matriz elétrica brasileira, especialmente no que diz respeito ao aproveitamento de ER (LIMA et al., 2020).

A geração de energia elétrica através de hidroelétricas tem apresentado uma diminuição progressiva em sua capacidade, aproximadamente 20 pontos percentuais em relação à produção total nos últimos anos (PEREIRA et al., 2017). Essa redução tem como resultado um aumento do risco de continuidade no fornecimento de energia e no aumento dos custos devido à necessidade de acionar usinas termoeletricas adicionais. Essa conjuntura desfavorável é associada aos cenários climáticos atuais e suas possíveis consequências na ocorrência de eventos extremos.

A contribuição essencial da energia térmica é particularmente evidente durante períodos de escassez hídrica, quando a produção hidrelétrica enfrenta as referidas limitações. Essa realidade torna essencial a mobilização de quase toda a capacidade térmica existente, objetivando preservar a estabilidade do sistema energético e prevenir cenários extremos como a instauração de racionamento de energia. No intuito de sustentar a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento elétrico no Sistema Interligado Nacional (SIN), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tem a autoridade de convocar certos geradores para operar, mesmo fora da programação convencional de despacho, em condições específicas. A implementação deste tipo de despacho acarreta custos, que são reembolsados mediante os Encargos de Serviço do Sistema (ESS), enfatizando o papel estratégico do sistema de energia térmica para assegurar a confiabilidade do suprimento energético, apesar dos desafios inerentes.

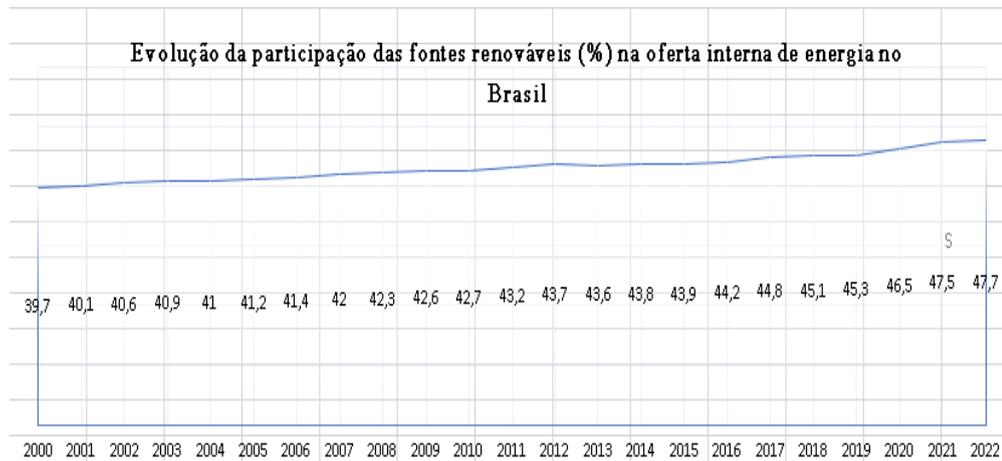
Todos os consumidores de energia elétrica, no Brasil, compartilham a responsabilidade de arcar com os Encargos de Serviço do Sistema (ESS), um conjunto de custos financeiros que são proporcionalmente distribuídos de acordo com o consumo individual, independentemente de operarem no mercado livre ou no mercado regulado (CCEE, 2023). Os consumidores no mercado livre realizam os

pagamentos através do mecanismo de contabilização estabelecido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Para aqueles que integram o mercado regulado, os encargos iniciais são cobertos pela concessionária de distribuição de energia designada, a qual posteriormente redistribui tais custos aos consumidores por meio das tarifas de consumo e das bandeiras tarifárias. Tal processo evidencia a complexa estrutura econômica que respalda o sistema energético do país, ressaltando a necessidade imperativa de estabelecer estratégias para mitigar tais impactos.

Nesse sentido, a região Nordeste tem grande potencial para produção de energia eólica, enquanto regiões isoladas apresentam boas condições para produção de energia solar (COSTA; PRATES, 2005). Associado esse aspecto a uma expansão da infraestrutura de distribuição de energia pode ser um elemento chave para minimizar os efeitos da intermitência das fontes de energia eólica e solar fotovoltaica em nível regional, levando em consideração a ampla distribuição geográfica dessas fontes nas vastas áreas das regiões do Brasil (EPE, 2022). Conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética²² (2021), a participação das fontes de ER na matriz energética brasileira atingiu 47,7% em 2022. Esses resultados evidenciam o compromisso do país com a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de fontes fósseis (Gráfico 2).

²² A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desenvolve uma série de estudos de economia da energia, que se caracterizam por serem transversais onde os aspectos econômicos exercem papel de destaque, como os cenários econômicos (tanto em nível macro quanto setorial), utilizados na formulação de cenários referenciais para os estudos de demanda de energia, da expansão da oferta e da infraestrutura de energia. Link: [//www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/economia-da-energia](http://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/economia-da-energia)

Gráfico 2 - Tendência de crescimento constante na participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira ao longo dos anos.



Fonte: O Autor, os dados foram extraídos das informações divulgadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

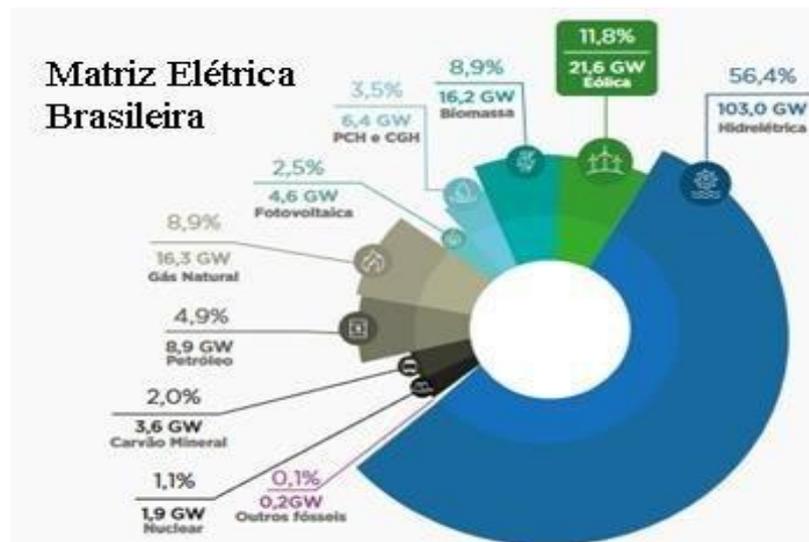
O setor elétrico brasileiro apresenta uma característica singular em relação a outros países, que se refere à sua elevada dependência da energia hidrelétrica, responsável por atender até 95% da demanda por eletricidade do país durante períodos de intensas chuvas (EPE, 2020). Na atualidade, o subsistema Sudeste/Centro-Oeste apresenta uma sazonalidade marcante em função dos períodos secos e chuvosos que afetam sua capacidade de armazenamento de energia, sendo este o subsistema de maior capacidade de armazenamento no país. Nesse contexto, a complementaridade sazonal das demais fontes renováveis de energia, tais como eólica e solar, tem resultado em um aumento da oferta de energia renovável não hidrelétrica durante os períodos secos.

Devido a essa produção sazonal, se torna importante identificar fontes energéticas que sejam complementares à hidroeletricidade (COSTA; PRATES, 2005). No ano 2000, a maioria da energia elétrica gerada no Brasil era proveniente de hidrelétricas, representando 83% da capacidade instalada. Porém em 2019, a situação mudou um pouco, a hidroeletricidade ainda é a principal fonte de energia no país, mas sua participação reduziu para cerca de 63% da capacidade instalada. Ao mesmo tempo, outras fontes de ER, como a geração eólica (9%), a biomassa (9%) e a energia solar (3%), também estão começando a contribuir cada vez mais para a produção de eletricidade. Embora ainda representem uma porcentagem

menor, essas fontes são importantes para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência da hidroeletricidade.

Em relação à geração de energia elétrica, no ano de 2021, se destacou a instalação de 7,5 GW de capacidade²³, sendo a energia eólica a fonte de maior crescimento, representando impressionantes 50,91% da nova capacidade instalada ao longo do ano. A energia solar fotovoltaica também apresentou crescimento significativo, representando 17,95% da nova capacidade instalada, se posicionando como a segunda fonte mais expressiva nesse contexto (Figura 15). Esses números evidenciam o crescente papel das energias renováveis, em particular a eólica e a solar fotovoltaica, na expansão do setor elétrico, promovendo uma transição energética mais sustentável e resiliente.

Figura 15 - capacidade total de geração de energia elétrica.



Fonte: ABEEólica: Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias – Boletim anual 2021.

²³ A frase "a instalação de 7,5 GW de capacidade" se refere à instalação de uma capacidade total de geração de energia elétrica de 7,5 gigawatts (GW). A capacidade de geração de energia elétrica é a quantidade máxima de energia que uma usina ou parque de energia pode produzir em um determinado período de tempo, geralmente medido em kilowatts (kW) ou megawatts (MW) para instalações menores e em gigawatts (GW) para maiores instalações. Portanto, a instalação de 7,5 GW de capacidade significa que uma quantidade de usinas de energia ou parques solares e eólicos com uma capacidade total de 7,5 GW foi instalada.

Os órgãos reguladores do setor energético trabalharam para complementar a geração hidroelétrica incentivando o aumento da participação de fontes de ER, como a eólica e solar. Mediante reflexos desse incentivo, o sistema de geração de eletricidade brasileiro está passando por uma transformação gradual, deixando de ser dominado exclusivamente pelas hidrelétricas e se tornando mais diversificado (IEA, 2019). E a significativa produção de energia eólica, solar e de biomassa, se apresenta como alternativa promissora, devido às características do país como nação tropical, com excelente potencial de insolação, qualidade de ventos costeiros e vasta biodiversidade (LIMA et al., 2020).

Conforme o setor elétrico se expande e é transformado pelo progresso tecnológico, ele se torna cada vez mais complexo (OECD, 2021). Considerando esse aspecto, a relação entre o governo e o desempenho do setor de energia está intrinsecamente ligada devido à crescente complexidade da produção, transporte e distribuição de energia, bem como às mudanças induzidas para promover a descentralização, liberdade de escolha e liberalização dos mercados energéticos (LAZARO et al., 2022). Diante do crescente aumento da demanda energética e das inerentes desvantagens apresentadas pelas fontes convencionais de energia, se faz imprescindível o papel preponderante das políticas públicas na promoção e incremento da adoção de tecnologias voltadas à energia renovável. Nesse contexto, é importante considerar o cenário institucional brasileiro do setor de energia elétrica, que envolve diversos órgãos públicos.

A Tabela 2 mostra os diferentes órgãos públicos envolvidos e suas principais responsabilidades no setor elétrico brasileiro.

Tabela 2 - instituições que compõem o setor elétrico brasileiro.

Os órgãos públicos envolvidos no setor elétrico Brasileiro	
Instituição	Função
Agência Nacional de Águas (ANA)	Regulador federal de água, encarregado de emitir declarações de reserva de disponibilidade de água para geração hidráulica e com responsabilidades compartilhadas no monitoramento de estações de monitoramento hidrométrico e segurança de barragens.
Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)	Regulador federal de telecomunicações, que coopera com a ANEEL na regulamentação do compartilhamento de infraestrutura.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)	Regulador federal da indústria de petróleo e gás, com responsabilidades sobrepostas na regulamentação de combustíveis fósseis usados na geração de eletricidade e na arbitragem em caso de negociações frustradas.
Congresso Nacional do Brasil	Corpo legislativo bicameral, que inicia e aprova novas leis.
Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE)	Autoridade da concorrência responsável pela aplicação da legislação antitruste no setor.
Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Comitê que assessora o Presidente da República Federativa do Brasil na política energética.
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)	Entidade sem fins lucrativos responsável pelos acordos entre o mercado regulado e livre.
Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	Empresa pública vinculada ao MME que elabora a estratégia de longo prazo para o setor elétrico brasileiro.
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)	Comitê que avalia a segurança e continuidade do fornecimento no setor elétrico brasileiro.
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA)	Agência ambiental responsável pela emissão de licenças ambientais em nível federal no Brasil.
Ministério de Minas e Energia (MME)	Ministério responsável pela elaboração de políticas no setor de energia e mineração no Brasil e pela concessão de concessões.
Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)	Entidade sem fins lucrativos responsável pela coordenação, monitoramento e controle da operação de instalações de geração e transmissão no Sistema Interligado Nacional e nos Sistemas Isolados.
Tribunal de Contas da União (TCU)	Instituição suprema de auditoria responsável pela fiscalização das contas públicas do Brasil.

Fonte: ONS e EPE. O Autor.

Para compreender a governança brasileira no setor energético, de acordo com Lazaro et al., (2022), existem duas categorias distintas de atividades: os agentes econômicos setoriais que detêm as concessões, permissões e autorizações para explorar a atividade econômica de geração, transmissão, distribuição e distribuição de energia; e os agentes institucionais que possuem competências relacionadas às atividades políticas do governo, regulamentação, fiscalização, planejamento e promoção do funcionamento do setor energético.

Nesse contexto, é possível afirmar que a infraestrutura institucional representa uma peça fundamental para a regulamentação eficaz e supervisão do setor de energia. Da mesma forma, uma estrutura governamental robusta e eficiente se faz necessária para assegurar a implementação efetiva das políticas energéticas e estimular um cenário favorável ao investimento em inovações tecnológicas e infraestrutura energética. De fato, a adaptabilidade constitui uma característica observada dos regulamentos e políticas diante do setor energético volátil. Dado a mudança rápida na tecnologia e as condições do mercado, é enfrentado o

desenvolvimento de controles regulatórios mais flexíveis e dinâmicos que podem responder a novos padrões e desafios do setor energético.

Essas instituições que compõem o setor elétrico brasileiro constituem um conjunto complexo e interdependente, cujas atribuições abrangem um amplo espectro de atividades. Seu engajamento aplicado e seu compromisso com a excelência são fundamentais para a promoção de um ambiente energético robusto, equitativo e sustentável, alinhado com as demandas emergentes da sociedade contemporânea.

Entretanto, se a clareza de papéis ou os mecanismos de coordenação apropriados estiverem ausentes, a variedade de instituições pode comprometer a eficácia do quadro geral. O processo de concessão é um exemplo que ilustra a complexidade do quadro institucional em relação a deveres específicos, com muitos atores diferentes compartilhando responsabilidades ao longo do processo, os quais tendem a variar de acordo com os tipos de concessões.

Apesar do papel crescente das fontes de ER no país, há um grande espaço para aumentar sua participação na matriz energética do país. O governo tem adotado medidas para estimular o investimento em ER, tais como subsídios, créditos fiscais e garantias de compra de energia, onde COSTA e PRATES (2005), também destacam que as novas fontes renováveis têm apresentado custos marginais decrescentes, enquanto as fontes tradicionais têm apresentado custos marginais crescentes. Dessa forma, é provável que a produção de fontes renováveis se torne cada vez mais competitiva no futuro.

O foco progressivo na sustentabilidade e na transição para as energias renováveis exige que o governo integre esses objetivos às suas políticas e regulamentações para o setor energético. No entanto, é importante lembrar que a transição para uma economia mais sustentável não depende apenas do governo, mas também de outros setores da sociedade, incluindo as empresas e os consumidores. Todos podem contribuir para a promoção do uso de energias renováveis, por exemplo, através da escolha de produtos e serviços sustentáveis, do investimento em tecnologias de energia renovável e do apoio a políticas públicas que promovam a transição para uma economia mais sustentável.

4.5 Desafios contemporâneos da segurança energética no Brasil:

Devido às crises de energia que o Brasil tem enfrentado nos últimos anos, a segurança energética tem se tornado um assunto de extrema importância em nível nacional. O país precisa buscar alternativas para superar os obstáculos ambientais, a falta de políticas governamentais e de infraestrutura energética alcançadas em todo o território nacional, a fim de aprimorar a eficiência energética em todos os processos, desde a geração até a distribuição de energia.

A redução da dependência externa do Brasil no setor energético tem sido constatada nos últimos anos, com uma queda significativa a partir de 2013. Em 2017, essa dependência praticamente se anulou, alcançando o patamar de apenas 0,38% (NINA, 2020). Esse resultado indica que o país caminha em direção à autossuficiência energética, o que representa um importante avanço para a segurança energética nacional e para a sua posição no cenário global

No caso brasileiro, além dos elementos tradicionalmente vinculados ao conceito de segurança energética, tais como disponibilidade e preços acessíveis, é necessário incluir considerações de ordem social, questões relacionadas à posição do país como importador e exportador de energia, aspectos ambientais e as peculiaridades de sua matriz energética. Na sequência, se destaca que a diversificação da matriz energética é um tema de grande importância para o país, já que a dependência de uma fonte única de energia pode colocar em risco a segurança energética e econômica. A adoção de fontes renováveis de energia pode trazer benefícios tanto em termos de segurança energética quanto ambiental e física.

De acordo com o BID (2022), no ano 2000, a maioria da energia elétrica gerada no Brasil era proveniente de hidrelétricas, representando 83% da capacidade instalada e 87% da eletricidade gerada. Mas em 2019, a situação mudou um pouco, a hidroeletricidade ainda é a principal fonte de energia no país, mas sua participação autônoma para cerca de 63% da capacidade instalada e da eletricidade gerada. Enquanto isso, outras fontes de energia renovável, como a geração eólica (9%), a biomassa (9%) e a energia solar (3%), também estão começando a contribuir cada vez mais para a produção de eletricidade no país. Embora ainda representem uma porcentagem menor, essas fontes são importantes para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência da hidroeletricidade.

A relevância das hidrelétricas para a matriz energética brasileira é inegável e, conseqüentemente, sua contribuição para a segurança energética nacional é considerável. Os reservatórios hidrelétricos apresentam vantagens na capacidade de armazenamento de energia elétrica e equilíbrio da intermitência da produção de outras fontes renováveis, como a solar e eólica. No entanto, essa fonte de energia apresenta vulnerabilidade quanto ao regime hidrológico, o que torna imprescindível a presença de termelétricas como backup em épocas de hidrologia desfavorável. A presença dessas fontes de energia de resposta rápida pode ser uma valiosa complementação quando combinada com fontes renováveis, ampliando a capacidade de resposta do operador do sistema. Esse cenário demanda a atenção do setor energético nacional para o fomento de outras fontes de energia renovável e para a adoção de tecnologias e práticas de gestão de risco que possam reduzir a dependência das hidrelétricas e mitigar os efeitos negativos de sua variação sazonal.

Quando se trata da vulnerabilidade, ela se torna um aspecto vital ao considerar a integração dessas fontes renováveis, pois representa um fator que limita a flexibilidade do sistema. Em um contexto de um sistema de energia elétrica, a geração proveniente de fontes convencionais é gerenciada por um operador, seja em âmbito nacional ou regional, que emite instruções para regular a quantidade de energia a ser gerada em cada usina. No entanto, as fontes renováveis não são operáveis de forma controlada, uma vez que sua geração está sujeita às condições climáticas para a disponibilização de energia elétrica. Essa questão ganha grande importância no que diz respeito à segurança do sistema, especialmente quando a presença de fontes renováveis ultrapassa a marca de 50% da matriz energética.

Outro fator essencial é que existem diferenças significativas entre os países em termos de desenvolvimento socioeconômico, crescimento populacional e consumo de energia. Enquanto muitos países ainda dependem de fontes de energia convencionais para atender à demanda energética, alguns têm avançado significativamente na transição para fontes de energia renovável e sustentável. Nesse sentido, o Brasil, um país em processo de desenvolvimento, tem testemunhado um crescente aumento na demanda por fontes de ER não hídricas. Esse crescimento é impulsionado pela disponibilidade de recursos eólicos e solares no território brasileiro. Como evidenciado por Ferraz (2020), nos últimos anos, têm sido observadas iniciativas para a introdução efetiva das energias eólica e solar na

matriz elétrica nacional, com perspectivas positivas para o desenvolvimento dessas tecnologias no país.

4.6 Explorando o potencial das energias eólica e solar na transição energética brasileira.

O conflito Rússia-Ucrânia, que ocasionou a altos valores do petróleo e demais produtos primários, aliado à necessidade em diminuir as emissões poluentes, fortalece o caráter de uso das energias renováveis pela sociedade global. Dentro desse panorama, o Brasil ratificou seu compromisso em alcançar a neutralidade de emissões até 2050 e diminuir em 50% suas emissões, compromissos que foram oficializados em 2021, durante o encontro COP26, realizado em Glasgow, Escócia (TAKATA, et al., 2022).

Dentro dessa perspectiva, as energias eólicas e solar têm experimentado um crescimento notável em escala global, impulsionado pela preocupação crescente com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes. Como fontes de ER, são destacadas como principais alternativas na busca por soluções para consumidores para suprir a demanda energética mundial, sendo economicamente viáveis e emergindo como opções mais atraentes em comparação com fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis. Conforme destacado por Ferraz et al. (2020), esse fenômeno representa uma tendência crescente no uso de fontes de energia mais atraentes, refletindo a evolução do panorama energético e o movimento em direção à transição energética.

Nos últimos 10 anos, houve uma queda significativa nos custos da eletricidade renovável devido ao avanço de tecnologias, economias de escala e experiência de desenvolvedores. Dados coletados em 2019 pela Agência Internacional de Energias Renováveis, a partir de 17.000 projetos mostraram que a energia solar fotovoltaica (PV) teve uma queda em custos de 82% desde 2010, seguida pela energia solar concentrada (CSP) em 47%, energia eólica onshore em 39% e energia eólica offshore em 29%. Em 2019, para 56% da capacidade de geração de energia renovável em escala de serviços públicos recém-comissionada, os custos foram menores do que os dos combustíveis fósseis mais baratos.

A energia solar pode ser dividida em dois tipos principais: energia solar fotovoltaica (PV) e energia solar concentrada (CSP). No primeiro caso, a energia é gerada diretamente a partir da conversão da luz solar em eletricidade²⁴ por meio de células solares, que geralmente são instaladas em telhados de edifícios ou em grandes usinas solares em áreas abertas. Já a energia solar CSP é gerada a partir do aquecimento de fluidos em espelhos solares que concentram a luz solar em um ponto central para gerar vapor e acionar uma turbina. A energia solar PV é mais comum e amplamente utilizada em todo o mundo, enquanto a energia solar CSP ainda é considerada uma tecnologia emergente com menor escala de aplicação. A autossuficiência na geração de energia solar surge como uma importante solução para o país diante da atual crise hídrica no qual desempenha um papel fundamental na diversificação do abastecimento de eletricidade, aliviando a pressão sobre os recursos hídricos, escassez e mitigando os riscos de racionamento e aumentos tarifários.

A energia eólica onshore é produzida por turbinas eólicas terrestres, que são instaladas em locais com boa exposição ao vento. Essa tecnologia tem se expandido consideravelmente, impulsionada pelos incentivos governamentais e pelos leilões de energia. Por outro lado, a energia eólica offshore é produzida por turbinas instaladas em plataformas no mar, o que requer investimentos significativamente maiores devido aos custos envolvidos na instalação e manutenção em um ambiente marinho desafiador. Embora a energia eólica offshore ainda seja pouco explorada no país, ela apresenta grande potencial devido à disponibilidade de ventos fortes e constantes na costa brasileira. No entanto, é necessário superar desafios técnicos e regulatórios para que essa tecnologia se desenvolva de forma mais ampla no país.

A expansão da geração de energia renovável tem resultado na criação de um mercado em larga escala, permitindo a fabricação dessas novas tecnologias em economia de escala, tornando as tecnologias eólica e fotovoltaica competitivas em preço e financeiramente para investidores (FERRAZ et al., 2020). Essas fontes

²⁴ Essa eletricidade que vem do sol é chamada de fotovoltaica*, termo formado a partir de duas palavras: foto, que em grego significa “luz”, e voltaica, que vem da palavra “volt”, a unidade para medir o potencial elétrico. (América do Sol, link: <http://www.americadosol.org/>)

apresentam peculiaridades distintas em comparação às fontes de energia tradicionais, como hidrelétricas, térmicas e energéticas.

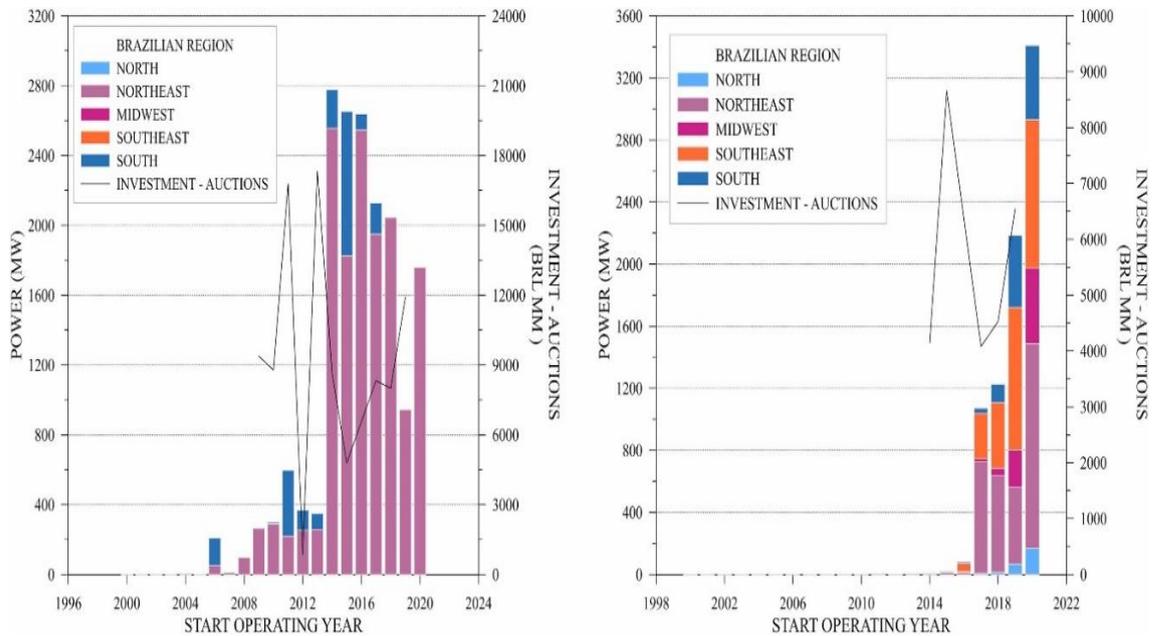
As fontes de energia eólica e solar fotovoltaica se apresentam como importantes alternativas para o atendimento das necessidades futuras de eletricidade no Brasil (SANTOS; TORRES, 2022). Essas fontes tiveram sua estreia na matriz energética brasileira por meio do Proinfra, um programa de incentivo às fontes alternativas criadas em 2002. Desde então, essas fontes têm se expandido com a realização de leilões de contratação de longo prazo dedicados exclusivamente para elas. Segundo o CEBRI (2021), em outras modalidades de inscrição, essas fontes contaram com descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição, além de terem sido estimuladas por meio de contratos bilaterais de compra de energia (PPAs corporativos). As referidas fontes receberam apoio do governo para seu desenvolvimento em vários períodos, mas ambas ganharam mais consistência na segunda metade da década de 2010. As primeiras usinas eólicas foram instaladas em meados de 2006 e podem ser atribuídas a esses incentivos. No entanto, é perceptível que a potência instalada anual aumentou significativamente após os primeiros leilões, demonstrando o impacto dos leilões no cenário de integração das fontes renováveis.

A (Figura 16) apresenta dados de geração de energia (GC - geração centralizada e GD – geração distribuída)²⁵ e investimentos por meio de leilões no Brasil até 2020.

²⁵ Geração Centralizada (GC): Esse modelo é característico das grandes usinas de geração de energia em que a energia é produzida em um local centralizado e enviada através de uma complexa rede de transmissão e distribuição para chegar aos consumidores finais.

Geração Distribuída (GD): é um termo comum no setor de energia que se refere à geração de energia elétrica realizada próximo ou no local de consumo, podendo se referir a turbinas eólicas individuais ou pequenas instalações de turbinas eólicas que fornecem energia diretamente para uma casa, um negócio ou uma comunidade local.

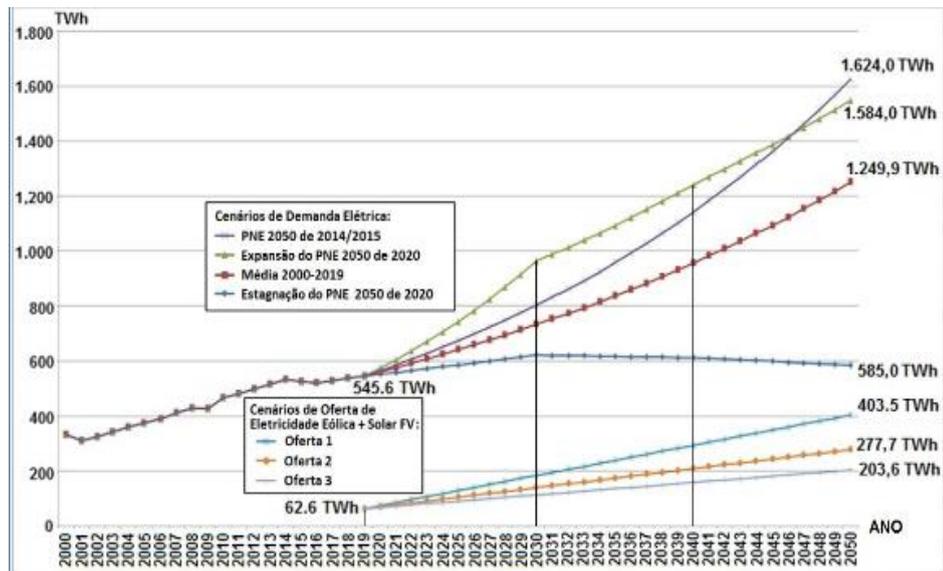
Figura 16 - Energia e investimentos em fontes eólicas (CG + GD) de 2000 a 2020 (esquerda) e solar fotovoltaica (direita).



Fonte: Renewable & sustainable energy reviews - Influence of public policies on the diffusion of wind and solar PV sources in Brazil and the possible effects of COVID-19, COSTA, E. et al. 2022.

De acordo com o estudo realizado por Santos e Torres (2022), analisaram diferentes cenários de oferta e demanda de eletricidade, realizados em doze possíveis contribuições das fontes de energia eólica e solar no qual o ano de 2019 foi utilizado como ponto de partida, uma vez que é o último ano pré-pandemia. Conforme constatado no estudo do Gráfico 3, a eletricidade gerada a partir dessas fontes poderia suprir de 12,5% a 69,0% da demanda nacional de eletricidade, além de contribuir significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

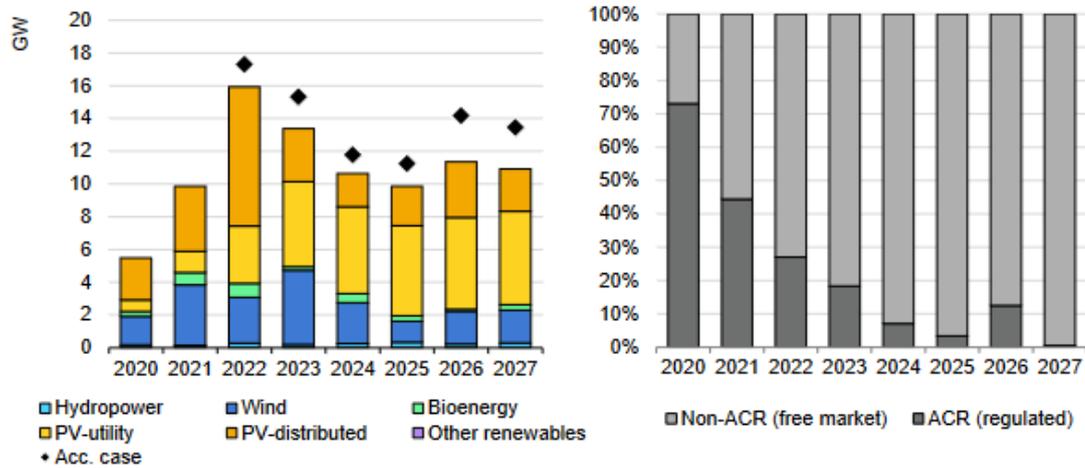
Gráfico 3 - Projeções de demandas de eletricidade e três projeções de oferta de energia eólica e Solar fotovoltaica para o Brasil de 2019-2050.



Fonte: Cenários Brasileiros de Demanda Elétrica e de Suprimento com Energias Eólica e Solar no Período 2019-2050, Santos e Torres (2022).

Está prevista uma adição de mais de 70 GW de capacidade renovável no Brasil até o ano de 2027, com um enfoque significativo nas tecnologias de energia solar fotovoltaica e eólica (Figura 17). A estimativa para o ano atual, 2023, foi revista em alta em mais de 60%, refletindo o crescimento contínuo de projetos de grande magnitude por meio do mercado livre, o cumprimento dos prazos estipulados pelas regulamentações das energias eólicas em terra, e a observância do prazo determinado para usufruir dos benefícios relacionados à geração distribuída de energia solar fotovoltaica.

Figura 17 - Adições de capacidade renovável no Brasil, 2020-2027 (à esquerda) e energia solar fotovoltaica em escala de utilidade e (à direita) capacidade eólica onshore por registro de mercado.



IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA, Renewables, (2023 b).

A expansão da capacidade de energia solar fotovoltaica em escala de utilidade pública e energia eólica em terra é impulsionada principalmente pela demanda do mercado livre, complementada pela capacidade previamente concedida em leilões. A demanda por capacidade no mercado livre é parcialmente suprida por meio de contratos bilaterais com clientes dos setores varejista e industrial, visando atingir as metas de descarbonização corporativa. Sob a perspectiva expressa pela a IEA (2023 b), considerando as fontes mencionadas, é importante ressaltar que há previsão de um aumento significativo de instalações para o ano de 2023, antes do termo da isenção tarifária para o uso da rede em março de 2024.

A expressão escala de utilidade se refere a projetos de geração de energia que são dimensionados para fornecer energia a uma classe ou rede de energia pública em grande escala. Isso geralmente envolve instalações de energia consideráveis que produziram energia em nível suficiente para suportar as necessidades de energia de comunidades, cidades ou até mesmo regiões. Em relação à energia solar fotovoltaica e energia eólica, a escala de utilidade normalmente se refere a grandes solares ou parques eólicos que fornecem energia para a rede elétrica. Esses projetos são geralmente construídos e operados por empresas de serviços públicos ou produtores independentes de energia.

Portanto, se torna evidente o papel essencial que a energia solar e eólica desempenha no contexto da expansão da matriz elétrica do país. Suas integrações possibilitam a diversificação das fontes energéticas e a exploração de complementaridades, fortalecendo a adaptabilidade do sistema elétrico como um todo.

4.6.1 Energia Eólica: A Nova Força da Matriz Energética Brasileira.

A energia eólica consiste na captação da energia dos ventos, proveniente do movimento das massas de ar. Se trata de uma fonte renovável e abundante, amplamente disponível em todos os lugares e de baixo impacto ambiental. Embora a geração comercial de eletricidade a partir da energia eólica tenha se iniciado há pouco mais de 30 anos, os equipamentos de geração eólica evoluíram rapidamente em termos de conceitos e tecnologias, contando com importantes contribuições do conhecimento da indústria aeronáutica.

Os avanços tecnológicos nessa área, como o desenvolvimento de turbinas maiores e mais eficientes, aprimoramento da aerodinâmica e otimização dos sistemas de controle, têm resultado em maior geração de energia e redução de custos dos sistemas de energia eólica. As usinas eólicas possuem custos operacionais extremamente baixos e não dependentes de uma fonte de energia primária que precisa ser estocada. Embora estejam sujeitos a condições climatológicas que satisfaçam o regime dos ventos, não há registros de períodos prolongados de recessão que caracterizem períodos críticos, como no caso das hidrelétricas. Essa vantagem das usinas eólicas em relação às hidrelétricas é que não estão sujeitas a variações desenvolvidas na disponibilidade de recursos naturais.

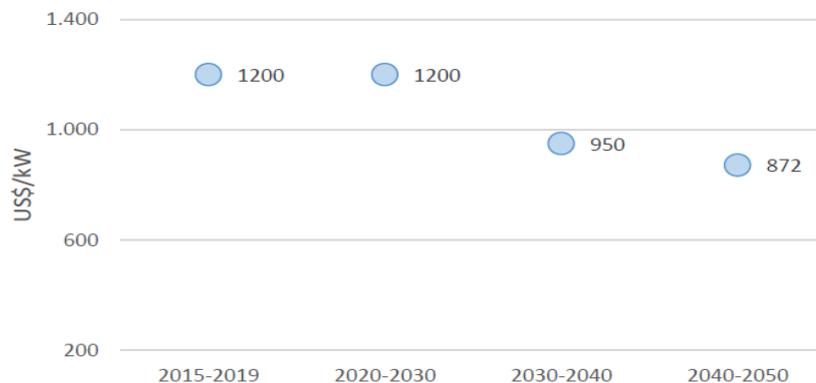
No contexto destas observações, a energia eólica tem se destacado como uma das tecnologias mais avançadas entre as fontes renováveis, com um rápido crescimento no país na última década. Se tornou a escolha primordial para os planejadores e governos nacionais em busca de diversificação das fontes de energia, redução de emissões de CO₂, estímulo a novas fontes e criação de oportunidades de emprego.

No âmbito do Plano Nacional de Energia 2050 do Ministério de Minas e Energia, foi realizada uma análise prospectiva da expansão da oferta de energia elétrica por meio de usinas eólicas até o horizonte 2050. Essa análise foi conduzida por meio de

simulações de um modelo de otimização da expansão²⁶. A decisão econômica para selecionar a melhor alternativa de expansão, ou seja, a solução "ótima", é baseada na minimização do valor presente do custo total de expansão do sistema. Esse custo total, é obtido pela soma dos custos de investimento de todos os projetos, juntamente com os custos operacionais de todo o sistema, incluindo o sistema existente e os projetos futuros.

A curva de custo pode ser usada para entender a viabilidade econômica desses projetos de energia, bem como para analisar o potencial de mercado desses projetos em diferentes regiões. Geralmente mostra uma tendência decrescente (Figura 18) e (Figura 19), o que significa que à medida que a capacidade instalada de energia aumenta, os custos tendem a diminuir (MME, 2022 b). A curva CAPEX é uma representação gráfica que mostra o investimento inicial necessário para a implantação de um projeto de energia eólica onshore e offshore, com base em parâmetros específicos.

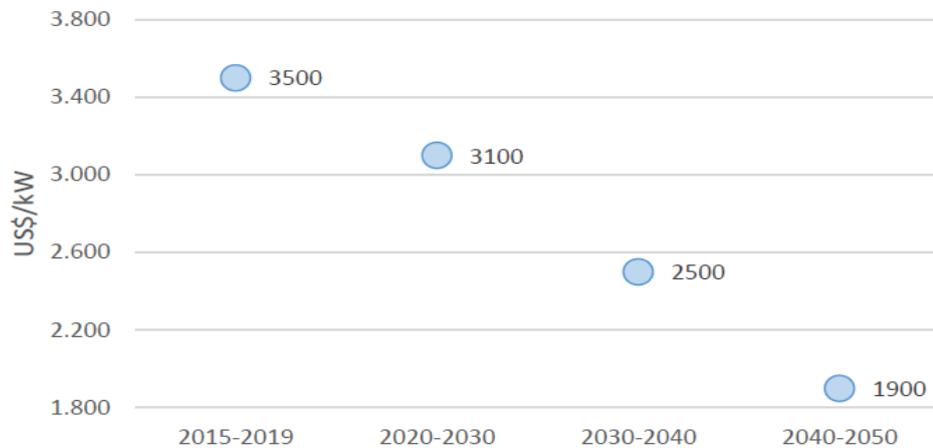
Figura 18 - Curva de CAPEX para Eólica "onshore" com projeções entre os anos de 2015 a 2050.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME). Relatório Final PNE 2050 – Anexo, 2022b.

²⁶ Em resumo, o objetivo dessas simulações é determinar um cronograma de expansão que minimize o valor presente do custo total de investimento em novas usinas geradoras, interligadas, custos operacionais e custos de déficit de energia elétrica, levando em consideração restrições de expansão, operações, ambientais e requisitos de confiabilidade.

Figura 19 - Curva de CAPEX para Eólica “offshore” com projeções entre os anos de 2015 a 2050.



Fonte: MME, Relatório Final PNE 2050 – Anexo, 2022b.

A energia eólica no país continua a se expandir em terra, onshore, mas a sua expansão offshore requer investimentos ainda mais expressivos. Essa situação é influenciada pelas particularidades do Brasil em relação a outros países, como o potencial limitado e a qualidade do recurso em terra, que acabam por dificultar a tomada de decisões econômicas viáveis para o recurso offshore, considerando as premissas de redução de custos adicionais e como diferenças conhecidas entre os recursos em terra e em mar.

A crescente participação de fontes de ER e a expansão da geração distribuída²⁷ têm sido uma tendência na matriz energética nos últimos anos. Nesse contexto, a energia eólica tem se destacado como uma fonte importante para o abastecimento da demanda energética do país em nível nacional. Essa ascensão do setor eólico foi possibilitada pela implementação de uma série de instrumentos de política pública, tais como tarifas feed-in²⁸, regulação setorial, compras públicas e financiamento público direcionado, que foram adotadas pelo governo como parte de uma estratégia

²⁷ A geração distribuída se refere à produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis ou outras tecnologias, de forma descentralizada e próxima aos pontos de consumo, geralmente em residências, empresas ou comunidades.

²⁸ Feed-in tariff - significa tarifa de incentivo, e se trata de um benefício financeiro para que se utilize mais fontes de energia renováveis, em vez das não renováveis. As fontes de energia renovável, normalmente, são caras e oferecem mais riscos aos produtores. Por isso, foi criada a feed-in tariff, para que os produtores possam vender essa energia renovável a um bom custo-benefício. Assim, os contratos são de longo prazo — na faixa de 10 a 20 anos — e a custo de produção. <https://maisretorno.com/porta/termos/f/feed-in-tariff>.

coordenada para promover a consolidação desse setor. Esses instrumentos foram fundamentais para sustentar uma transição sociotécnica sustentável induzida no setor eólico brasileiro.

Desde a contratação de projetos eólicos no Leilão de Energia de Reserva de 2009, a energia eólica tem ganhado destaque como uma das principais fontes geradoras de energia na matriz elétrica brasileira. De acordo com a EPE (2020 e 2021b) em 2018, se tornou a quarta maior fonte, com aproximadamente 8% da energia elétrica gerada no país. Posteriormente, com a contratação de mais projetos eólicos em leilões subsequentes, a energia eólica ascendeu para a segunda posição na matriz elétrica brasileira em 2020, sendo responsável por cerca de 9,2% da energia elétrica gerada, consolidando seu papel como uma fonte renovável de energia em constante crescimento (Tabela 3).

Tabela 3 - Principais fontes geradoras de energia na matriz elétrica com destaque para a energia Eólica.

	2016	2017	2018	2019	2020	Δ% (2020/2019)	Part. % (2020)
Total	578.898	587.962	601.396	626.324	621.219	-0,8	100,0
Hidráulica (i)	380.911	370.906	388.971	397.877	396.381	-0,4	63,8
Gás Natural	56.550	65.591	54.295	60.188	53.515	-11,1	8,6
Derivados de Petróleo (ii)	12.207	12.911	10.293	7.846	8.556	9,1	1,4
Carvão	17.001	16.257	14.204	15.327	11.946	-22,1	1,9
Nuclear	15.864	15.739	15.674	16.129	14.053	-12,9	2,3
Biomassa (iii)	49.236	49.385	51.876	52.111	55.613	6,7	9,0
Eólica	33.489	42.373	48.475	55.986	57.051	1,9	9,2
Solar	85	831	3.461	6.651	10.717	61,1	1,7
Outras (iv)	13.554	13.968	14.147	14.210	13.387	-5,8	2,2

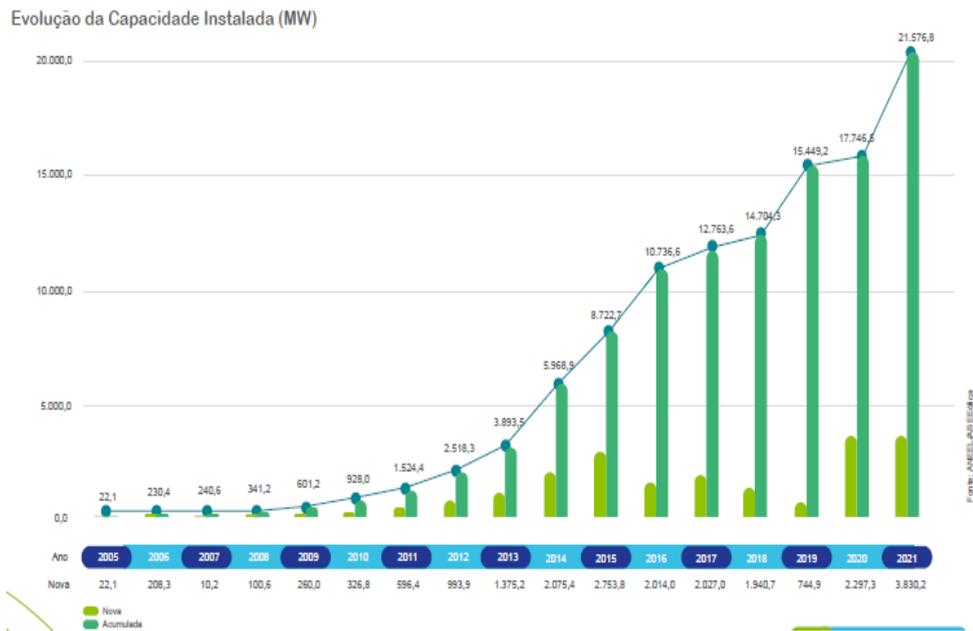
Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020 - EPE

Com base em um levantamento recente tratado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica)²⁹, se constatou que a capacidade instalada de parques

²⁹ A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) é uma instituição sem fins lucrativos que atua como uma representação e congregação da indústria de energia eólica no Brasil. A ABEEólica

eólicos no país atingiu quase 21,5 MW ao final de 2021. Essa condição é expressivamente notável, tendo em vista que, há uma década, a geração de energia eólica no país era quase desprezível, totalizando apenas 22,5 KW em 2005. A capacidade instalada aumentou aproximadamente 95% ao longo do referido período (Figura 20).

Figura 20 - Evolução da Capacidade Instalada de parques eólicos.



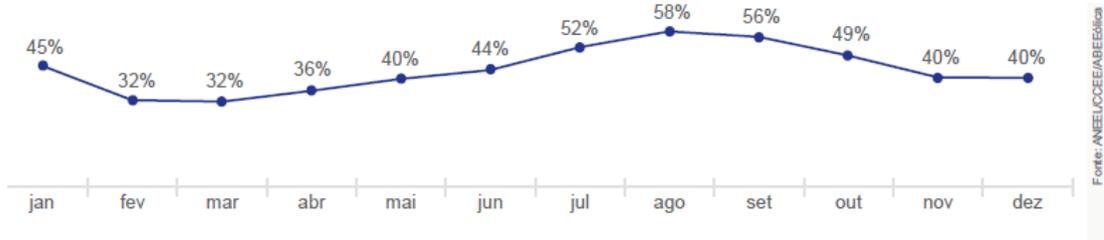
Fonte: ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica - Evolução da capacidade instalada da fonte eólica - Boletim anual 2021.

A análise do desempenho de usinas de energia eólica é frequentemente avaliada pelo fator de capacidade, que é a proporção entre a geração efetiva de energia da usina em um determinado intervalo de tempo e sua capacidade total instalada nesse mesmo período. No ano de 2021, o valor médio do fator de capacidade para a fonte eólica foi de 43,6%, indicando que, em média, a usina gerou energia equivalente a 43,6% de sua capacidade total ao longo do ano. Notavelmente, o mês de agosto registrou o maior valor médio mensal, com um fator de capacidade

engloba empresas de toda a cadeia produtiva desse setor, buscando promover o desenvolvimento sustentável e a expansão da energia eólica no país. Link: <https://abeeolica.org.br/quem-somos/>

de 57,9%, sugerindo uma operação mais eficiente da usina em relação à sua capacidade instalada nesse período (Gráfico 4).

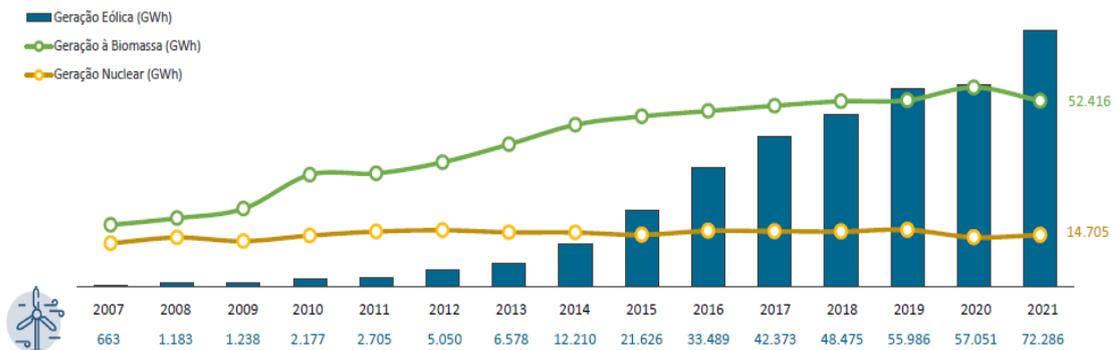
Gráfico 4 - Fator de capacidade referente ao ano 2021.



Fonte: ABEEólica - Boletim anual 2021.

A energia gerada a partir dos ventos apresentou um aumento significativo de 26,7% em 2021 em comparação com o ano anterior (Figura 21), consolidando sua posição de liderança entre as fontes de geração, superando a biomassa e a energia nuclear (EPE, 2022 b). Contribuindo em média, com 12,18% de toda a geração de energia injetada no SIN em termos de representatividade e abastecimento. Durante o segundo semestre, quando os ventos são mais celebrados, a participação da energia eólica foi ainda maior, atingindo o pico em agosto, com 16,7% da geração total do SIN.

Figura 21 - Evolução da geração eólica (GWh).



Fonte: ABEEólica - Boletim anual 2021.

Conforme evidenciado na Figura 22, é possível observar que o subsistema Nordeste apresentou uma geração de energia muito próxima à geração total do sistema, correspondendo a 88,7% do total. Na região Sul, a energia eólica também tem uma presença significativa na produção total de energia. O estado do Rio Grande

do Sul, que faz parte desse mercado secundário, se destaca na geração de energia eólica, com a presença de grandes parques eólicos nessa região.

Figura 22 - Geração e Representatividade da Fonte Eólica.

Região	2020		2021		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,05	0,1%	0,06	0,1%	4%
Sul	6,33	11,5%	6,20	8,7%	-2%
Nordeste	47,00	85,6%	63,20	88,7%	34%
Norte	1,50	2,7%	1,76	2,5%	17%
Total	54,89	100%	71,22	100%	29,7%

Fonte: ABEEólica - Boletim anual 2021.

Os resultados da análise da geração de energia elétrica nos estados brasileiros durante o ano de 2021 (Tabela 4), indicam que Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Sul foram os cinco estados que apresentaram a maior geração de energia no período.

Tabela 4 - Montante de geração verificado para cada estado brasileiro com participação eólica.

REGIÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
RN	2.153,7	1.703,5	1.454,7	1.678,1	1.810,4	2.112,5	2.777,0	3.404,2	3.207,4	2.906,9	2.906,9	2.906,9
BA	2.115,3	1.272,1	1.831,7	1.948,5	2.398,0	2.589,2	2.957,9	3.175,5	2.993,1	2.533,2	2.533,2	2.533,2
PI	767,0	408,5	482,0	760,1	1.185,3	1.287,1	1.514,0	1.513,4	1.364,3	1.045,2	1.045,2	1.045,2
RS	609,9	544,1	489,3	641,1	595,8	724,2	608,6	597,8	736,3	722,0	722,0	722,0
CE	936,6	725,5	454,8	574,5	485,5	642,4	946,5	1.163,2	1.272,1	1.206,7	1.206,7	1.206,7
PE	377,5	306,5	277,0	238,3	271,8	244,6	338,4	388,9	376,3	398,3	398,3	398,3
MA	231,4	175,5	105,4	130,1	71,2	117,0	140,4	245,8	314,7	294,4	294,4	294,4
PB	62,2	45,5	44,7	48,8	57,5	59,8	75,8	93,5	153,7	154,6	154,6	154,6
SC	66,4	48,2	46,6	50,4	58,4	68,3	82,1	86,3	75,8	62,2	62,2	62,2
SE	7,4	7,9	6,4	4,0	4,7	4,3	5,2	8,1	7,7	8,1	8,1	8,1
RJ	13,3	7,0	5,1	3,0	2,8	4,0	4,4	8,4	8,7	6,7	6,7	6,7
PR	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4

Fonte: CCEE/ABEEólica

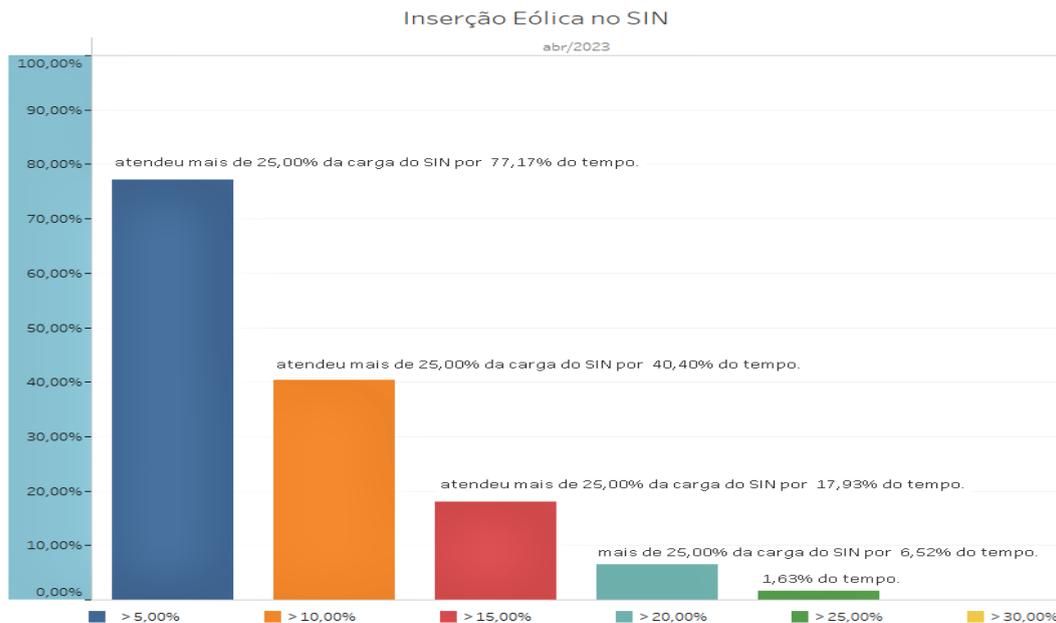
Fonte: ABEEólica - Boletim anual 2021.

A geração de energia elétrica foi medida em terawatts-hora (TWh)³⁰, e os valores registrados foram de 21,23 TWh para o Rio Grande do Norte, 21,15 TWh para

³⁰ O terawatts-hora (TWh), é uma unidade de medida de energia que representa a quantidade de energia produzida ou consumida em um período de uma hora, em uma escala de trilhões de watts.

a Bahia, 9,10 TWh para o Piauí, 7,91 TWh para Ceará e 5,63 TWh para o Rio Grande do Sul (ABEEólica, 2021). A análise para o mês de abril de 2023, o gráfico (Figura 23) apresenta índices que quantificam o tempo em que a geração eólica do SIN foi maior que determinados percentuais da carga ao longo do mês.

Figura 23 - Inserção Eólica no SIN referente ao mês de abril/2023.



Fonte: ONS – histórico da operação de inserção da geração eólica e fotovoltaica.

Exemplificando a leitura dos dados: quando uma coluna apresenta um valor de 80% e representa 10%, a sua interpretação significa que durante 80% do tempo no mês, pelo menos 10% da demanda foi atendida pela geração de energia eólica.

No ano de 2021, o setor eólico no Brasil registrou um investimento de US\$ 5,15 bilhões (equivalente a R\$ 27,81 bilhões), o que representa 44% do total investido em fontes renováveis, incluindo solar, eólica, biocombustíveis, biomassa, resíduos, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e outras fontes. Ao considerar o período de 2010 a 2021, o investimento total no setor eólico atingiu aproximadamente US\$ 42,36

É uma unidade comumente usada para expressar a quantidade de energia elétrica gerada por usinas de grande porte.

bilhões. Esses dados foram obtidos por meio de análises realizadas pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF), conforme apresentado no Gráfico 5, que ilustra a representatividade dos investimentos em energia eólica em relação ao total de investimentos em energias renováveis desde 2010.

Gráfico 5 - Investimentos em novos projetos no setor Eólico (Em milhões de US\$).



Fonte: ABEEólica - Boletim anual 2021.

No contexto energético brasileiro, a energia eólica vem ganhando destaque como uma fonte estrategicamente importante, especialmente devido aos avanços tecnológicos que proporcionam maior eficiência e redução de custos. A consolidação do setor eólico é uma consequência direta das políticas públicas bem implementadas, exemplificadas pelo investimento expressivo de US\$ 5,15 bilhões em 2021. A relevância deste setor é ainda mais destacada pela sua crescente participação na matriz energética, refletida pelo aumento significativo de 26,7% na produção de energia eólica em 2021, comparativamente ao ano anterior.

Contudo, a expansão da energia eólica offshore ainda impõe desafios, exigindo investimentos mais robustos. Respectivamente, o aumento contínuo da capacidade instalada, corrobora com a posição de liderança que a energia eólica assumiu no setor energético, particularmente em estados como o Rio Grande do Norte e a Bahia. A eficácia dessa fonte de energia é demonstrada pelo fator de capacidade médio de 43,6% registrado em 2021.

Deste modo, a energia eólica se consolida como uma fonte renovável de grande importância no cenário brasileiro, com potencial para impulsionar a

diversificação energética, a redução de emissões de CO₂ e a criação de novas oportunidades de trabalho.

4.6.2 Perspectivas e Desafios da Energia Solar no Brasil – Potencial Fotovoltaico

Com uma ampla variedade de classificações, a tecnologia solar engloba tipos passivos e ativos, térmicos e fotovoltaicos, concentrados e não concentrados. No que se refere à abordagem passiva, a ênfase está na coleta de energia solar sem necessidade de conversão direta da luz ou do calor em outras formas, o que pode ser exemplificado através de projetos de construção que aproveitam otimamente a luz e o calor solar. Por outro lado, a tecnologia ativa se propõe a explorar e converter a energia solar para diferentes aplicações, se dividindo em dois grupos principais: fotovoltaico e solar térmico (TIMILSINA et al., 2012).

Ao direcionar a atenção para a energia solar fotovoltaica, a geração de energia ocorre quando os fótons de luz atingem diretamente a célula fotovoltaica. Este avanço tecnológico possibilita o aproveitamento eficaz da energia solar, fornecendo a energia necessária para o uso humano de maneira direta e eficiente (Portal solar, 2023).

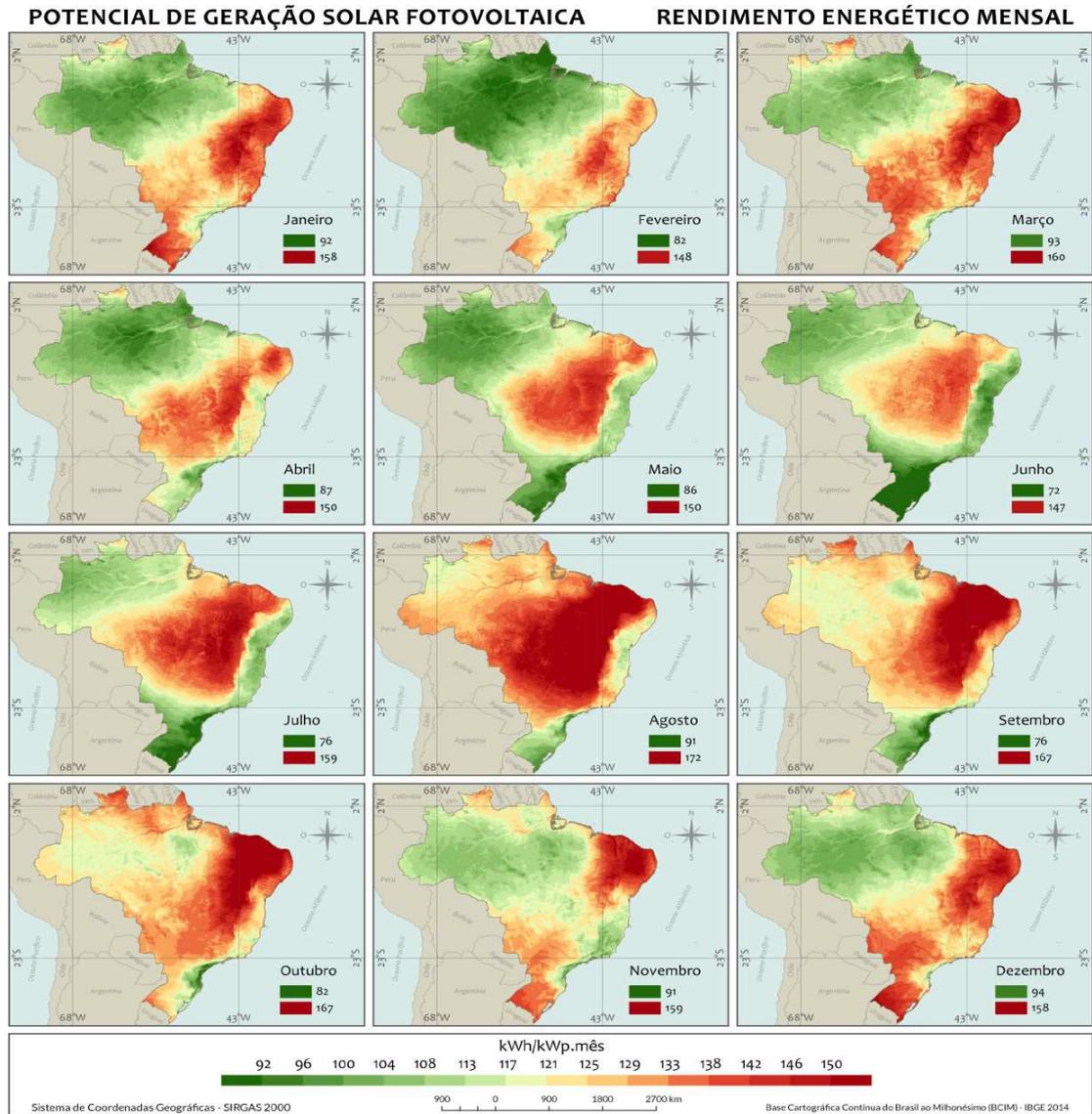
No que tange a expansão da energia solar no Brasil, esta segue avançando de forma expressiva. Diversos benefícios, tanto no âmbito econômico quanto ambiental, estão impulsionando a ascensão desta fonte de energia renovável. Essa expansão é impulsionada por uma variedade de elementos, se destacando, em primeiro lugar, os elevados custos da eletricidade no Brasil, além dos frequentes acréscimos na fatura de energia elétrica. Sendo seu principal motor de crescimento, o aumento contínuo da inflação energética. Fatores como empréstimos concedidos ao setor elétrico e subsídios, que eventualmente são repassados aos consumidores, contribuem significativamente para o constante incremento nas tarifas de energia elétrica

Complementarmente, a tendência de diminuição nos preços dos sistemas fotovoltaicos, a disponibilidade de opções de financiamento acessíveis, o clima propício para a geração de energia solar presente no país, os custos reduzidos associados à manutenção dos sistemas fotovoltaicos e a relevância crescente da sustentabilidade, também se revelam como fatores contributivos para este

crescimento. Atualmente, a aquisição desses equipamentos é muito mais viável financeiramente do que se comparada com a situação de cinco anos atrás. Esta acessibilidade financeira ampliada possibilita que um número crescente de interessados possa realizar o investimento em um sistema solar fotovoltaico, impulsionando a expansão do mercado.

O país, possui de um vasto potencial de geração de eletricidade a partir dessa fonte, apresenta uma capacidade superior mesmo em regiões menos ensolaradas se comparadas, por exemplo, às áreas mais ensolaradas da Alemanha, um dos líderes na adoção da energia fotovoltaica (IDEAL, 2023). Passando para uma perspectiva mais cartográfica (Figura 24), se observa a sazonalidade da distribuição do rendimento máximo de energia em todo o país, abrangendo tanto usinas de grande porte centralizadas, quanto a geração fotovoltaica distribuída instaladas em telhados e coberturas de edificações. É relevante destacar que durante os meses de verão, especialmente de dezembro a março, é observada uma produção máxima de energia solar nos estados localizados nas regiões extremo Sul e Sudeste do Brasil, identificados com os momentos de maior demanda registrada pelo ONS nestas regiões. Devido à sua natureza descentralizada, a geração de energia solar fotovoltaica possui um potencial significativo para contribuir na mitigação dos picos de demanda do SIN (PEREIRA, et al., 2017).

Figura 24 - Sazonalidade do potencial de geração solar fotovoltaica para os 12 meses do ano, em termos de rendimento energético anual para todo o Brasil (medido em kWh/kWp.mês no perfil de cores), admitindo uma taxa de desempenho de 80% para geradores fotovoltaicos fixos.



Fonte; INPE – Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

A partir dos dados apresentados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar, revela uma incidência diária de radiação solar variando entre 4.500 Wh/m² a 5.500 Wh/m² em território nacional (IDEAL, 2023). Em outras palavras, em média, cada metro quadrado do território brasileiro recebe entre 4.500 e 5.500 watt-hora de energia solar por dia. Diante dessa perspectiva, o uso da energia solar para geração elétrica emerge como uma opção viável e sustentável para abastecer diversos setores, incluindo indústrias, residências e edifícios. Dentro desse contexto, de acordo com o Portal

Solar (2023), a presença marcante da energia solar na matriz elétrica do Brasil, que contribui com 13,1%, é incontestável. Nesse cenário, o setor residencial é destaque, contribuindo com 78,9%, seguido dos setores comerciais e de serviços, que juntos representam 10,7%, e da energia solar rural, que responde por 8,5%, abrangendo um total de 1.368.157 propriedades em todo território nacional.

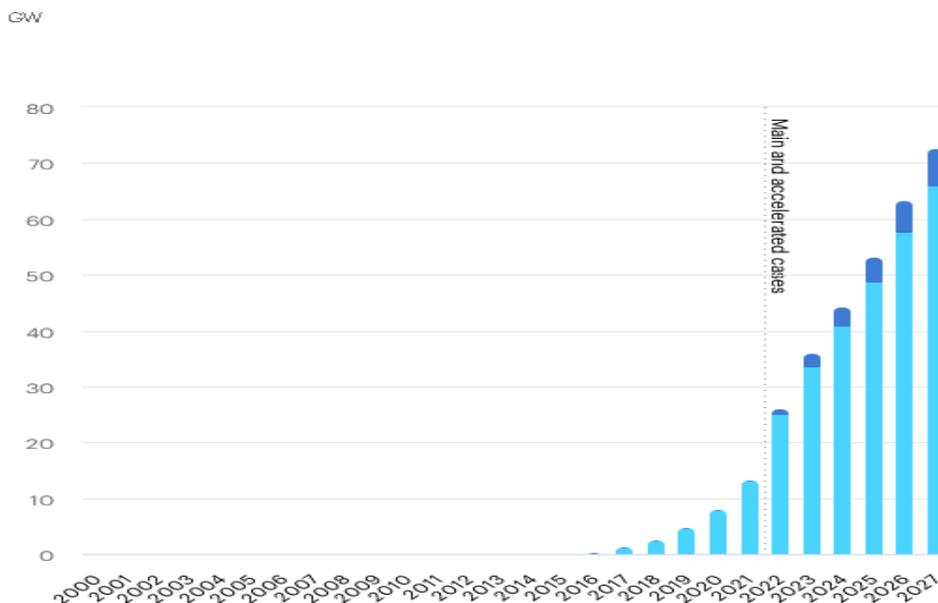
Esses sistemas têm passado por avanços tecnológicos que resultam em maior eficiência e redução de custos. A produção em grande volume tem contribuído para a obtenção de economias de escala, fazendo desta uma opção economicamente vantajosa tanto para investidores quanto para consumidores. Embora os seus custos tenham diminuído nos últimos anos, essa tecnologia ainda possui valores de implantação pouco competitivos, equipamentos e tecnologia importados do exterior e ainda não oferece uma solução definitiva para a questão da intermitência na geração de energia elétrica.

A tecnologia fotovoltaica é considerada madura, apresentando uma relação custo-benefício otimizada e redução dos custos de geração. Esta eficiência econômica, combinada com a flexibilidade em relação à localização das usinas solares fotovoltaicas, e aliada à sua rápida e relativamente fácil construção em comparação com outras tecnologias, destaca a importância da geração fotovoltaica para o futuro da economia de energia no contexto brasileiro.

Se prevê, no futuro próximo, que em decorrência do incremento da participação da geração solar fotovoltaica em todo o país, a produção de eletricidade em proximidade ao local de consumo será amplamente reconhecida pelo sistema elétrico como um dos atributos primordiais dessa modalidade de tecnologia de geração. Este cenário é acentuado pela expressiva redução de custos experimentada pela tecnologia fotovoltaica nos últimos períodos.

De acordo com a IEA (2023 b), se estima a adição de nova capacidade fotovoltaica distribuída de mais de 20 GW, sendo que uma parcela considerável desta, de mais de 8 GW, tem previsão de entrar em operação ainda este ano. Esta tendência é ilustrada na Figura 25. Cabe salientar que os sistemas instalados antes de janeiro de 2023 são elegíveis para o esquema atual generoso de compensação líquida, um fator que tem incitado uma corrida de instalações, fomentando assim, a expansão da capacidade fotovoltaica.

Figura 25 - Capacidade Fotovoltaica, Brasil, 2000-2027.



Fonte: IEA, Renewables Data Explorer, link: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer> acessado: 15/05/2023.

As novas instalações permitem uma menor compensação pelo excesso de energia, o que reduzirá sua atratividade econômica e resultará em menores adições de capacidade entre 2024 e 2027. Porém, é esperado um crescimento médio de mercado de mais de 2,5 GW por ano durante o restante do período de previsão, pois o cenário de negócios continua atrativo, apesar da seleção mais baixa. O cenário acelerado projeta um crescimento 16% maior, o qual pode ser alcançado por meio de contratos adicionais no mercado livre.

Mesmo com toda essa expectativa de projeção, o Brasil continua atrás em relação ao desenvolvimento e utilização da energia solar, em comparação com países de representatividade semelhantes que avançaram nesse aspecto. Apesar de possuir um excelente potencial de recursos solares, o país não tem aproveitado plenamente essa fonte de energia renovável (TAKATA, et al., 2022). A ideia central é que o país tem a oportunidade de aproveitar o seu potencial solar para promover benefícios amplos e abrangentes em diferentes áreas de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Contudo, diversos desafios ainda precisam ser enfrentados para que a energia solar fotovoltaica possa atingir todo o seu potencial no Brasil (Tabela 5).

Tabela 5 - Desafios para a Implementação e Expansão da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.

Desafios	Descrição
Infraestrutura de rede elétrica	A atual rede elétrica brasileira precisa ser aprimorada para permitir um maior intercâmbio de energia solar, especialmente considerando a natureza intermitente da geração solar.
Políticas públicas e regulatórias	Políticas que incentivem o uso de energia solar e que facilitem o financiamento de projetos solares são essenciais para acelerar a adoção desta fonte de energia. A revisão dos incentivos fiscais e das políticas de preço da energia também é essencial.
Financiamento e custo inicial alto	O custo inicial para instalar painéis solares ainda é alto, apesar do declínio ao longo dos anos. Facilitar o acesso a opções de financiamento pode impulsionar o uso de energia solar, principalmente em residências e pequenas empresas.
Formação técnica e pesquisa	A formação de profissionais qualificados para atuar no setor e o fomento à pesquisa para desenvolver tecnologias mais eficientes são fatores determinantes para o futuro da energia solar no Brasil.
Conscientização	Muitas pessoas ainda não estão cientes dos benefícios e do potencial da energia solar. Portanto, campanhas de conscientização podem desempenhar um papel importante na promoção da energia solar.

Fonte: Elaborado pelo autor: Dados Portal Solar, 2023.

De acordo com o Portal Solar (2023), o governo tem implementado diversas medidas incentivadoras para aqueles que optam por gerar sua própria energia solar. Tais estímulos podem ser observados tanto na esfera nacional quanto estadual. Majoritariamente, os estados brasileiros concedem isenções no Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para esse grupo. Por outro lado, em nível federal, as alíquotas do PIS/COFINS para unidades consumidoras produtoras de energia solar foram reduzidas a zero, conforme estabelecido pela Lei de Isenção nº 13.169. Esses incentivos fiscais são estratégias importantes para fomentar a adoção da energia solar no país

O segmento de energia solar fotovoltaica representa uma área com um amplo espectro de vantagens, abrangendo benefícios estratégicos no âmbito energético. Este setor goza de notável suporte por parte da sociedade e estimula a participação

de investidores e empreendedores, de maneira distribuída, em todas as áreas geográficas do Brasil. A adoção de uma estratégia robusta e focalizada neste campo pode resultar em avanços promissores para o país, à medida que a energia solar fotovoltaica se expande.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos conteúdos desenvolvidos no trabalho, podemos inferir que a tecnologia é um domínio extenso e multifacetado, englobando um conjunto de conhecimentos, competências e técnicas empregados na criação, evolução e aplicação de produtos, serviços e sistemas que satisfazem as demandas humanas. Nesse quadro, a inovação desempenha um papel determinante, propiciando a evolução e introduzindo novos conceitos, produtos, processos e serviços. A transição para fontes de energia renováveis exemplifica essa inovação, representando um paradigma tecnológico em transformação, em contraponto ao paradigma de energia fóssil. Esse deslocamento de paradigma, estimulado pela necessidade de mitigar a dependência de fontes não renováveis, contribui para a preservação do meio ambiente e ao fomento do crescimento econômico. O progresso tecnológico, neste contexto, é decisivo na direção das trajetórias tecnológicas e na demarcação dos limites de desenvolvimento. A migração para fontes de energia renováveis emparelhadas à inovação tecnológica, dessa maneira, se torna imprescindível para o enfrentamento dos desafios contemporâneos e futuros. Essas iniciativas possibilitam o avanço sustentável da sociedade, incentivando a criação de soluções inovadoras para os desafios que se apresentam.

Analisando de forma criteriosa e abrangente, se torna evidente a importância da segurança energética para garantir o fornecimento confiável e sustentável de energia, levando em consideração os riscos, a estrutura do sistema energético e a posição geopolítica do país. A transição para fontes de energia renovável se mostra estratégica, com o objetivo de diminuir a dependência de combustíveis fósseis, mitigar os efeitos das mudanças climáticas e garantir a continuidade no fornecimento de energia. A inovação tecnológica e o desenvolvimento de tecnologias limpas são imprescindíveis para viabilizar tal transição, superando obstáculos como custos elevados e mantendo uma relação de custo-benefício favorável frente às fontes tradicionais. A conscientização pública sobre os benefícios das energias renováveis e a importância da sustentabilidade, combinando o papel fundamental do governo na formulação de políticas e estratégias de longo prazo, incentivando o investimento em energias renováveis e criando um ambiente inspirado para a transição. Em essência, essa transição para um sistema energético mais sustentável é uma necessidade

urgente, e a conscientização, a inovação tecnológica e a política eficaz são fundamentais para sustentar essa mudança, garantindo um futuro energético mais seguro.

O panorama energético do Brasil é marcado pela presença significativa de fontes renováveis na matriz energética, com destaque para as energias hidrelétrica, eólica e solar. O avanço dessas fontes é impulsionado pela busca por mitigação dos impactos ambientais e diminuição da dependência de fontes não renováveis. Dessa forma, o Brasil se insere em um contexto global de transição energética, que visa substituir, progressivamente, as fontes de energia fóssil por fontes de energia limpa e renovável.

No âmbito das fontes renováveis, a energia hidrelétrica possui papel proeminente, dada a abundância de recursos hídricos disponíveis no território brasileiro. O recurso à energia gerada por usinas hidrelétricas se justifica pelo grande potencial de geração em escala e pelo baixo custo relativo. No entanto, a produção de energia hidrelétrica carrega consigo certos desafios, como os impactos ambientais decorrentes da construção de barragens, o deslocamento de comunidades e a variabilidade na produção, especialmente em períodos de seca. A superação desses desafios é uma necessidade urgente para a garantia de um modelo energético sustentável e que promova o equilíbrio social e ambiental. Dada a singularidade dessa questão, a energia termoelétrica assume um papel estratégico essencial, funcionando como um suporte indispensável na garantia da oferta de energia, principalmente durante esses períodos de seca, quando a produção das hidrelétricas não atende plenamente à demanda.

No contexto brasileiro, a complexidade da energia térmica é evidente, e caracterizada pela interação dinâmica entre vantagens e desafios. Sua versatilidade decorre de uma vasta gama de fontes, unida a uma relação custo-benefício eficaz, fazendo da energia térmica uma alternativa estratégica à outras fontes convencionais, como a hidroeletricidade. O potencial de derivar esta energia de fontes renováveis, como a luz solar, ou opções de menor impacto ambiental, como o gás natural, representa uma contribuição valiosa para o panorama energético nacional. Entretanto, a poluição potencial, caso se opte pela queima de combustíveis fósseis, configura um desafio ambiental considerável. Em períodos críticos, como na vigência de crises hídricas, o Brasil recorre à energia térmica para garantir a estabilidade do fornecimento energético. Os Encargos de Serviço do Sistema (ESS) se tornam um recurso necessário nesse contexto, correlacionados aos impactos financeiros para os usuários, pois ajudam a manter o nível dos reservatórios e prevenir situações mais

graves, como o racionamento energético. Com a crescente gravidade das crises hídricas recentes, a gestão responsável e consciente da energia térmica se torna mais urgentes, reforçando a sua importância no conjunto energético brasileiro.

Com relação à energia eólica, a exploração desse recurso no país tem ganhado destaque em virtude de sua viabilidade econômica e sustentabilidade. A força dos ventos, captada por turbinas eólicas, se revela uma alternativa eficaz para a diversificação da matriz energética, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. O potencial eólico brasileiro é vasto, sobretudo nas regiões costeiras e no Nordeste, onde os ventos são mais intensos. O desenvolvimento de turbinas eólicas mais eficientes, em conjunto com a possibilidade de instalação em áreas remotas e a complementaridade com outras fontes, potencializa a contribuição da energia eólica para a estabilidade do sistema elétrico.

Por sua vez, a energia solar vem ganhando espaço como uma alternativa promissora no universo das energias renováveis. A tecnologia fotovoltaica, que permite a conversão da luz solar em eletricidade, tem evoluído de forma significativa, o que resulta em maior eficiência e redução de custos. A geração distribuída de energia solar, por meio da instalação de painéis solares em edifícios e residências, se apresenta como uma opção viável para a diversificação da matriz energética, além de contribuir para a segurança energética do país.

Os leilões de energia renovável são fundamentais para a inclusão desta categoria energética no mercado elétrico brasileiro, criando um cenário regulamentado para a sua inserção. As empresas privadas que participam desses leilões estão em busca de aprovação para a venda de projetos que utilizam recursos naturais para geração de energia. Em contrapartida, as empresas especializadas no desenvolvimento de projetos de energia renováveis precisam disponibilizar aos investidores e financiadores um dossiê completo do projeto durante os leilões, que deve incluir informações essenciais como a projeção anual de produção de energia, dados solarimétricos do local ou a espacial, temporário e vertical do vento ao longo dos anos e outras especificações técnicas fornecidas por engenheiros. Após o processo de aprovação, é garantir o direito de venda por meio destes leilões. A realização de leilões para aumentar a oferta de energia elétrica é uma estratégia integrada durante a reforma do setor elétrico, que foi solidificada com a participação ativa de diversas instituições do Setor Elétrico Brasileiro. Esses leilões representam pilares do modelo institucional estabelecido em 2004.

Na síntese de um panorama energético em constante transição, o Brasil navega pelas águas de um futuro mais sustentável, alimentado pelas correntes de inovação tecnológica e orientado pelas bússolas das políticas energéticas e conscientização pública. A integração de fontes de energia renováveis como a hidrelétrica, eólica e solar em nosso sistema energético não só mitiga a crise climática, mas também promove a segurança energética e a independência geopolítica. Embora cada fonte tenha seus próprios desafios, os impactos ambientais da energia hidrelétrica, a necessidade de períodos ventosos para a eólica e a dependência de tecnologia para a solar, a resposta estratégica tem sido equilibrar essas fontes com a energia térmica, especialmente durante as crises hídricas. Paralelamente, o modelo institucional de leilões que se consolidou em 2004 tem sido essencial para a expansão do mercado de energia renovável, fornecendo uma plataforma regulamentada para a negociação de projetos de energia renovável. Ao interagir a interação dinâmica entre vantagens e desafios, o Brasil trilha um caminho para um futuro energético mais seguro e sustentável, aproveitando ao máximo os recursos naturais disponíveis e impulsionando a transição para um modelo energético resiliente e inclusivo.

6 REFERÊNCIAS

ABOLHOSSEINI, S.; HESHMATI, A. **The main support mechanisms to finance renewable energy development.** Renewable & sustainable energy reviews, v. 40, p. 876– 885, 2014.

ALAM, M. M.; MURAD, M. W. **The impacts of economic growth, trade openness and technological progress on renewable energy use in organization for economic cooperation and development countries.** Renewable energy, v. 145, p. 382–390, 2020.

ALMEIDA PRADO, F. et al. **How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil.** Renewable & sustainable energy reviews, v. 53, p. 1132–1136, 2016.

AQUILA, G. et al. **An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience.** Renewable & sustainable energy reviews, v. 70, p. 1090–1098, 2017.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E.; DE QUEIROZ, A. **Impacto de Políticas de Incentivo para Fontes de Energia Renovável,** SP, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual dados de 2021.**

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO. **Dossier de energia 2022. Brasil: um foco no setor elétrico,** BID, 2022.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/>> acesso em: 20/06/2023.

CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS. **Tendências e Incertezas da Transição Energética no caso brasileiro.** Programa de Transição Energética, 2021. Disponível em <<https://www.cebri.org.br/doc/228/tendencias-e-incertezas-da-transicao-energetica-no-caso-brasileiro>>. Acesso em: 06/05/2023.

CHRISTENSEN, Clayton. **O Dilema da Inovação:** Quando as novas tecnologias levam empresas ao fracasso. 1 ed. M. Books do Brasil, 2012.

COSTA, E. et al. **Influence of public policies on the diffusion of wind and solar PV sources in Brazil and the possible effects of COVID-19.** Renewable & sustainable energy reviews, v. 162, p. 112 - 449, 2022.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO. **Curva-S e as Ações da Firma**: impressões e avanços a partir do setor de videogames no Japão. In: XXV, Brasília: P. 11, 2008.

DAS, P., Verburg, R., Verbraeck, A. and Bonebakker. **Barriers to innovation within large financial services firms**: An in-depth study into disruptive and radical innovation projects at a bank. *European journal of innovation management*, v. 21, n. 1, p. 96–112, 2018.

DEB, P. et al. **Creative Destruction During Crises**: An Opportunity for a Cleaner Energy Mix. *IMF Working Papers*, v. 2021, n. 284, p. A001, 2021. Acesso; Mar 15, 2023,

DOSI, G. **Mudança Técnica e Transformação na Industrial**: A Teoria e uma aplicação à indústria dos semicondutores. Campinas – SP: Ed. Unicamp, 2006.

DOSI, G.; NELSON, R. R. **The Evolution of Technologies**: An Assessment of the State-of-the-Art. *Eurasian business review*, v. 3, n. 1, p. 3–46, 2013.

EDWARDS-SCHACHTER, M. **The nature and variety of innovation**. *International Journal of Innovation Studies*, v. 2, n. 2, p. 65–79, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**: ano base 2020, Rio de Janeiro, 2021. (b).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2021**: Ano base 2020, Rio de Janeiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Boletim Trimestral de Consumo de Eletricidade**, ANO III, Número 12, 4º trimestre, 2022. (C).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Oferta de Energia Elétrica PNE 2050**, Nota Técnica PR 003/22, Série Estudos de Oferta, Rio de Janeiro, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**, Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Nota Técnica Pr 04/18, Série Recursos Energéticos, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 - Ano base 2021**, Rio de Janeiro, 2022 (b).

FERRAZ A. S., J. A. et al. Combining wind and solar energy sources: Potential for hybrid power generation in Brazil. *Utilities Policy*, v. 67, p. 101084, 2020.

GOZGOR, G.; LAU, C. K. M.; LU, Z. **Energy consumption and economic growth**: New evidence from the OECD countries. *Energy (Oxford)*, v. 153, p. 27–34, 2018. 90, p. 412–419, 2018.

GÜNEY, T. **Renewable energy and sustainable development**: Evidence from OECD countries. *Environmental progress & sustainable energy*, v. 40, n. 4, p. n/a, 2021.

HUNG, S.-C.; LAI, J.-Y.; LIU, J. S. **Mapping technological trajectories as the main paths of knowledge flow**: Evidence from printers. *Industrial and corporate change*, v. 31, n. 3, p. 863–889, 2022.

INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA. **América do Sol, fomento à energia fotovoltaica**, 2023. Disponível em: <<https://americadosol.org/conhecimento-em-energia-fotovoltaica/>>. Acesso em 17/05/2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Clean Energy Innovation**, Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/cleanenergy-innovation>>. Acesso: 30/01/2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Clean Energy Technology Innovation**, Paris, 2022(b). Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/clean-energy-technology-innovation>>. Acesso em: 07/02/2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency 2022**. Energy Efficiency Division (EEfD), IEA, 2022. (a).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology Perspectives 2023**, Paris, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>>. (acessado em 30/03/2023).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2019**, Paris, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2019>>. Acesso: 29 /03/ 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2022**, Analysis and forecast to 2027, Paris, 2022 (b).

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY AND CLIMATE POLICY INITIATIVE. **Global Landscape of Renewable Energy Finance**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Power Generation Costs in 2019**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>>. acesso: 22/04/2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **World Energy Transitions Outlook 2022**: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022.

JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J.; REDLINGER R. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos**: Oferta, demanda e suas interfaces, 2ª ed, IEI Brasil, Campinas, 2018.

KIM, Linsu. **Da Imitação à Inovação**: A dinâmica do aprendizado tecnológico da Coreia. Campinas – SP: Ed. Unicamp, 2005.

KOTSEMIR; Maxim; ABROSKIN, Alexander; DIRK, Meissner. **Innovation Concepts and Typology** – An Evolutionary Discussion. Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE). Russian. 2013.

LAZARO, L. L. B. et al. **Energy transition in Brazil**: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime? *Energy Research & Social Science*, v. 85, p. 102404, 2022.

LIMA, M. A. et al. **Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions**: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil *Environmental Development Elsevier*, 1 mar. 2020.

LÖSCHEL, A.; MOSLENER, U.; RÜBBELKE, D. T. G. **Indicators of energy security in industrialised countries**. *Energy policy*, v. 38, n. 4, p. 1665–1671, 2010.

MANNE A.S.; **ETA-MACRO: A Users Guide**. Stanford University, California - USA, 1981.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Final PNE 2050 – Anexo**, Plano Nacional de Energia 2050, Secretaria de Planejamento e Transição Energética, 2022 b.

NELSON, R., WINTER, S. **In Search of Useful Theory of Innovation**. *Research Policy* 6. North Holland, P. 36-76, 1977.

NINA. A. M. **A Diplomacia Brasileira e a Segurança Energética Nacional**. Brasília: FUNAG, 2020.

NOROUZI Nima; NOROUZI, Muhammad. **Energy Analysis Framework**: An Introduction to the Energy Economics, Scholars' Press publishing house, 2020.

OLIVEIRA, Luiz Guilherme. **O Desenvolvimento de Projetos de Sistemas Complexos na Indústria Aeronáutica**: o caso de gestão integrada aplicada ao programa Embraer 170. *CADERNOS EBAPE*. BR, v. 7, nº 1, artigo 2, Rio de Janeiro, Mar. 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Anual de Sustentabilidade**, Gerência executiva de Comunicação e Relacionamento com a Sociedade, Gerência executiva de Transformação Estratégica, 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **SINtreg: O que é o SIN**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 10/03/2023.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Driving Performance at Brazil's Electricity Regulatory Agency**, The Governance of Regulators, OECD Publishing, Paris, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/11824ef6-en>>. Acesso em: 04/03/2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>>. Acesso em: 22/02/2023.

PORTA SOLAR. **Energia Solar no Brasil**, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html#ancora7>> acesso em: 23/05/2023.

REYNOLDS, E; SCHNEIDER, B. R; ZYLBERGERG, E. **Inovando no Brasil**. 1 ed; São Paulo - SP: Editora Atlas, 2020.

SANTOS J. A. F. A; TORRES, E. A. **Cenários Brasileiros de Demanda Elétrica e de Suprimento com Energias Eólica e Solar no Período 2019-2050**. Congresso Técnico-científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 77ª SOEA, 2022.

SCHUMPETER, J. A. **Capitalismo, socialismo e democracia** (1943), Ed. UNESP. São Paulo - SP, 2017.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico** (1937), Ed. Nova, São Paulo - SP, 1997.

SOVACOOOL, B. K. et al. **Sociotechnical agendas: Reviewing future directions for energy and climate research**. Energy research & social science, v. 70, p. 101617, 2020.

TAKATA; Marcio, KOLOSZUK; Ronaldo e SAUAIA Rodrigo L. **Políticas públicas para catalisar o desenvolvimento da energia solar no Brasil**. Associação Brasileira e Energia Eólica (ABEEÓLICA), Fotovolt, 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/artigos/politicas-publicas-para-catalisar-o-desenvolvimento-da-energia-solar-no-brasil/>>. acesso: 22/05/2023.

TEECE, David J. **As Aptidões das Empresas e o Desenvolvimento Econômico: Implicações para as econômicas de industrialização recente**. In: KIM, Linsu, NELSON, R. R. (Orgs.), Tecnologia, Aprendizado e Inovação: As experiências das economias de industrialização recente. Editora da Unicamp, Campinas/SP, 2005.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Gestão da Inovação**. 3ª ed, Editora Artmed, Porto Alegre/RS, 2008.

TIMILSINA, G. R. Energy Demand. *In*: SOYTAS U; SARI R. **Routledge Handbook of Energy Economics**. New York: 1^a ed, Routledge, p. 13 – 27, 2020.

TIMILSINA, G. R.; KURDGELASHVILI, L.; NARBEL, P. A. **Solar energy: Markets, economics and policies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 449– 465, 2012.

UDEMBA, E. N.; TOSUN, M. **Energy transition and diversification**: A pathway to achieve sustainable development goals (SDGs) in Brazil. *Energy (Oxford)*, v. 239, p. 122199, 2022.

WEBB, G.; RICKETTS, J. M. **The Economics of Energy**. 1^a ed, The Macmillan Press LTD, 1980.

WORLD BANK. **Global Economic Prospects**, Washington, DC: License: Creative Commons Attribution, June, 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o_2020.pdf>. Acesso em: 07/04/2022.

WORTHY, A. **Economics and Energy**. 1^a ed, The English Press, 2011.

ZWEIFEL, P.; PRAKTIKNJO, A.; ERDMANN, G. **Energy Economics: Theory and Applications**. Springer Texts in Business and Economics, 2017.