

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ELLEN AKINA KAGUEYAMA

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO EM PAÍSES DEPENDENTES DO  
CARVÃO: uma análise comparativa entre Alemanha, China e Índia

RIO DE JANEIRO

2025

Ellen Akina Kagueyama

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO EM PAÍSES DEPENDENTES DO  
CARVÃO: uma análise comparativa entre Alemanha, China e Índia

Tese de Doutorado a ser apresentada ao Programa de Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPED-UFRJ), como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Marinho Mathias  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Colomer Ferraro

Rio de Janeiro  
2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

K11t Kagueyama, Ellen Akina.  
Transição energética de baixo carbono em países dependentes do carvão: uma análise comparativa entre Alemanha, China e Índia / Ellen Akina Kagueyama. – 2025.  
197 f.

Orientador: João Felipe Marinho Mathias.

Coorientador: Marcelo Colomer Ferraro.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento, 2025.

Bibliografia: f. 159 – 178.

1. Transição energética. 2. Descarbonização. 3. Inovação tecnológica. I. Mathias, João Felipe Marinho, orient. II. Ferraro, Marcelo Colomer, coorient. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Economia. IV. Título.

CDD 333.79

Ellen Akina Kagueyama

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO EM PAÍSES DEPENDENTES DO  
CARVÃO: uma análise comparativa entre Alemanha, China e Índia

Tese de Doutorado a ser apresentada ao Programa de Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPED-UFRJ), como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento.

Aprovada em: 10 de fevereiro de 2025.

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. João Felipe Cury Marinho Mathias (orientador)**

---

**Prof. Dr. Marcelo Colomer Ferraro (coorientador)**

---

**Prof. Dr. Helder Queiroz Pinto Jr. (avaliador interno)**

---

**Prof. Dra. Heloísa Borges Esteves (avaliadora externa)**

---

**Prof. Dra. Clarice Campelo de Melo Ferraz (avaliadora externa)**

---

**Prof. Dr. José Vitor Bomtempo (avaliador externo)**

Dedico esta tese aos meus pais, que me ensinaram a interpretar o mundo e não apenas replicar informações.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradeço por possibilitar o suporte necessário para a realização desta pesquisa.

Aos meus avós, Shuji e Reiko Akao (*in memoriam*), que sonharam em ver a primeira neta concluindo um nível superior.

Aos meus pais, Antonino e Mamie Kagueyama, que apoiaram a minha educação sem medir esforços, ensinaram a enxergar o mundo com um olhar crítico, com questionamentos que eventualmente viraram combustível acadêmico. Ao meu irmão, Hiroaki Kagueyama, que, mesmo de longe, torce pelo meu sucesso.

Ao PPED, por ter me acolhido durante estes anos de pesquisa e desenvolvimento acadêmico, no qual pude desenvolver meus conhecimentos científico e humano, realizando reflexões sobre a realidade na qual vivemos.

Aos coordenadores de curso, que estiveram presentes durante a minha passagem nesta instituição, professores Prado e Maria Thereza, que dedicaram seus esforços para nos proporcionar a melhor estrutura possível e assim pudéssemos desenvolver nossas pesquisas.

Aos meus orientadores, professores João Felipe Cury e Marcelo Colomer, que dedicaram a atenção e ensinamentos para a realização desta pesquisa. Este projeto só foi possível por todas as considerações realizadas ao longo destes meses.

Ao meu companheiro, Arthur Gentil, por ter compreendido e me dado apoio durante as dificuldades e nos meses de dedicação intensa para a realização da pesquisa.

Ao meu amigo William Rocha (*in memoriam*), que sempre acreditou que eu iria dedicar meus esforços em pesquisas sobre sustentabilidade. Sua estada na terra foi curta demais, mas de uma grandiosidade ímpar para influenciar tantas pessoas a lutarem por um mundo diferente, com mais humanidade e menos desigualdades.

À minha amiga, Bárbara Mácola, que sempre foi um pilar nas minhas inquietações sobre o mundo e me apoiou nos momentos mais desafiadores da vida. Marina Fagundes, a quem tenho uma vida de histórias e me socorreu nas horas difíceis.

À minha companhia no PPED, Vanessa Huback, com quem dividi diversas matérias durante o curso e foi companhia nos debates sobre o tema. À Rita, com quem sempre travei intensos debates acadêmicos, muito proveitosos para a construção crítica desta pesquisa.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa e que apoiaram e contribuíram de alguma maneira para a realização dela e torceram para seu sucesso.

A todos que diariamente contribuem e acreditam para o desenvolvimento da ciência nacional, que vão além das fronteiras do ensino e se dedicam à esta missão, meu muito obrigada.

*"Não podemos resolver problemas  
usando o mesmo tipo de pensamento  
que usamos quando os criamos"*  
*Albert Einstein*

## RESUMO

A transição energética de baixo carbono (*low-carbon energy transition*) constitui um dos principais desafios contemporâneos, uma vez que exige mudanças que vão além de transformações tecnológicas, incluindo também as econômicas, sociais e políticas. Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo investigar as políticas públicas e o conjunto de instrumentos que forjam a política de transição energética da Alemanha, China e Índia, países que compartilham historicamente uma dependência significativa do carvão em suas matrizes energéticas. A análise comparativa procura compreender como diferentes contextos econômicos, sociais e tecnológicos influenciam as trajetórias de transição energética desses países. A principal contribuição da tese reside na concepção de um arcabouço analítico que permite interpretar diferentes processos de transição energética de baixo carbono, considerando suas dimensões políticas, institucionais e socioeconômicas. Esse arcabouço, ao integrar os referenciais TIS e *Policy Mix*, oferece uma lente para avaliar como políticas públicas e seus instrumentos podem ser desenhados para potencializar as funções de inovação tecnológica e promover a articulação de múltiplos interesses em sistemas complexos. Os resultados indicam que a transição energética não depende apenas de avanços tecnológicos, mas também de rearranjos institucionais e sociais capazes de promover sustentabilidade, segurança energética e acessibilidade. As experiências da Alemanha, China e Índia oferecem lições valiosas sobre os fatores que potencializam ou restringem a eficácia das políticas públicas. Aponta-se que uma transição energética efetiva exige não apenas incentivos econômicos, mas também o fortalecimento de instituições e o engajamento de diversos atores sociais, especialmente em economias emergentes.

Palavras-chave: Transição energética. Descarbonização. *Technological Innovation System (TIS)*. *Policy Mix*. Instituições.

## ABSTRACT

The low-carbon energy transition represents one of the main contemporary challenges, as it requires changes that go beyond technological transformations, encompassing economic, social, and political dimensions. In this context, the present research aims to investigate the public policies and the set of instruments shaping the energy transition policies of Germany, China, and India—countries that historically share a significant dependence on coal in their energy matrices. The comparative analysis seeks to understand how different economic, social, and technological contexts influence the energy transition trajectories of these countries. The main contribution of this thesis lies in the development of an analytical framework that interprets different low-carbon energy transition processes, considering their political, institutional, and socioeconomic dimensions. By integrating the TIS (Technological Innovation System) and Policy Mix approaches, this framework provides a lens to evaluate how public policies, and their instruments can be designed to enhance technological innovation functions and promote the alignment of multiple interests within complex systems. The findings indicate that energy transition depends not only on technological advances but also on institutional and social rearrangements capable of fostering sustainability, energy security, and accessibility. The experiences of Germany, China, and India offer valuable lessons on the factors that enhance or constrain the effectiveness of public policies. It is highlighted that an effective energy transition requires not only economic incentives but also the strengthening of institutions and the engagement of diverse social actors, especially in emerging economies.

Keywords: Energy transition. Decarbonization. Technological Innovation System (TIS). Policy Mix. Institutions

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética global - Cenário 2050 .....	18
Figura 2 - Esquema analítico Tese.....	26
Figura 3 - Objetivos do desenvolvimento sustentável.....	37
Figura 4 - Emissão de GEEs no mundo, por setor (1990-2023). .....	40
Figura 5 - Análise bibliométrica (co-autoria por países).....	58
Figura 6 - Análise bibliométrica (co-autoria por instituição de ensino/organização).....	59
Figura 7 - Análise-bibliométrica (palavras-chave). .....	60
Figura 8 - Mapa das principais contribuições e principais linhas de pesquisa do campo dos estudos de transição sustentável. ....	64
Figura 9 - Conceito de Policy Mix. ....	71
Figura 10 - Etapas de Análise .....	93
Figura 11 - Emissão de GEEs relacionadas ao setor de energia (entre 1990 – 2021). ....	96
Figura 12 - Emissões acumuladas de GEEs relacionadas ao setor de energia. ....	98
Figura 13 - Intensidade de emissões de GEEs por unidade de PIB relacionadas ao setor de energia (CO <sub>2</sub> e/milhão de dólares do PIB) .....	99
Figura 14 - Reservas de Carvão - 2023 (MMst - milhões de toneladas curtas). ....	101
Figura 15 - Dependência do carvão .....	103
Figura 16 - Capacidade global instalada de energias renováveis. ....	104
Figura 17- Participação do carvão na geração de energia e políticas de carvão por país.....	106
Figura 18 - Mapa da Alemanha .....	109

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro síntese - Relatórios do IPCC .....	42
Quadro 2 - Descrição das 7 principais “funções” do TIS.....	68
Quadro 3 - Quadro síntese dos arcabouços teóricos utilizados .....	86
Quadro 4 - Descrição das pontuações da Escala de Likert - tipologia de instrumento. ....	150
Quadro 5 - Escala de Likert para Avaliação de Políticas Públicas - Funções do TIS.....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aumento na emissão de GEEs.....	41
Tabela 2 - Publicações por país .....	56
Tabela 3 - Publicações por instituição/organização.....	56
Tabela 4 - Publicações por país, incluindo-se o termo “carvão”.....	61
Tabela 5 - Avaliação das Políticas Públicas por Tipologia de Instrumentos (Modelo). .....	151
Tabela 6 - Avaliação das Políticas Públicas por Funções do TIS (Modelo). .....	152

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAFA - *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle* ou Escritório Federal de Economia e Controle de Exportação

BMWi - *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* ou Ministério Federal de Economia e Energia

CBIP - *Central Board of Irrigation and Power*

CDB - Convenção sobre Diversidade Biológica

CME - Economia de Mercado Coordenada

CNUMAD - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

COP - Conferência das Partes

CTEI - *Coal Transition Exposure Index*

EEA - *European Environment Agency*

ETS - *Emissions Trading System*

ICAP - *International Carbon Action Partnership*

IEA – *International Energy Agency*

GEE – Gases do Efeito Estufa

INDC - *Intended Nationally Determined Contribution*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LME - Economias de Mercado Liberal

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MLP - Perspectiva Multinível

NAPCC - Plano Nacional de Ação sobre Mudança Climática

NDC - Contribuições Nacionalmente Determinadas

ODM - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONG – Organização Não-Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

STEPS - *Stated Policies Scenarios*

TIS – *Tecnological Innovation System*

UNEP - *United Nations Environment Programme*

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

WEC - *World Energy Council*

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	17
QUESTÕES DE PESQUISA E HIPÓTESES .....	19
OBJETIVOS DA PESQUISA .....	20
METODOLOGIA .....	21
DOCUMENTOS E ANÁLISE DE CONTEÚDO .....	23
ESTRUTURA DA TESE .....	24
<b>1 ESTABELECENDO A CENA: A DISCUSSÃO DA TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO .....</b>	<b>28</b>
1.1 UMA BREVE DISCUSSÃO DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA: COMO SE CHEGOU À EMERGÊNCIA CLIMÁTICA .....	29
1.1.1 Pactuações multilaterais, desenvolvimento sustentável e a noção de emergência climática .....	31
1.1.2 Transição energética: a dependência do carvão e a centralidade dos GEEs. ...	39
1.1.3 Os desafios de uma transição justa: segurança de abastecimento energético, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade.....	44
<b>2 BASES TEÓRICAS E METODOLÓGICAS PARA A ANÁLISE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO .....</b>	<b>52</b>
2.1 PANORAMA BIBLIOMÉTRICO DA LITERATURA EM TRANSIÇÃO ENERGÉTICA .....	54
2.2 REVISÃO DA LITERATURA .....	61
2.2.1 Sistemas de Inovação Tecnológica ou <i>Technological Innovation System</i> (TIS) .	66
2.2.2 <i>Policy Mix</i> .....	69
2.2.3 Classificação em termos de tipologia de instrumento .....	73
2.2.4 TIS, <i>Policy Mix</i> , instituições e arranjos institucionais .....	76
2.2.5 Uma sugestão de arcabouço teórico-analítico.....	87
<b>3 EXPERIÊNCIAS COMPARADAS .....</b>	<b>95</b>
3.1 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – ALEMANHA .....	108
3.1.1 Objetivos de Política Pública.....	113
3.1.2 Estratégias de políticas públicas voltadas à descarbonização.....	114
3.1.3 Análise em termos de tipologia de instrumento.....	116
3.1.5 Análise das funções do TIS .....	120
3.2 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – CHINA .....	121

3.2.1 Principais objetivos de políticas públicas em termos de transição energética	126
3.2.2 Principais estratégias de políticas públicas voltadas para a descarbonização dos setores energéticos .....	127
3.2.3 Análise em termos de tipologia de instrumentos .....	129
3.2.4 Análise do <i>Policy Mix</i> .....	130
3.2.5 Análise das funções do TIS .....	131
3.3 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – ÍNDIA.....	133
3.3.1 Principais objetivos de políticas públicas relacionados à transição energética .....	136
3.3.2 Estratégias de políticas públicas voltadas à descarbonização.....	137
3.3.3 Análise em termos de tipologia de instrumento.....	138
3.3.4 Análise do <i>Policy Mix</i> .....	140
3.3.5 Análise das funções do TIS .....	141
3.4 COMO O ARCABOUÇO TEÓRICO-ANALÍTICO PROPOSTO EXPLICA OS MAIORES OU MENORES AVANÇOS NAS POLÍTICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO .....	143
3.5 POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO DA ESCALA DE LIKERT NA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS .....	149
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>155</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>179</b>

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a transição energética de baixo carbono tem ganhado destaque nas pesquisas sobre sustentabilidade. Trata-se de um processo que envolve trajetórias tecnológicas inseridas em sistemas sociotécnicos complexos — ou seja, sua realização não depende apenas de condições físicas e tecnológicas, mas também de uma conjuntura de fatores sociais, políticos, econômicos e institucionais que definem um contexto propício à mudança. Apesar das diferentes abordagens adotadas por organismos internacionais, observa-se uma convergência em torno de um objetivo comum: descarbonizar os sistemas energéticos para evitar consequências ambientais irreversíveis para as gerações futuras.

A transição energética de baixo carbono está inserida em um contexto mais amplo: a transição para uma economia de baixo carbono. Esse processo implica mudanças estruturais profundas na forma como a sociedade organiza suas relações econômicas e sociais, exigindo a reconfiguração de múltiplos sistemas interdependentes. Entre eles, destacam-se os setores de eletricidade, aquecimento, transporte, agricultura e uso do solo, entre outros, cuja transformação é essencial para viabilizar uma trajetória de desenvolvimento mais sustentável. (GELLS et al., 2017; IPCC, 2023).

As mudanças climáticas, causadas pela emissão de gases de efeito estufa (GEEs), representam uma ameaça à estabilidade econômica global. Nesse contexto, a transição para uma economia de baixo carbono torna-se fundamental para garantir a estabilidade climática (GRUBB et al., 2008). A transição energética, por sua vez, está no cerne desse processo, dado que o setor de energia é o principal responsável pelas emissões de GEEs em escala global. Ainda que existam exceções — como o Brasil, cuja matriz energética é majoritariamente renovável —, a maioria dos países depende de fontes fósseis. Além disso, o modelo de crescimento econômico moderno tem sido estruturado sobre um padrão intensivo em uso de energia, conferindo centralidade ao setor energético nos esforços de descarbonização.

Diversos estudos apontam que a mitigação das emissões de GEEs requer uma combinação de medidas tecnológicas, sociais e políticas. Além de avanços técnicos, é necessário adaptar os padrões de consumo e construir bases sociotécnicas que viabilizem a transição. No entanto, mudanças tecnológicas profundas envolvem custos elevados, sobretudo porque os sistemas atuais foram estruturados sobre combustíveis fósseis.

Por isso, a transição energética deve abranger tanto inovações radicais quanto ajustes graduais e a convivência de diferentes paradigmas sociotécnicos. O termo “transição”, embora

amplamente utilizado, carece de definição unívoca na literatura. Ele pode remeter à substituição de tecnologias, à alteração da matriz energética com maior presença de renováveis ou à reconfiguração institucional do sistema energético. Apesar de poder abranger essas interpretações, o conceito permanece impreciso (SMIL, 2010).

A necessidade de transformações no sistema energético global é evidente tanto pelas exigências ambientais quanto pelas demandas de segurança energética. A urgência dessas mudanças impõe desafios à construção de uma transição capaz de reduzir emissões, assegurando, ao mesmo tempo, sustentabilidade, segurança de abastecimento e acessibilidade. Segundo a IRENA (2023), a transição energética deve ser entendida como uma transformação sistêmica que busca substituir a dependência dos combustíveis fósseis por fontes renováveis.

Contudo, os objetivos de descarbonização vão além da substituição tecnológica. Por se tratar de sistemas complexos, enraizados em contextos socioeconômicos e geográficos específicos, a transição exige políticas adaptadas a cada realidade. Essa transformação demanda não apenas soluções tecnológicas, mas também mudanças sociais, econômicas e culturais, evidenciando a interdependência entre os aspectos sociotécnicos da transição.

Nesse contexto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidos na Agenda 2030, reconhecem o papel central da energia em múltiplas frentes: ampliação do acesso, mitigação da poluição atmosférica, enfrentamento das mudanças climáticas e promoção de uma industrialização sustentável (CHEN et al., 2019). Assim, a energia torna-se elemento estratégico na construção de uma economia de baixo carbono.

## CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

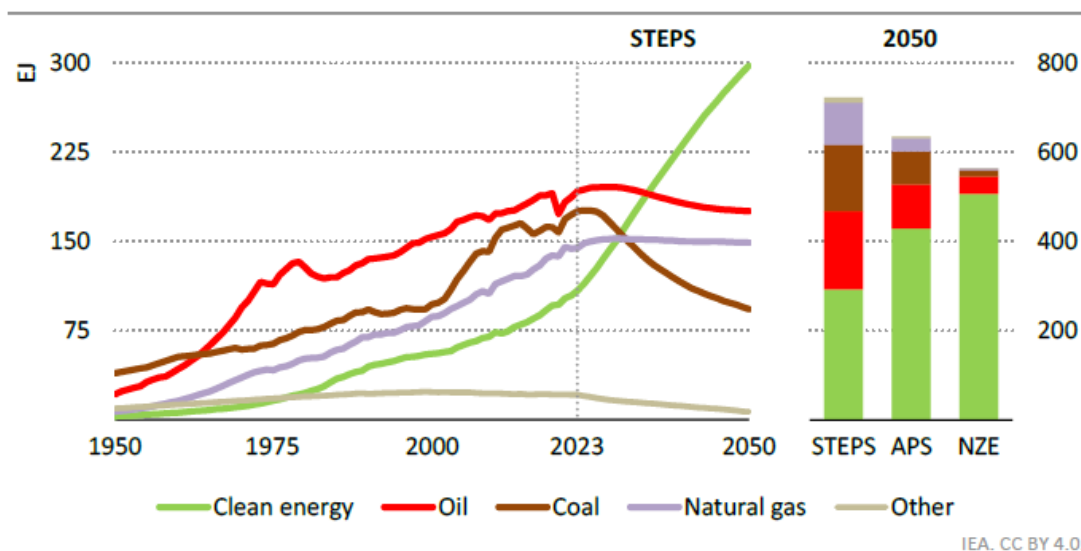
Para possibilitar as inúmeras atividades econômicas e manter o padrão de vida almejado, as civilizações humanas dependem largamente da utilização de energia. Desde seu princípio, o homem dispendeu tempo e recursos para ofertar e consumir energia, com o intuito de satisfazer suas próprias necessidades, como alimentação, vestuário, moradia, dentre outros. O planeta possui diversas fontes conhecidas, tanto renováveis, quanto não renováveis. Contudo, ao longo da história houve momentos de transição de uma fonte para outra, especialmente de acordo com a rápida redução dos recursos disponíveis do paradigma vigente (TRIVEDI et al., 2024).

Atualmente, o paradigma energético global ainda é fortemente ancorado nos combustíveis fósseis, os quais representam cerca de 80% da matriz energética mundial (IEA,

2024a; IRENA, 2024). Essa predominância tem implicações significativas para o aquecimento global, uma vez que o setor de energia é responsável por aproximadamente 73% das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), com destaque para as emissões oriundas da queima de carvão, petróleo e gás natural. Os impactos negativos desse modelo são perceptíveis, manifestando-se principalmente por meio dos efeitos adversos das mudanças climáticas, como secas prolongadas, enchentes, ondas de calor e outros eventos climáticos extremos (TRIVEDI et al., 2024).

A Figura 1 ilustra o *Stated Policies Scenarios* (STEPS), ou em português, Cenário de Políticas Declaradas, no qual se reflete as políticas e medidas já anunciadas por governos, buscando projetar as tendências de energia com base no que já foi oficialmente declarado como intenção ou como objetivo de política. Nela, pode-se observar que há uma projeção de que as energias renováveis passam por um grande crescimento até 2030, ao passo de que o petróleo, gás natural e carvão irão atingir seu ápice durante o mesmo período e irão começar a declinar. Impulsionada principalmente pela expansão da energia solar fotovoltaica e da energia eólica, as energias renováveis se tornariam a maior fonte de energia a partir da década de 2030.

Figura 1 - Matriz energética global - Cenário 2050



Fonte: IEA (2024a, p. 24).

O processo de descarbonização da matriz energética tem ocupado posição central na agenda internacional. A assinatura do Acordo de Paris, amplamente reconhecido como um marco histórico no enfrentamento das mudanças climáticas, consolidou o compromisso global com a sustentabilidade e impulsionou o estabelecimento de metas ambiciosas de redução de emissões. Esse pacto multilateral pode ser considerado determinante para o crescente interesse

da comunidade científica na temática da transição energética, resultando em um aumento expressivo na produção acadêmica sobre o tema. Estima-se que aproximadamente 80% dos estudos sobre transição energética tenham sido publicados nos últimos cinco anos, refletindo a relevância e a urgência da pauta na atualidade (TRIVEDI et al., 2024).

Além disso, argumenta-se que, diante da natureza transnacional dos desafios climáticos, a transição energética não pode ser pensada exclusivamente no plano doméstico. A necessidade de cooperação internacional, de iniciativas multilaterais robustas e de ações coordenadas em escala global é enfatizada como elemento essencial para a viabilização de transformações sistêmicas em larga escala, capazes de enfrentar a crescente complexidade das mudanças climáticas e suas implicações sociais e econômicas.

## QUESTÕES DE PESQUISA E HIPÓTESES

Diante da crescente integração da sustentabilidade ambiental à agenda da transição energética, delineiam-se as seguintes questões de pesquisa que orientam este trabalho:

- Como diferentes políticas e seus instrumentos podem ser implementados e adaptados à luz dos contextos econômicos, sociais e tecnológicos específicos?
- De que forma é possível construir conjuntos de políticas que conciliem sustentabilidade, segurança energética e acessibilidade?
- Em que medida uma análise comparativa dessas políticas e instrumentos revela convergências e divergências, contribuindo para a compreensão dos fatores que influenciam sua eficácia?
- A transição energética tem sido analisada a partir de uma perspectiva eurocêntrica, frequentemente associada à imposição de modelos baseados na importação de tecnologias. É possível construir uma abordagem alternativa? Quais seriam seus pressupostos teórico-analíticos?

Como possíveis respostas às perguntas de pesquisas, foram levantadas as seguintes hipóteses, que serão corroboradas ou refutadas ao final da pesquisa:

- A estrutura institucional existente em cada país assim como as diferentes dotações de fatores energéticos e produtivos devem influenciar diretamente na forma como são conduzidas as políticas de desenvolvimento e difusão das energias renováveis em cada país analisado;

- A adoção de modelos padronizados e eurocentrados em países com diferentes dotações de recursos energéticos, institucionais e produtivos pode aumentar as desigualdades regionais e aumenta a dependência energética e tecnológica;
- Os arranjos institucionais dos países são um dos fatores determinantes para a transição energética bem-sucedida e alinhada com os objetivos de política traçado pelos seus formuladores.

## OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta tese tem como objetivo analisar, com base nas literaturas teórica e empírica sobre transições sociotécnicas e de *Policy Mix*, o conjunto de políticas públicas e a combinação de instrumentos que contribuem positivamente para a transição energética de baixo carbono, considerando os contextos econômicos, sociais e tecnológicos específicos. Para tanto, foram selecionados três estudos de caso — Alemanha, China e Índia — que compartilham a característica de elevada dependência do carvão em suas matrizes energéticas.

A transição energética, nesse contexto, não deve ser vista como obstáculo ao crescimento, mas como uma oportunidade de redefinir trajetórias de desenvolvimento, promovendo maior eficiência no uso dos recursos nacionais e contribuindo para a superação das desigualdades sociais e regionais.

Para alcançar esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Conduzir uma análise bibliométrica da literatura sobre a transição energética de baixo carbono;
- Identificar e comparar as estratégias políticas e o conjunto de instrumentos adotados pela Alemanha, China e Índia, ressaltando convergências, vantagens e desafios;
- Avaliar os progressos na consolidação de sistemas energéticos de baixo carbono por meio das políticas públicas e seus instrumentos, bem como os fatores que impulsionam ou dificultam esse processo;
- Investigar os aspectos institucionais, os arranjos político-administrativos e a dotação de recursos dos países selecionados que explicam seu desempenho relativo na condução da transição;
- Aplicar o arcabouço teórico-analítico proposto à comparação dos três países selecionados.

A investigação parte da premissa de que a transição energética ocorre em um ambiente sociotécnico dinâmico, no qual as políticas públicas não atuam isoladamente, mas integram sistemas compostos por interações entre tecnologia, sociedade e instituições. Nesse sentido, cada país articula sua transição de acordo com condicionantes históricos, políticos, institucionais, culturais e geográficos, o que implica reconhecer a existência de múltiplas rotas de transformação — não lineares, nem homogêneas.

## METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos desta pesquisa — analisar as políticas públicas e seus respectivos instrumentos que contribuem positivamente para a transição energética de baixo carbono, considerando os contextos econômicos, sociais e tecnológicos específicos — foi adotada uma abordagem metodológica de natureza mista (qualitativa e quantitativa), conforme proposto por Creswell (2007). A combinação de métodos permite captar, de forma mais ampla e integrada, as dimensões histórico-institucionais e empíricas que estruturam os processos de transição energética nos países analisados.

O método qualitativo foi fundamental para construir uma perspectiva histórico-socioeconômica, necessária à compreensão dos contextos políticos e institucionais que moldam as trajetórias nacionais. A abordagem quantitativa, por sua vez, contribuiu para a sistematização dos dados empíricos e possibilitou a comparação entre os casos, conferindo maior robustez às conclusões.

Com o intuito de identificar políticas eficazes na promoção da transição energética, optou-se pela realização de estudos de caso aplicados a três países: Alemanha, China e Índia. Essa escolha metodológica encontra respaldo em Hartley (2004), que destaca a utilidade dos estudos de caso em análises comparativas com referências internacionais cruzadas. Os países selecionados apresentam diferentes capacidades institucionais, arranjos regulatórios e estratégias de transição, embora compartilhem a elevada dependência do carvão em suas matrizes energéticas.

A condução da pesquisa seguiu diferentes etapas. Inicialmente, foi realizada uma revisão histórica para mapear os principais marcos da transição rumo a uma economia de baixo carbono, com ênfase na emergência climática e na evolução conceitual do tema à luz dos relatórios do IPCC. Em seguida, realizou-se uma revisão da literatura especializada, com

destaque para a abordagem sociotécnica e seu papel crescente nos debates sobre mudanças climáticas e inovação em sistemas energéticos. Neste contexto, foram introduzidos os conceitos de TIS e *Policy Mix*, úteis para compreender como diferentes estratégias e instrumentos moldam os sistemas de inovação e suas trajetórias de transformação.

A pesquisa também contou com uma análise bibliométrica, que permitiu identificar áreas consolidadas e lacunas na produção científica recente. Esta etapa contribuiu para o delineamento do referencial teórico e para a formulação de um modelo analítico aplicado na etapa empírica.

Além da metodologia geral da pesquisa, um arcabouço teórico-analítico próprio foi desenvolvido, como um esforço para guiar a análise comparativa entre os países selecionados. Esse modelo combina a estrutura analítica proposta por Li & Taeihagh (2020) com as funções TIS, permitindo avaliar como diferentes políticas públicas contribuem para a transição energética e a descarbonização, com foco nas estratégias adotadas e nos instrumentos mobilizados pelos governos.

O arcabouço formulado é composto por cinco etapas analíticas principais:

1. Identificação dos Objetivos de Política Pública: Análise dos principais objetivos estabelecidos pelos países no contexto da transição energética, como descarbonização, sustentabilidade e segurança de abastecimento.
2. Mapeamento das Estratégias de Políticas Públicas voltadas à Descarbonização: Identificação das principais estratégias adotadas pelos governos para reduzir emissões, fomentar a inovação e ampliar a participação de fontes renováveis.
3. Classificação dos Instrumentos de Política Pública: Avaliação das estratégias quanto à tipologia dos instrumentos utilizados, com base na taxonomia proposta por Hood (1983): nodalidade (informação), autoridade (regulação), tesouro (incentivos financeiros) e organização (infraestrutura e coordenação).
4. Análise do *Policy Mix*: Aplicação do modelo adaptado de Li & Taeihagh (2020) para examinar as relações entre objetivos, estratégias e instrumentos, considerando sua aderência aos pilares de segurança energética, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade.
5. Análise das Funções do TIS: Mapeamento das funções sistêmicas atendidas pelas políticas públicas analisadas, como desenvolvimento de conhecimento, formação de mercado, legitimação ou mobilização de recursos, com o objetivo de evidenciar lacunas e oportunidades para o fortalecimento da inovação no setor energético.

Essa metodologia analítica expandida forneceu os subsídios necessários para compreender como os países estruturam seus sistemas nacionais de transição energética e para avaliar a efetividade de suas políticas públicas. A combinação dos *frameworks* de TIS e *Policy Mix* permitiu ainda identificar desequilíbrios estratégicos, sobreposição de instrumentos e falhas sistêmicas que podem comprometer o avanço da transição energética de baixo carbono.

## DOCUMENTOS E ANÁLISE DE CONTEÚDO

A análise de conteúdo, segundo Bardin (1977), é uma metodologia sistemática e objetiva de descrição e interpretação dos conteúdos das mensagens. Sua relevância está na capacidade de transformar dados brutos em informações organizadas e significativas, permitindo a identificação de padrões, categorias e inferências que possam explicar fenômenos complexos. Essa abordagem possibilita a exploração de dimensões explícitas e implícitas das mensagens contidas nos textos, promovendo uma análise aprofundada das intenções, contextos e significados presentes nos documentos analisados.

Os documentos de políticas públicas para a transição energética e redução do uso do carvão nos países selecionados destacam objetivos prioritários, como a descarbonização, a segurança energética e o desenvolvimento socioeconômico. Esses objetivos são operacionalizados por meio de estratégias que incluem instrumentos regulatórios, financeiros, organizacionais e de planejamento. Entre os principais instrumentos, estão a proibição de novas usinas de carvão, a definição de metas nacionais para eliminação gradual desse combustível, a implementação de precificação de carbono e o financiamento de tecnologias limpas. Além disso, os documentos frequentemente promovem a pesquisa e a inovação tecnológica como ferramentas para acelerar a transição, enquanto reforçam a importância de garantir acessibilidade e equidade para populações vulneráveis afetadas pelo processo.

No contexto da pesquisa sobre transição energética, a análise de conteúdo foi fundamental para compreender as mensagens e conteúdo das políticas públicas e instrumentos regulatórios adotados pelos países estudados. Por meio dela, foi possível categorizar metas, estratégias e compromissos climáticos de países como Alemanha, China e Índia, destacando as particularidades de suas trajetórias. Assim, a análise documental complementou a pesquisa bibliográfica, possibilitando uma exploração mais aprofundada de documentos que serviram

como evidência empírica das políticas públicas de promoção da transição energética de baixo carbono.

## ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está organizada em três capítulos, além da introdução e da conclusão, com o objetivo de analisar as políticas públicas e os instrumentos que contribuem para a transição energética de baixo carbono, considerando os contextos específicos da Alemanha, China e Índia.

A introdução apresenta a contextualização do tema, a delimitação do problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa da escolha dos países analisados, o referencial teórico adotado, a metodologia da pesquisa e o arcabouço analítico formulado.

O Capítulo 1 realiza uma contextualização histórica e política da transição energética e sua articulação com os debates sobre segurança energética, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. O capítulo tem início com a origem das discussões sobre transição energética, destacando o choque do petróleo como marco para o debate sobre o esgotamento dos combustíveis fósseis e a emergência das preocupações ambientais. Em seguida, aborda a evolução da governança climática internacional, com ênfase na Conferência das Partes de Paris (COP 21), em que os líderes mundiais assumiram o compromisso de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C.

O Capítulo 2 desenvolve o referencial teórico da pesquisa, a partir do diálogo entre os arcabouços do *Technological Innovation Systems* (TIS) e *Policy Mix*, com o intuito de construir um modelo analítico para a análise de políticas públicas voltadas à transição energética. O capítulo apresenta uma revisão das contribuições da literatura sobre transições sociotécnicas, enfatizando a interdependência entre inovação tecnológica, transformações sociais e reformas institucionais. A articulação entre os dois arcabouços permite compreender a transição energética como um processo complexo, sistêmico e multinível, no qual as políticas públicas devem atuar como mecanismos de correção de falhas e de indução à inovação. Ao final, propõe-se um arcabouço teórico-analítico que combina as funções do TIS com a estrutura de análise de instrumentos proposta por Hood (1983), aplicada por meio do modelo adaptado de Li & Taeihagh (2020).

O Capítulo 3 aplica esse arcabouço à análise empírica comparativa dos três países selecionados: Alemanha, China e Índia. O objetivo central é mapear e avaliar, desde a década

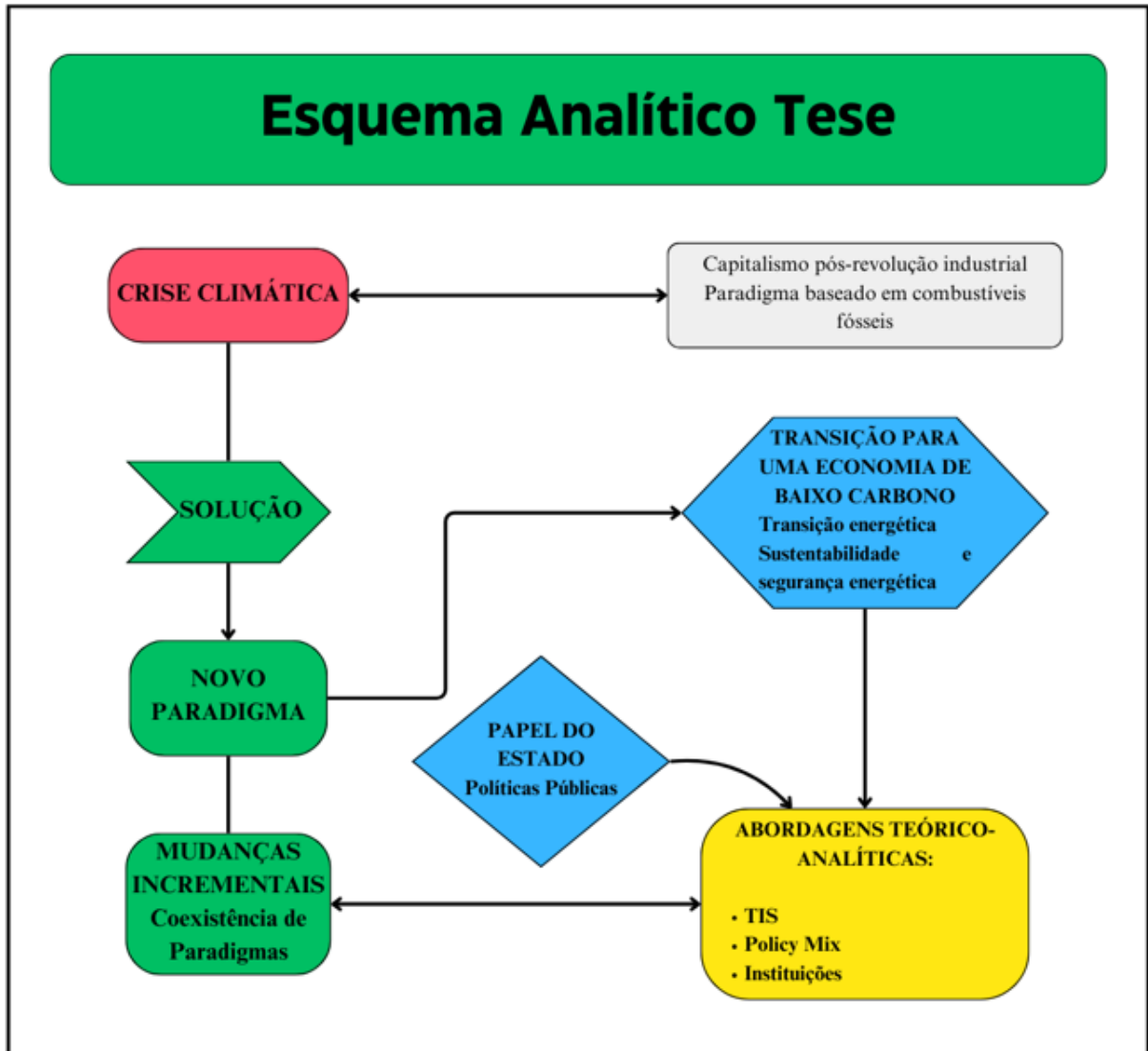
de 1990, a evolução das estratégias de política pública voltadas à transição energética de baixo carbono, considerando as dimensões de densidade, diversidade e intensidade dos instrumentos adotados. A análise examina como cada país avança na descarbonização de suas matrizes energéticas, conciliando segurança de abastecimento, acessibilidade e desenvolvimento socioeconômico, a partir de diferentes configurações institucionais e capacidades estatais. A Alemanha é analisada à luz de sua experiência pioneira com a *Energiewende*; a China, por sua abordagem centralizada e em larga escala na Revolução Energética; e a Índia, como caso de país emergente que enfrenta desafios persistentes relacionados à equidade no acesso à energia.

Por fim, a conclusão sintetiza os principais achados da pesquisa, destacando os avanços observados, os desafios persistentes e as contribuições oferecidas ao campo das políticas públicas e da transição energética. A análise comparativa evidencia que, apesar das diferenças nos arranjos institucionais e nas estratégias adotadas, há uma convergência na centralidade das políticas públicas como indutoras de transformações sociotécnicas para a descarbonização. A seção final também ressalta que a transição energética é condicionada por estruturas estabelecidas — como dependências tecnológicas, dinâmicas de poder e normas sociais — que impõem obstáculos à mudança, reforçando a necessidade de abordagens integradas e multissetoriais, alinhadas com os princípios do desenvolvimento sustentável e da justiça social.

Nesse sentido, a construção de um arcabouço analítico integrado tornou-se fundamental para compreender a complexidade do processo de transição energética em países com elevada dependência do carvão. Ao articular diferentes dimensões — objetivos de política, estratégias e instrumentos, funções sistêmicas e estruturas institucionais —, buscou-se uma abordagem capaz de capturar tanto os elementos técnicos quanto os fatores sociais e políticos que moldam a ação estatal. A Figura 2 apresenta uma síntese desse arcabouço, destacando a conexão entre a crise climática, o papel central das políticas públicas e a necessidade de transições sustentáveis orientadas por inovação, coordenação e justiça socioambiental.

O papel do Estado é central, pois as políticas públicas são os instrumentos-chave para direcionar e acelerar essa transição. As abordagens teórico-analíticas utilizadas: TIS, *Policy Mix* e a análise de instituições – oferecem ferramentas para compreender como as dinâmicas de inovação, os instrumentos políticos e as estruturas institucionais interagem para promover mudanças incrementais e superar barreiras sistêmicas. Esse esquema enfatiza a coexistência de paradigmas durante o processo de transição, refletindo a complexidade de integrar soluções inovadoras a estruturas estabelecidas. Ele resume a revisão teórica ao demonstrar como os arcabouços escolhidos auxiliam na análise do papel das políticas públicas em enfrentar os desafios da crise climática e promover mudanças em direção à sustentabilidade.

Figura 2 - Esquema analítico Tese



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 2 apresenta visualmente os principais elementos que estruturam esta tese, sintetizando a lógica de sua construção analítica. Parte-se da compreensão de que a crise climática resulta de um modelo econômico baseado na queima intensiva de combustíveis fósseis, herança do paradigma industrial moderno. A resposta a essa crise requer a transição para uma economia de baixo carbono, orientada pela sustentabilidade e pela segurança energética. Trata-se de um processo não linear, que tampouco ocorre de maneira espontânea: depende da atuação estratégica do Estado por meio de políticas públicas articuladas e instrumentos coerentes, capazes de promover mudanças graduais e gerir a sobreposição de paradigmas. Nesse sentido, o arcabouço analítico proposto integra as abordagens do *Technological Innovation Systems* (TIS) e do *Policy Mix*, incorporando contribuições da literatura institucional — com ênfase na análise das interações entre políticas e sistemas de

inovação, e em como essas interações moldam o ritmo, a direção e os resultados da transição energética.

## **1 ESTABELECENDO A CENA: A DISCUSSÃO DA TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO**

A origem dos estudos voltados à transição energética está intimamente associada ao conceito de segurança energética, tendo como marco inicial o primeiro choque do petróleo, ocorrido na década de 1970. Esse evento revelou a vulnerabilidade das economias industrializadas frente à dependência de combustíveis fósseis, colocando em evidência a necessidade de diversificação das matrizes energéticas. A partir desse momento, os debates sobre o possível esgotamento dos recursos fósseis passaram a coexistir com preocupações crescentes em torno das questões ambientais, ampliando o escopo das discussões sobre energia para além da segurança e da oferta.

Nesse contexto, o fenômeno das mudanças climáticas emergiu como uma das principais preocupações globais, adquirindo centralidade tanto nos debates científicos quanto nas agendas políticas. Embora seja frequentemente tratado como uma questão técnica, o debate climático é, em grande medida, de natureza política, envolvendo disputas sobre responsabilidades históricas, justiça distributiva e caminhos de desenvolvimento. Um marco fundamental nesse processo foi a 21ª Conferência das Partes (COP 21), realizada em Paris, em 2015. Na ocasião, líderes mundiais firmaram o compromisso de limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C.

O Acordo de Paris representou um avanço importante, porém, o próprio relatório das Nações Unidas (UN, 2015a) já alertava que, àquela altura, os impactos das mudanças climáticas ultrapassavam a capacidade adaptativa de muitos ecossistemas e comunidades humanas. Assim, tornou-se evidente que mitigar os efeitos do aquecimento global exigiria não apenas metas ambiciosas, mas também ações coordenadas entre diferentes escalas de governança — local, nacional e internacional.

Nos anos mais recentes, o desafio tornou-se ainda mais premente. A meta de limitar o aquecimento global a 1,5 °C demanda um ritmo de mitigação sem precedentes históricos, o que implica mudanças estruturais em múltiplos setores simultaneamente. A transição energética, nesse sentido, deve ser compreendida dentro de um arcabouço mais amplo de desenvolvimento sustentável, exigindo abordagens multissistêmicas que integrem transformações nos setores de agricultura, transporte, indústria e energia, entre outros (EDMONDSON, 2020; MEADOWCROFT, 2007).

Cada um desses setores é caracterizado por configurações sociotécnicas complexas, com trajetórias tecnológicas sedimentadas, dependências de trajetória (*path dependencies*) e mecanismos de bloqueio (*lock-ins*), além de estruturas institucionais e dinâmicas de poder profundamente enraizadas. Tais características tornam a implementação de mudanças estruturais um processo altamente desafiador e, muitas vezes, alvo de resistências políticas e sociais.

A crescente complexidade da sociedade moderna, caracterizada pela interconectividade global, pela diversidade de atores com interesses muitas vezes conflitantes, pela multifacetada natureza dos desafios contemporâneos e pela rapidez das transformações, tornou evidente a necessidade de ações conjuntas e mudanças simultâneas em diversos setores. As interações interdependentes entre governos, empresas, organizações e indivíduos, somadas aos impactos globais das mudanças climáticas, reforçam a importância de iniciativas coordenadas e abrangentes capazes de promover transformações em larga escala. Essas ações precisam considerar a interligação dos problemas e a urgência de respostas adaptativas para lidar com desafios sistêmicos que afetam o mundo como um todo.

## 1.1 UMA BREVE DISCUSSÃO DA EVOLUÇÃO HISTÓRICA: COMO SE CHEGOU À EMERGÊNCIA CLIMÁTICA

A transição energética de baixo carbono não é um fenômeno que pode ser conduzido exclusivamente pela ação individual dos Estados. Trata-se de um desafio de escala global, cujos efeitos transbordam fronteiras nacionais e exigem, portanto, um esforço multilateral coordenado. Embora existam pactuações internacionais como o Acordo de Paris, observa-se uma lacuna significativa entre os compromissos assumidos e a implementação efetiva de políticas, sobretudo nos países com maior responsabilidade histórica pelas emissões de gases de efeito estufa (UNFCCC, 2022).

A ausência de mecanismos vinculantes, a insuficiência de financiamento climático e a assimetria nas capacidades institucionais entre países desenvolvidos e em desenvolvimento são obstáculos persistentes para a consolidação de uma governança climática global eficaz. A construção de um arcabouço institucional multilateral mais robusto, capaz de coordenar ações, promover justiça climática e garantir a responsabilização dos compromissos assumidos, torna-se imprescindível para viabilizar uma transição energética justa e sustentável.

Esse cenário revela que a ausência de uma coordenação multilateral efetiva na governança climática compromete não apenas o cumprimento das metas acordadas internacionalmente, mas também o enfrentamento das causas estruturais da crise ambiental. Para compreender as raízes dessa fragilidade, é necessário analisar a trajetória histórica que levou à emergência climática, resgatando os marcos que consolidaram padrões insustentáveis de desenvolvimento e que hoje impõem limites às possibilidades de transformação. A seguir, será apresentada uma discussão sobre como a construção do sistema energético global moldou um modelo de crescimento intensivo em carbono, cujas consequências são sentidas de forma cada vez mais aguda no século XXI.

A forma com que historicamente se deu a construção do sistema energético no mundo alimentou um padrão predatório de desenvolvimento. O crescimento econômico, a urbanização e o padrão de consumo estabelecidos sob a era dos combustíveis fósseis foram os grandes responsáveis pelo atual cenário de emergência climática. Assim, rapidamente se chegou a um ponto em que a poluição no meio ambiente era maior que sua capacidade de absorção (RIPPLE et al., 2020; SOVACOOOL et al., 2020).

A temática de sustentabilidade ganhou destaque na década de 1970, quando as discussões sobre as consequências adversas das mudanças climáticas começaram a adentrar na agenda internacional de forma mais marcante como uma preocupação para o governo nos diferentes níveis de governança no sentido de elaborar políticas que possam incluir esta problemática, uma vez que se tornaria um dos maiores desafios de política o equilíbrio entre desenvolvimento e crescimento econômico e sustentabilidade.

Tais desafios se tornam mais complexos à medida que a emissão de GEEs e as ações antrópicas no meio ambiente aumentaram. Dessa forma, caso haja a completa ausência de ações que busquem a mitigação das consequências dessas dinâmicas, a temperatura do meio ambiente tende a continuar aumentando entre 3,7 °C e 4,8 °C até 2100, de acordo com o IPCC (2007). Entre os possíveis impactos desse cenário estão o agravamento de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, prejuízos à saúde devido a ondas de calor e à queda na qualidade do ar, além da perda de áreas férteis, o que compromete a produção de alimentos e, por consequência, a segurança alimentar, entre outros efeitos.

### **1.1.1 Pactuações multilaterais, desenvolvimento sustentável e a noção de emergência climática**

A emergência climática foi uma pauta que passou a ter destaque nos anos 1970, porém o início de seu debate remete a uma data muito anterior. Em 1909, vários países europeus organizaram o Congresso Internacional de Proteção a Natureza para analisar os progressos da proteção à natureza no continente. A partir dele, propôs-se a criação de um organismo internacional que tivesse como finalidade a proteção à natureza. Assim, em 1913 surge a Comissão Consultiva para a Proteção Internacional da Natureza, que acaba sendo esquecida com o início da Primeira Guerra Mundial. A retomada dos debates sobre a problemática ecológica só foi recuperada no período pós Segunda Guerra Mundial, quando a conscientização sobre a temática da sustentabilidade começou a ser disseminada no mundo especialmente através de Organizações Não-Governamentais (ONGs) (McCORMICK, 1992).

No ano de 1949, ocorreu a Conferência das Nações Unidas para a Conservação dos Recursos Naturais, com o respaldo da UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura), contando com a participação de 49 países. Apesar dos esforços, a conferência terminou sem maior repercussão, uma vez que os holofotes estavam voltados para as tensões pós-guerra, especialmente a Guerra Fria. Mesmo assim, pode-se considerar que as discussões multilaterais sobre temas relacionados à sustentabilidade davam seus primeiros passos. Ainda assim, em alguma medida seu objetivo foi parcialmente alcançado, pois se tornaria a precursora em termos da implementação de uma ideologia a respeito de uma consciência ecológica. Ela levantou questões como a crise dos alimentos, flora, fauna e combustível, a interdependência dos recursos naturais, dentre outros (McCORMICK, 1992).

Contudo, a preocupação com questões ambientais veio efetivamente na década de 1970. Em Estocolmo, na Suécia, ocorreu a 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano ou Conferência de Estocolmo, considerada a primeira conferência internacional com relevância a tratar sobre o tema. Na ocasião, foram destacados os efeitos que a ação antrópica estava ocasionando no meio ambiente, que ameaçavam a existência da humanidade. Contando com a presença de mais de 113 países, tanto desenvolvidos, quanto em desenvolvimento, a Conferência produziu a Declaração sobre o Meio Ambiente Humano, que continha 26 princípios e um Plano de Ação e Princípios, com 109 recomendações. A declaração continha princípios fundamentais para a gestão ambiental e o desenvolvimento sustentável, estabelecendo um equilíbrio entre o progresso econômico, social e a preservação ambiental. Enquanto isso, o Plano de Ações e Princípios convidava os Estados e organismos das Nações

Unidas, assim como as organizações internacionais a cooperarem entre si, com o objetivo de formular soluções para as questões ambientais.

Embora a Declaração de Estocolmo não mencione explicitamente a palavra “energia”, seus princípios fundamentais abrangem aspectos relacionados ao uso sustentável dos recursos energéticos e à mitigação dos impactos ambientais decorrentes de sua exploração e consumo. Dessa forma, ela se tornou o primeiro documento de aplicação não-obrigatória, ou seja, um conjunto de intenções.

Também como resultado da Conferência de Estocolmo e ainda no ano de 1972 houve a criação do UNEP (*United Nations Environment Programme*) ou em português, PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), que concentra seu trabalho em promover ações globais para a proteção ambiental, sendo um dos principais órgãos da ONU que trata de questões ambientais. Dessa forma, ele desempenha um papel fundamental para os países para a “transição para uma economia de baixo carbono e eficiente em termos de recursos, fortalecer a governança e a legislação ambiental, proteger ecossistemas e fornecer dados baseados em evidências para informar decisões de políticas públicas” (UNEP, 2024).

Os debates relativos à conscientização ambiental se estenderam pela década de 1980, acompanhados de grandes desastres naturais, como o desastre nuclear de Chernobyl, em 1986; a explosão de gás em Bhopal, em 1984 e o derramamento de petróleo do Exxon Valdez, no Alasca, em 1989. O Relatório Brundland foi resultado dos trabalhos da Comissão sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela ONU em 1983. Publicado em 1987, ficou conhecido pela popularização do conceito de “desenvolvimento sustentável” como a capacidade existente de atender às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender suas próprias necessidades. A consolidação deste conceito é resultado de esforços que vêm desde os primeiros fóruns que tratavam da proteção ao meio ambiente, nos quais se desejava conjugar um desenvolvimento economicamente viável, que combinasse elementos ecológicos, sociais e culturais. A integração da questão ambiental com o desenvolvimento econômico auxiliaria os governos e diferentes atores a compreenderem as mudanças necessárias sobre a atuação que deveriam ter em diferentes níveis de governança, ao redor do tema sustentabilidade (WECD, 1987).

Além disso, ele descreve que tecnologia e organização social podem ser orientadas para a construção de uma nova forma de se perseguir crescimento econômico. Dessa forma, o desenvolvimento sustentável é descrito como um processo em constante transformação, no qual investimentos, desenvolvimento tecnológico e mudanças institucionais devem acompanhar a evolução desse processo (WECD, 1987).

O Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criado em 1988, constitui o marco inicial de ações coordenadas a nível internacional sobre mudanças climáticas. Ele é o principal alicerce da governança climática global, pois influencia políticas ao avaliar dados e fornecer projeções sobre os impactos das mudanças climáticas e as ações necessárias para mitigá-las, sendo indispensável para a cooperação internacional e a formulação de metas climáticas. O IPCC não realiza pesquisas ou coleta dados próprios, mas seus relatórios são considerados fundamentais para as negociações internacionais relacionadas às mudanças climáticas (IPCC, 2024).

O impacto do Relatório Brundland nos debates ambientais globais é evidente, especialmente no que diz respeito à sua influência nas agendas nacionais e internacionais. Destaca-se que ele serviu como base para a agenda da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como ECO-92 ou Rio-92, realizada no Rio de Janeiro, em 1992. Essa conferência resultou em importantes documentos e convenções, incluindo a Agenda 21, a Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD) e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

A ECO-92, também conhecida como Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, representou um marco fundamental na consolidação das bases do desenvolvimento sustentável. Com a presença expressiva de chefes de Estado, diferentemente das conferências anteriores que se limitavam a representantes diplomáticos, a ECO-92 sinalizou a relevância que o tema ambiental passou a ter na agenda internacional no início da década de 1990.

Ainda durante a ECO-92, foi reconhecida a relevância da questão climática, tendo sido criada a Convenção-quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), na qual seria gerada obrigação de cumprimento dos compromissos estabelecidos a todos os países que forem signatários (denominados Partes da Convenção), tendo como base o princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada.

Embora se espere que todos os países atuem para proteger o meio ambiente e o sistema climático global, é fundamental levar em conta as diferentes realidades, interesses e impactos em cada nação. Inicialmente, a convenção não impôs limites específicos para as emissões de GEEs, nem estabeleceu obrigações vinculantes para seus membros. Em vez disso, previu a possibilidade de revisões graduais, por meio de protocolos, que determinariam metas obrigatórias de emissões para cada país. Essas atualizações são discutidas anualmente durante as reuniões das nações signatárias, conhecidas como Conferências das Partes (COP). Nessas ocasiões, avalia-se o progresso dos países no enfrentamento das mudanças climáticas e

definem-se compromissos para a redução de emissões de GEEs, ainda que muitas vezes esses compromissos não sejam integralmente cumpridos.

Como principal órgão da UNFCCC, a Conferência das Partes (COP) realiza reuniões anuais, sendo as deliberações coletivas e consensuais um aspecto central para o avanço das discussões climáticas. Decisões só podem ser tomadas com a unanimidade dos países signatários, respeitando a soberania de cada um, mas com validade para todos. Ao longo dos anos, as COPs consolidaram-se como um espaço estratégico para a agenda ambiental global, permitindo debates produtivos, a apresentação de novos indicadores e temas relevantes, além da formulação de protocolos de entendimento.

Um marco nesse contexto foi a COP-3, realizada em Kyoto, Japão, em 1997. Durante essa conferência, aprovou-se uma das atualizações mais significativas da convenção-quadro: o Protocolo de Kyoto. Este estabeleceu metas mais rigorosas, com um cronograma para a redução de emissões de GEE, direcionado especialmente aos países desenvolvidos. Esses países se comprometeram a reduzir, no mínimo, 5% das emissões em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012. No entanto, mesmo com sua aprovação em 1997, o protocolo só foi ratificado em 1999 e entrou em vigor em 2005. Isso porque, para sua implementação, era necessário a ratificação de pelo menos 55% dos países, responsáveis por 55% das emissões globais (BRASIL, 1997).

O Protocolo de Kyoto, adotado em 1997, estabeleceu metas obrigatórias para a redução de gases de efeito estufa (GEE) pelos países industrializados, reconhecendo sua maior responsabilidade histórica nas emissões globais. No entanto, sua implementação enfrentou desafios políticos significativos. Em 2001, os Estados Unidos, responsáveis por 36,1% das emissões globais em 1990, retiraram-se do tratado, alegando custos elevados e a exclusão injusta de países em desenvolvimento das obrigações de redução (VIOLA, 2003).

Apesar dessa retirada, a União Europeia assumiu a liderança nas negociações, mobilizando países como Canadá, Noruega, Japão e Suíça a prometerem financiamentos para o desenvolvimento de capacidades institucionais e transferência de tecnologias limpas a partir de 2005 (VIOLA, 2003).

O Protocolo de Kyoto foi pioneiro ao introduzir mecanismos de mercado para a redução de emissões, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Contudo, sua ratificação foi marcada por debates intensos, especialmente devido à retirada dos EUA e às negociações com países como Rússia e China. Essas discussões frequentemente centraram-se na escolha de verbos e expressões que determinavam o grau de obrigatoriedade dos compromissos, refletindo

as diversas opções e restrições de governabilidade dos compromissos assumidos na conferência.

Em 2015, durante a COP21 em Paris, foi estabelecido o Acordo de Paris, que substituiu o Protocolo de Kyoto como principal instrumento internacional para enfrentar as mudanças climáticas. Este acordo introduziu as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), nas quais cada país estabelece voluntariamente suas metas de redução de emissões, considerando suas capacidades e circunstâncias nacionais. O objetivo central é limitar o aumento da temperatura global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitar o aumento a 1,5°C (UN, 2015b).

Para alcançar essas metas, o Acordo de Paris enfatiza a necessidade de transição para fontes de energia renováveis, investimentos em eficiência energética e medidas de reflorestamento, especialmente em áreas tropicais. Essas ações são fundamentais para reduzir as emissões de GEE e mitigar os impactos das mudanças climáticas (UN, 2015b).

De 1992 até os anos 2000, o meio ambiente deixou de ser uma pauta secundária na política global, tornando-se prioritário. O aumento dos debates, encontros e cúpulas voltados para questões ambientais refletiu essa mudança de paradigma. Um exemplo de destaque foi a Assembleia do Milênio, realizada em 2000, na sede das Nações Unidas em Nova York. Esse evento reuniu a segunda maior concentração de chefes de Estado e governo da história até aquele momento (a primeira foi a ECO-92). O principal resultado foi a Declaração do Milênio, um documento abrangente que compilou metas definidas em diversas conferências realizadas ao longo dos anos 1990. Dela surgiram os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), compostos por 8 objetivos, 18 metas e 48 indicadores, a serem atingidos pelos Estados-membros da ONU até 2015.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) surgiram como uma resposta global às crescentes demandas por um modelo de desenvolvimento que equilibrasse as dimensões econômica, social e ambiental. Estabelecidos no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), os ODS foram formalmente adotados em 2015, com a aprovação da Agenda 2030, que reúne 17 objetivos e 169 metas voltadas para a erradicação da pobreza, a proteção do meio ambiente e a promoção do bem-estar global (UN, 2015a).

A construção dos ODS é diretamente influenciada pelos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), que vigoraram entre 2000 e 2015. Os ODM foram criados para enfrentar questões sociais e econômicas urgentes, como a pobreza extrema, a mortalidade infantil e a falta de acesso à educação básica. Apesar dos avanços alcançados, os ODM apresentaram limitações, especialmente no que tange à integração de questões ambientais e à abordagem de

desigualdades globais. Nesse contexto, ficou evidente a necessidade de um conjunto de metas mais abrangente e integrado, capaz de refletir as interconexões entre os desafios globais (SACHS, 2012).

O ponto de partida para os ODS ocorreu na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20), realizada no Rio de Janeiro em 2012. Durante o evento, líderes globais e representantes da sociedade civil reconheceram que era necessário alinhar o desenvolvimento socioeconômico à proteção ambiental de forma mais sistemática. O documento final da conferência, intitulado “O Futuro que Queremos”, estabeleceu as bases para a criação de metas universais voltadas para o desenvolvimento sustentável (UN, 2012).

Entre 2013 e 2015, a ONU organizou um processo participativo e consultivo para definir os ODS. Esse processo foi conduzido pelo Grupo de Trabalho Aberto, formado por representantes de diversos países. Além disso, houve ampla consulta à sociedade civil, ao setor privado, a especialistas e a outras partes interessadas, resultando em um consenso global sobre a importância de metas universais, integradas e inclusivas (UN, 2014).

Finalmente, os ODS foram formalmente adotados na Cúpula de Desenvolvimento Sustentável, realizada em setembro de 2015, em Nova York, com a participação de 193 países-membros da ONU. Ao contrário dos ODM, os ODS possuem caráter universal, aplicando-se a todas as nações, independentemente de seu nível de desenvolvimento. Essa universalidade reflete a compreensão de que os desafios globais estão interligados e exigem esforços coletivos (UN, 2015a).

A estrutura dos ODS enfatiza a integração entre os objetivos, promovendo ações simultâneas em áreas como erradicação da pobreza, saúde, educação, igualdade de gênero, acesso à energia sustentável, ação climática e proteção ambiental. Esse modelo integrado representa uma evolução em relação aos ODM, destacando a interdependência entre o bem-estar humano e a saúde do planeta (UN, 2015a).

A adoção dos ODS e da Agenda 2030 marca um momento histórico no desenvolvimento global, promovendo uma visão de longo prazo e um compromisso coletivo com um futuro sustentável. No contexto das políticas de transição energética de baixo carbono, os ODS fornecem um referencial estratégico, com destaque para os objetivos relacionados à energia acessível e limpa (ODS 7), ação contra a mudança global do clima (ODS 13) e consumo e produção responsáveis (ODS 12), conforme observado na Figura 3.

Figura 3 - Objetivos do desenvolvimento sustentável.



Fonte: UN (2025).

O conceito de desenvolvimento sustentável ganhou força na arena científica e na formulação de políticas públicas, com o objetivo de conciliar crescimento econômico, uso racional dos recursos naturais e preservação ambiental para as gerações futuras. Esse ideal busca propor estratégias que, além de atenderem às necessidades imediatas, sejam capazes de enfrentar o desafio global de promover um equilíbrio entre o desenvolvimento e a sustentabilidade.

Ainda que o discurso de desenvolvimento sustentável tenha conquistado legitimidade e urgência entre os Estados, o grande desafio continua sendo sua implementação prática. Tornar a sustentabilidade um eixo central de políticas públicas e ações concretas exige a transformação dos modelos de produção e o envolvimento de diversos setores da sociedade em projetos voltados para as questões ambientais.

Essa atenção dada à relação entre homem e natureza não surgiu repentinamente, mas é resultado de um processo evolutivo que moldou a construção do ideal de sustentabilidade. Nesse contexto, é interessante observar como as agendas globais de desenvolvimento e seus acontecimentos históricos marcaram a trajetória da preservação ambiental, consolidando-a como um elemento essencial no debate internacional.

Considerando-se as previsões já realizadas pelos estudos mais recentes sobre mudanças climáticas (PNUMA, 2022; UNFCCC, 2023) e o fato de que o principal componente relacionado a elas é a emissão de GEEs, evidencia-se a importância da transição energética de baixo carbono. Se, por um lado, ações coordenadas a nível global têm exercido papel de

destaque nos debates sobre esta temática, por outro, a implementação de um sistema nacional que consiga realizar essa transição de maneira efetiva tem sido um desafio para os governos.

As referidas pesquisas corroboram com a proposição de que para se atingir as metas estabelecidas, uma mudança gradual é insuficiente para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas. Entender a direção para a qual as escolhas relacionadas aos padrões de produção e consumo têm conduzido a sociedade é importante para buscar mecanismos de como os reconfigurar. Tais mudanças devem ocorrer simultaneamente sobre tecnologia, sociedade e instituições, analisados não apenas como atores independentes, mas também na maneira como eles se interrelacionam (GEELS, KERN & CLARK, 2023a; EYRE et al., 2018).

O carvão é usado principalmente para a geração de eletricidade, sendo a fonte de combustível fóssil mais intensiva em carbono atualmente. Os índices de emissão de GEEs são maiores que até mesmo petróleo e gás. Assim, para atingir os objetivos de transição energética de baixo carbono, torna-se indispensável desenvolver políticas capazes de modificar seu uso. Atingir esse objetivo é uma tarefa complexa, uma vez que o carvão representa cerca de um terço da oferta mundial de energia, sendo a fonte de energia mais poluente. Ele é responsável por 40% das emissões de GEEs do setor de energia. Se as plantas de energia de carvão continuarem a funcionar da mesma forma que hoje, as emissões ficarão em um ponto em que o aumento da temperatura do planeta será bem maior que o limite de 1.5°C (IEA, 2024b).

Apesar dos avanços institucionais verificados nas últimas décadas, observa-se que a transição energética de baixo carbono ainda carece de um esforço multilateral robusto e efetivamente coordenado. Muitos compromissos firmados em cúpulas internacionais não são acompanhados da implementação concreta das ações necessárias, sendo frequentemente esvaziados por interesses econômicos nacionais, disputas geopolíticas e assimetrias no acesso a financiamento e tecnologias.

A ausência de mecanismos vinculantes mais rígidos, bem como a fragilidade dos instrumentos de governança global, compromete a coerência e a continuidade das iniciativas voltadas à descarbonização. A fragmentação das estratégias e a prevalência de abordagens unilaterais ou baseadas em compromissos voluntários reduzem o impacto das ações em escala planetária.

Para que a transição energética de fato ocorra em um ritmo compatível com os objetivos climáticos acordados internacionalmente, será necessário fortalecer o arcabouço institucional da governança climática global, promovendo a integração entre os diferentes níveis de ação (local, nacional e internacional), o compartilhamento de tecnologias e recursos, e a construção de mecanismos redistributivos que permitam maior equidade na execução das ações climáticas.

Mais do que iniciativas isoladas, a transição energética exige um pacto global estruturado, capaz de alinhar interesses divergentes em torno de um objetivo comum: assegurar um futuro sustentável para todas as nações. Nesse sentido, ampliar a cooperação internacional, fomentar mecanismos multilaterais de apoio e garantir a responsabilização dos compromissos assumidos torna-se essencial para enfrentar a magnitude do desafio climático atual.

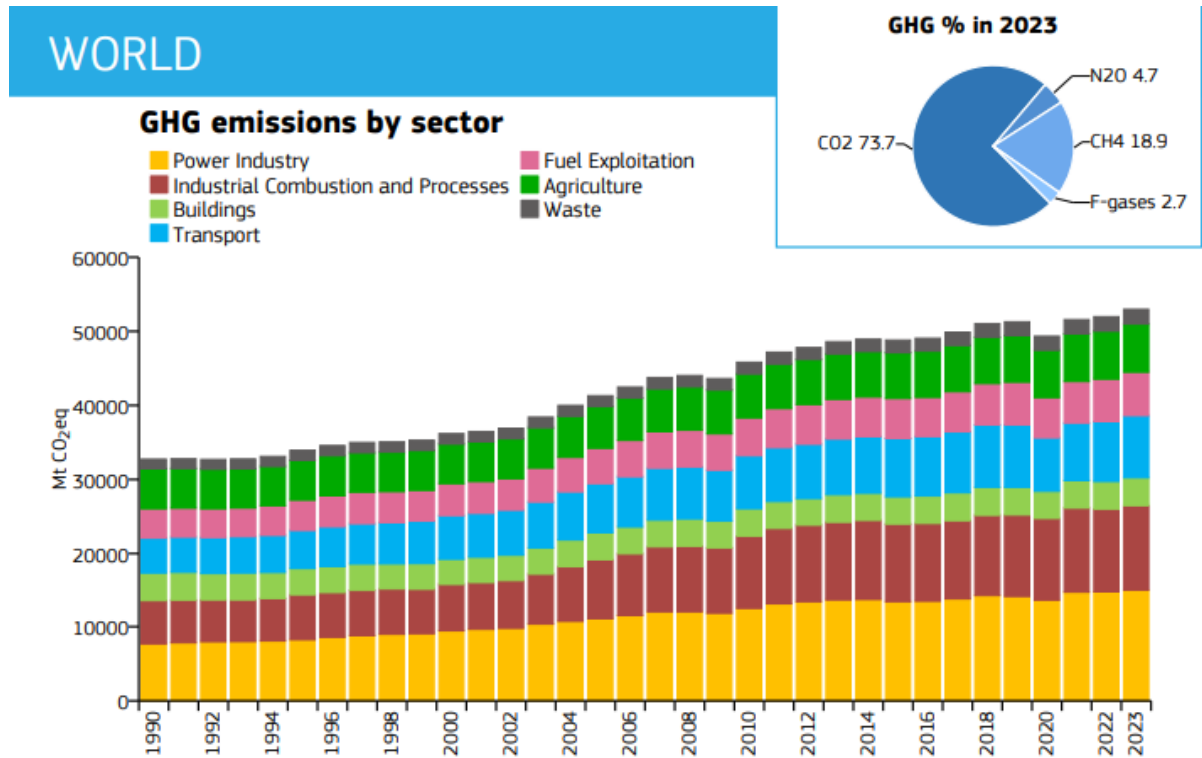
Em síntese, a transição energética de baixo carbono requer, de forma inadiável, um novo patamar de coordenação multilateral que vá além dos acordos não vinculantes e dos compromissos voluntários. A trajetória atual, ainda marcada por iniciativas fragmentadas, revela que a ausência de um esforço global robusto e articulado compromete a eficácia das ações de mitigação e adaptação climática. A experiência das últimas décadas demonstra que, sem uma governança climática mais coesa e mecanismos internacionais de responsabilização, os avanços permanecerão aquém do necessário.

### **1.1.2 Transição energética: a dependência do carvão e a centralidade dos GEEs.**

Na era pré-industrial as emissões de GEEs eram relativamente baixas e provenientes majoritariamente de fontes naturais. O desmatamento para a prática da agricultura foi uma das primeiras formas de intervenção humana responsáveis pela modificação da paisagem natural (THEOBALD et al., 2020). Até hoje, as emissões oriundas das práticas agropecuárias são muito relevantes nas emissões de GEEs (IEA, IRENA & UNCC HLC, 2023). Em que pese sejam muito relevantes, o foco desta pesquisa é circunscrito às emissões de carbono oriundas do setor de energia.

Como é possível observar na Figura 4, o setor de energia é um dos maiores emissores de GEEs, quando analisados os dados sob uma perspectiva global. Vale enfatizar que cada país guarda suas peculiaridades, como por exemplo o Brasil, país no qual a agricultura e o uso do solo têm maior parcela de contribuição nesta estatística. Isto porque, a matriz energética do país é relativamente limpa, composta por 47,4% de renováveis, em grande parte devido a presença de hidrelétricas. Por isso, quaisquer políticas que visem a transição energética de baixo carbono devem levar em consideração as características específicas de cada país. (IEA, IRENA & UNCC HLC, 2023; IRENA, 2023b).

Figura 4 - Emissão de GEEs no mundo, por setor (1990-2023).



Fonte: CRIPPA et al. (2024).

A descarbonização do setor energético deve ser um objetivo a ser perseguido, uma vez que existe uma relação direta entre o crescimento do PIB e o uso de energia (BURKE & CSEREKLYEI, 2016; SALARI, JAVID & NOGHANIBEHAMBARI, 2020). A Tabela 1 ilustra o impacto das emissões de GEEs do setor de energia, que juntamente com o industrial detém os maiores percentuais de aumento nas emissões, desde os anos 1990. Tal fato corrobora com a assertiva de que a transição energética deve ser realizada para que a transição para uma economia de baixo carbono seja bem-sucedida.

Tabela 1 - Aumento na emissão de GEEs

Setor/Ano	2023 vs. 1990	2023 vs. 2005	2023 vs. 2022
Indústria de energia	96%	36%	2%
Combustão e processos industriais	91%	41%	2%
Construção	1%	3%	1%
Transporte	78%	26%	4%
Exploração de combustível	48%	23%	2%
Agricultura	20%	15%	0%
Resíduos	56%	37%	2%
Todos os setores	62%	28%	2%

Fonte: CRIPPA et al. (2024). Adaptado.

No século XIX surgiram os primeiros estudos sobre os impactos do aumento na emissão de GEEs na atmosfera, tendo como consequência imediata o aumento da temperatura global (ARRHENIUS, 1896). Dessa forma, considera-se inequívoco o raciocínio de que o atual padrão de crescimento adotado pela economia está pautado em uma estrutura baseada majoritariamente por combustíveis fósseis. No estudo realizado pelo IPCC (2023a), tem-se que a ação humana, combinada com as tecnologias existentes é a principal responsável pelo fenômeno das mudanças climáticas. Além do aumento da temperatura na atmosfera, houve grande impacto nos oceanos e no solo.

Apesar de a mudança climática resultar da interação complexa de processos físico-químicos, sua causa derradeira é socioeconômica: a queima de combustíveis fósseis, base fundamental do crescimento econômico a partir do século XIX. Dessa forma, a formulação de políticas deve ser idealizada não apenas como uma simples ferramenta de controle de emissões, mas deve considerar a compreensão de dinâmicas geofísicas e socioeconômicas. A partir desta análise, seria possível a formulação de mecanismos que garantam políticas de emissão e controle razoavelmente eficientes e efetivas, que possam modificar significativamente a matriz energética global, evitando resultados catastróficos para a humanidade (NORDHAUS, 2013).

Foi no século XX que os debates relacionados às mudanças climáticas ganharam força. O processo de industrialização, juntamente com o crescimento populacional, foram os principais catalisadores dos impactos ambientais e se tornaram visíveis de forma material no ar, na água, no solo e nos ecossistemas naturais. A partir daí, vários marcos contribuíram para que os debates sobre as questões relacionadas a emergência da agenda climática ganhassem espaço na agenda nacional e internacional, como descritos na seção anterior (IPCC, 2023).

O Quadro 1 sintetiza os principais aspectos que cada relatório do IPCC trata sobre a transição energética. Eles constituem a principal fonte de informação para as grandes negociações internacionais, como a Conferência das Partes, realizadas anualmente.

Quadro 1 - Quadro síntese - Relatórios do IPCC

<b>Relatório</b>	<b>Aspectos tratados sobre transição energética</b>
<b>1º Relatório (1990)</b>	Realiza uma abordagem introdutória e traz as bases para discussões futuras sobre transição energética. Relata a preocupação sobre a emissão de GEEs, resultado das ações humanas e analisa os impactos do aquecimento global. Discute a necessidade de ações concertadas a nível global para mitigar emissões e trata pela primeira vez os impactos potenciais das mudanças climáticas nas economias e sociedades. Incentiva a realização de mudanças tecnológicas (discutindo as alternativas energéticas renováveis) e comportamentais para mitigar esses impactos, mas ainda não define uma estratégia clara de transição energética.
<b>2º Relatório (1995)</b>	Foca em estratégias de mitigação e adaptação, considerando políticas e tecnologias para reduzir gases de efeito estufa. Trata da necessidade de descarbonizar o sistema, seja por meio de novas tecnologias, eficiência energética ou conservação. Destaca-se o papel da eficiência energética e das fontes renováveis como parte de uma estratégia de longo prazo para diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Descreve a necessidade de trocar o carvão por petróleo ou gás natural, uma vez que o primeiro é a fonte de energia mais poluente que as demais.
<b>3º Relatório (2001)</b>	Reforça a urgência da transição energética, explorando o potencial técnico e econômico de várias alternativas, como energias renováveis e tecnologias de captura de carbono. Introduce a necessidade de integração entre mitigação e desenvolvimento sustentável. Trata pela primeira vez de forma explícita sobre a necessidade de formulação de políticas de apoio à transição energética, recomendando políticas de subsídio, impostos sobre o carbono e regulamentações que incentivem práticas sustentáveis.
<b>4º Relatório (2007)</b>	Assim como nos outros relatórios, segue reafirmando a necessidade de descarbonização do sistema através da eficiência energética. Expande a discussão sobre mitigação com um foco mais robusto nas fontes renováveis e na eletrificação como ferramentas para uma economia de baixo carbono. Salienta a interdependência entre mitigação, adaptação e desenvolvimento sustentável e promove o conceito de "desenvolvimento resiliente".
<b>5º Relatório (2014)</b>	Aborda a transição energética em três frentes: viabilidade econômica, políticas públicas e inovações tecnológicas. Esse relatório enfatiza as crescentes disparidades regionais e a importância de um apoio estruturado para países em desenvolvimento na transição para energia limpa.

**6º Relatório (2023)**

Detalha ações transformativas para a transição energética, incluindo sistemas resilientes e desenvolvimento sustentável. Foca em "caminhos de desenvolvimento resiliente", destacando a importância da adaptação climática em conjunto com a transição para fontes de energia de baixo carbono.

Fonte: IPCC (1992; 1995; 2001; 2007; 2014 e 2023)

O primeiro relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 1992, destacou as bases científicas para entender as mudanças climáticas, os impactos potenciais e as estratégias de resposta. Ele confirmou que as emissões de gases de efeito estufa decorrentes de atividades humanas estavam aumentando e poderiam levar ao aquecimento global e à elevação do nível do mar. Foi enfatizada a necessidade de uma abordagem integrada para mitigação e adaptação, considerando o papel das políticas internacionais (IPCC, 1992).

O segundo relatório de Avaliação do IPCC, publicado em 1995, forneceu evidências de que as atividades humanas estavam influenciando o clima global, principalmente devido às emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa. Ele abordou questões de equidade, sustentabilidade e impactos sociais, enfatizando a importância de políticas e tecnologias para mitigação e adaptação, bem como os desafios econômicos e sociais relacionados (IPCC, 1995).

O terceiro relatório de Avaliação do IPCC consolidou os conhecimentos sobre as mudanças climáticas observadas e previstas, os impactos potenciais em sistemas ecológicos e socioeconômicos e as opções de mitigação. Este relatório introduziu o conceito de "inércia climática", ressaltando a necessidade de ações imediatas para limitar os impactos de longo prazo (IPCC, 2001).

O quarto relatório de avaliação, publicado em 2007, enfatizou a evidência inequívoca das mudanças climáticas provocadas por atividades humanas. Detalhou os impactos regionais, os riscos futuros e as oportunidades para adaptação e mitigação. Também destacou a relação entre desenvolvimento sustentável e respostas climáticas, promovendo uma abordagem integrada para enfrentar o desafio (IPCC, 2007).

O quinto relatório de avaliação reforçou a compreensão científica das mudanças climáticas, destacando a crescente influência humana e os impactos já observados. Ele enfatizou que limitar o aquecimento a 2°C exige ações urgentes e profundas, combinando esforços de mitigação e adaptação com oportunidades de desenvolvimento sustentável (IPCC, 2014).

O sexto relatório de avaliação, publicado em 2023, atualizou as informações sobre os impactos, riscos e respostas às mudanças climáticas em um contexto de desenvolvimento sustentável. De modo geral, destacou a necessidade de ações transformadoras, considerando as

interdependências entre clima, biodiversidade e sociedades humanas. Enfatizou a importância da equidade e da justiça nas estratégias de adaptação e mitigação. Além disso, destacou a importância de colocar as mudanças em prática em 2025 e acelerar os resultados antes de 2030. Destaca que há uma janela temporal pequena para se evitar colapsos e que a forma mais segura de fazê-lo é através da transição social, que inclui a transição energética (apesar de ir além dela). Assim, ele recomenda modificar as políticas atuais e incentivar a transição neste segmento, continuando a ênfase na redução de GEEs. Também apresentou cinco cenários de aumento na temperatura, que poderia chegar até mesmo a 4,4°C, caso haja um desenvolvimento maciço dos combustíveis fósseis (IPCC, 2023; SOLÉ, 2023).

### **1.1.3 Os desafios de uma transição justa: segurança de abastecimento energético, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade.**

Para Hallack et al. (2023), a transição energética é um processo complexo, no qual as diferentes fontes de energia irão coexistir por um longo período. Atualmente, observa-se que a transição está pautada na sustentabilidade (especialmente nas questões climáticas), mas também se preocupa em tentar manter uma segurança no abastecimento a preços acessíveis. Tal fato tende a ser ainda mais importante para países em desenvolvimento, que possuem alta demanda por energia, porém uma disponibilidade de pagamento reduzida. Nesse sentido, a transição seria uma oportunidade para alcançar metas de descarbonização e cumprir acordos firmados internacionalmente, mas representaria uma oportunidade para uma reconfiguração das cadeias produtivas do setor.

O conceito de trilema energético é uma abordagem analítica desenvolvida para compreender os desafios intrínsecos à formulação de políticas energéticas sustentáveis, capazes de equilibrar três dimensões interdependentes: segurança energética, sustentabilidade ambiental e acessibilidade econômica. Essa formulação surge da necessidade de superar as tensões entre demandas competitivas de sistemas energéticos modernos, especialmente no contexto da transição energética global (WEC, 2022).

A segurança energética refere-se à capacidade de assegurar um fornecimento contínuo e confiável de energia para atender às necessidades sociais e econômicas. Esse pilar é frequentemente associado à diversificação das fontes de energia, à redução da dependência de importações de combustíveis fósseis e ao fortalecimento da resiliência de infraestruturas energéticas frente a choques externos. Sovacool et al. (2011) destacam que, em sistemas sociotécnicos, a segurança energética não é apenas uma questão técnica, mas também política,

uma vez que envolve disputas geopolíticas, regulação governamental e questões estratégicas relacionadas à estabilidade dos mercados globais de energia.

A sustentabilidade ambiental, por sua vez, enfatiza a necessidade de descarbonizar as matrizes energéticas, reduzindo emissões de gases de efeito estufa (GEE) e mitigando os impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, políticas voltadas para a sustentabilidade exigem mudanças estruturais nos sistemas energéticos, o que inclui a substituição gradual de combustíveis fósseis e a promoção de tecnologias limpas, além da integração de mecanismos financeiros que internalizem custos ambientais (IEA, 2022a).

Já a acessibilidade econômica abrange a disponibilidade de energia a preços competitivos, garantindo que o fornecimento seja economicamente viável tanto para consumidores quanto para governos e indústrias. Esse componente do trilema é especialmente relevante em economias emergentes, onde o aumento dos custos energéticos pode ampliar desigualdades socioeconômicas. A acessibilidade está relacionada à transição justa, conceito que busca equilibrar a modernização de sistemas energéticos com a proteção de comunidades dependentes de setores emissores, como a indústria do carvão (WEC, 2012).

Embora cada dimensão do trilema energético tenha objetivos claros, o desafio está na interação entre elas, pois avanços em uma área podem gerar comprometimentos em outra. Por exemplo, a adoção de tecnologias renováveis pode inicialmente elevar os custos energéticos, dificultando a acessibilidade, enquanto esforços para garantir energia barata podem perpetuar o uso de combustíveis fósseis, comprometendo a sustentabilidade. Assim, o trilema energético demanda soluções que integrem políticas públicas, inovação tecnológica, mecanismos de financiamento climático e governança global, com o objetivo de criar um sistema energético resiliente, inclusivo e sustentável (WEC, 2022).

Para que se possa ter a compreensão correta da economia capitalista, Jacobs & Mazzucato (2016) questionam a maneira como a economia ortodoxa<sup>1</sup> explica de que modo será possível a manutenção de crescimento sustentável, a partir dos acontecimentos da crise de 2008. O fraco desempenho da economia seria explicado por três motivos: o crescimento frágil e instável, padrões de vida estagnados com desigualdade crescente, mudanças climáticas e risco ambiental. A questão ambiental é tratada como um dos principais desafios enfrentados pela economia capitalista, sendo a emissão crescente dos GEEs uma ameaça para a sustentabilidade ambiental e econômica global. Dessa forma, seria necessária uma profunda transformação nos sistemas produtivos e de consumo, assim como no padrão de energia utilizado para que seja

---

<sup>1</sup> Pode-se compreender a economia ortodoxa como um conjunto prático e teórico da economia, que segue as tradições estabelecidas pelo pensamento econômico dominante, especialmente o neoclássico.

possível limitar o aquecimento global e buscar a construção de uma economia sustentável. O papel do Estado nesse processo deve ir além da participação na inovação básica, da mera correção de falhas de mercado.

Deve-se levar em consideração que a transição de um paradigma sociotécnico para outro também envolve mudanças nas estruturas de poder estabelecidas, que não ocorrem sem algum nível de resistência. Geels, Kern & Clark (2023b), analisam como o processo de transição deve afetar o interesse de grandes corporações já estabelecidas dentro do padrão tecnológico existente.

A formulação e implementação de políticas que permitam a existência de uma matriz energética dominada majoritariamente por renováveis é um objetivo que deverá ser perseguido nos próximos anos. Além dos passivos ambientais, garantir a estabilidade do país, em um mundo cada vez mais intensivo em energia, pode ser considerado estratégico para que ele consiga manter uma trajetória positiva de crescimento e desenvolvimento.

Uma das principais barreiras para a expansão das fontes de energias renováveis diz respeito a estrutura previamente estabelecida como a infraestrutura física, políticas e instituições. Em outras palavras, uma transição de um paradigma energético baseado em combustíveis fósseis, para um baseado em energias renováveis, implica um alto custo financeiro e estratégico envolvido nesse processo.

O paradigma energético vigente, caracterizado pela predominância de combustíveis fósseis, apresenta diversos dilemas para os formuladores de política. Pinto Junior et al. (2016) destacam que o Estado, ao implementar uma política, precisa equilibrar a segurança no abastecimento de energia e incluir em sua agenda elementos relacionados à sustentabilidade ambiental, eficiência e inovações tecnológicas.

No contexto da transição energética, existem três questões que precisam ser levadas em consideração ao se pensar em políticas que tenham como objetivo essa finalidade: os custos associados à transição e os impactos quanto à segurança energética; a forma como esses custos serão distribuídos na sociedade e entre países e regiões e a maneira como a redução de custos está associada com as transformações tecnológicas e a mudança nos padrões de consumo e produção de energia (PINTO JUNIOR et al., 2016).

Para Khan et al. (2022), pensar em um equilíbrio para o “trilema energético” - segurança energética, equidade energética e sustentabilidade - tem sido um desafio para os governos. Através de análise empírica, os autores demonstram que a promoção do equilíbrio pode promover crescimento econômico e sustentabilidade a longo prazo.

Os problemas climáticos enfrentados atualmente são produtos de um processo histórico, principalmente na maneira como foi estabelecida a dinâmica entre sociedade e crescimento econômico. À medida que se buscava alcançar melhores resultados, a fórmula encontrada para a consecução desse objetivo foi o desenvolvimento de tecnologias baseadas no petróleo e intensivas na emissão de GEEs. Consequentemente, todo o arranjo produtivo e institucional da economia a partir da industrialização foi construído sobre esse paradigma.

De acordo com IRENA (2023a), para que seja possível superar as barreiras para a transição, são necessários um conjunto de medidas tanto reativas, quanto proativas. Além disso, também ressalta a importância em se superar as antigas estruturas baseadas nos combustíveis fósseis. São três as principais categorias nos quais se dividem tais barreiras: infraestrutura, políticas/regulações e conhecimento técnico/capacidade institucional.

Barreiras referentes a infraestrutura se referem a gargalos existentes entre a geração de energia renovável e a sua utilização pelo consumidor final. Além disso, também englobam os problemas enfrentados na infraestrutura de distribuição e na ausência de estrutura do consumidor final para utilizar este tipo de tecnologia. Para superá-las, seria necessário que houvesse um planejamento visando a modernização e expansão de infraestrutura necessária para impulsionar o desenvolvimento da cadeia dos renováveis como um todo (distribuição, armazenamento, consumo e transmissão) (IRENA, 2023a).

Barreiras referentes a políticas e regulações dizem respeito a marcos regulatórios formulados para um contexto no qual os combustíveis fósseis são a principal fonte da matriz energética existente e na falta de financiamento público para a transição de energia. A formulação de políticas integradas entre produção e consumo e a atenção insuficiente para a dimensão socioeconômica, incluindo a falta de políticas industriais para viabilizar cadeias de abastecimento, também são questões importantes a serem superadas dentro deste cenário. Para superar tais problemas, o governo deve buscar desenvolver políticas e regulações que facilitem a integração, implantação e comércio de fontes renováveis de energia, melhorar os retornos socioeconômicos e ambientais e promover equidade e inclusão. Dessa forma, tais escolhas de política possibilitariam a transição da dimensão local à global, refletindo a nova dinâmica de oferta e demanda (IRENA, 2023a).

Conhecimento técnico e capacidade institucional constituem a terceira categoria de barreira à transição. Isto porque, existe a preocupação de que diversos postos de trabalho relacionados aos combustíveis fósseis serão perdidos e não serão plenamente substituídos pelos renováveis. Novos padrões de empregos são criados e novas oportunidades surgem com potencial de melhorar a qualidade de vida da população em geral. Contudo, existe a

preocupação de que haverá falta de mão de obra especializada, uma vez que existem diferenças consideráveis entre as capacitações necessárias entre os postos de trabalho antigos e novos. Para superar este gargalo, espera-se que haja coordenação entre indústria e organizações educacionais, objetivando capacitar indivíduos, comunidades e instituições, para que haja um processo de transição bem-sucedida (IRENA, 2023a).

Tanto a barreira tecnológica, quanto a barreira física, descritas até aqui, são importantes entraves para uma transição bem-sucedida. Muitas tecnologias já foram amplamente desenvolvidas, possibilitando redução dos custos da energia geradas a partir de fontes renováveis. Nesse sentido, um dos maiores gargalos enfrentados na atualidade diz respeito a como os formuladores de política podem conduzir esse processo de transição, especialmente através de instrumentos que possibilitem o aumento do consumo e integração entre as fontes de energia. Nesse sentido, deve-se ressaltar a importância que possuem as políticas e as estratégias regulatórias formuladas com o intuito de serem facilitadores desse processo (IRENA, 2023a).

A transformação de uma matriz energética intensiva em carbono para uma matriz energética baseada em renováveis requer uma análise que vai muito além das condições climáticas e tecnológicas. Perpassa por uma análise que deve considerar o contexto socioeconômico no qual está inserido o país em análise, bem como a forma como as políticas de incentivo foram desenvolvidas. Nesse sentido, a combinação entre políticas de desenvolvimento tecnológico e de implementação de uma matriz energética menos intensiva em carbono e instrumentos regulatórios é fundamental para que seja possível a viabilização de uma matriz integrada e que tenha percentuais de participação cada vez maiores de renováveis (GEELS, KERN & CLARK, 2024a; 2024b).

Não se pode deixar de levar em conta o aspecto político como fator de dificuldade de se concretizar o instrumento de transição, devido aos altos investimentos já realizados na matriz baseada no petróleo. Os grandes investimentos realizados na infraestrutura pré-existente, aliados ao alto custo para implementar mudanças, inclusive para o desenvolvimento das novas tecnologias menos intensivas em carbono, são desafios que estão presentes no cotidiano dos formuladores de políticas. Em outras palavras, coordenar instrumentos políticos e tecnológicos em prol de um objetivo comum – a transição para uma matriz baseada em renováveis – requer que não sejam negligenciadas as especificidades de cada país. Isto porque, cada um deles possui diferentes padrões geográficos, desenvolvimentos tecnológicos, institucionais e socioeconômicos (GEELS, KERN & CLARK, 2024a; 2024b).

Ainda que a transição energética de baixo carbono represente um imperativo em escala global, e que iniciativas multilaterais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável, tenham buscado estabelecer diretrizes comuns, sua concretização ocorre fundamentalmente no âmbito nacional. Cabe aos Estados a responsabilidade de formular e implementar políticas públicas que traduzam esses compromissos em ações concretas, compatíveis com suas condições econômicas, institucionais, tecnológicas e socioculturais. Nesse sentido, o desafio central não está apenas na construção de consensos internacionais, mas na capacidade de cada país de realizar escolhas políticas alinhadas às especificidades de seu contexto.

Esse processo decisório, no entanto, não se dá em um vácuo técnico ou administrativo. Ao contrário, envolve disputas entre atores diversos, interesses conflitantes e estruturas de poder profundamente enraizadas. As decisões relativas ao ritmo da transição, às fontes priorizadas, aos setores protegidos ou reconfigurados, e aos grupos sociais contemplados variam conforme o país, evidenciando a existência de diferentes trajetórias nacionais. Em outras palavras, ainda que a pressão por transformações seja global, os conflitos e impasses são eminentemente locais e refletem dilemas estruturais específicos, como a manutenção de empregos em setores emissores, o custo político de reformas ou a disputa por acesso a tecnologias estratégicas.

A coordenação multilateral para a transição energética de baixo carbono enfrenta obstáculos significativos, especialmente diante da heterogeneidade de interesses nacionais, das assimetrias de capacidades institucionais e das desigualdades históricas na responsabilidade e nos impactos das mudanças climáticas. Embora acordos como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável constituam avanços importantes ao estabelecerem metas globais comuns, sua efetividade depende da internalização voluntária dessas metas nos marcos nacionais. A ausência de mecanismos coercitivos e a fragmentação das instâncias decisórias internacionais dificultam a construção de uma governança climática global coesa. Ainda assim, a coordenação multilateral permanece essencial, pois oferece uma orientação normativa e uma base de cooperação que estimula compromissos internos mais ambiciosos, promove o intercâmbio de experiências e reduz incertezas políticas e tecnológicas associadas às transições energéticas.

Em paralelo, é no plano nacional que as políticas públicas ganham concretude, sendo moldadas pelas condições econômicas, institucionais e socioculturais específicas de cada país. A complexidade das transições energéticas exige arranjos institucionais que articulem múltiplos atores e escalas de governança, bem como uma coordenação intersetorial eficaz, o que pressupõe capacidades estatais robustas (ROGGE; REICHARDT, 2016). Nesse contexto, embora o arcabouço internacional forneça diretrizes e referências importantes, é a ação nacional

que determina o ritmo, a direção e os resultados da transição. A tensão entre orientações multilaterais e implementações locais revela, portanto, a necessidade de abordagens analíticas que considerem simultaneamente os níveis global e doméstico. Reforça-se, assim, que a coordenação internacional não substitui a ação local, mas a potencializa, fornecendo legitimidade, estabilidade e orientação estratégica em um cenário global caracterizado por incertezas e disputas.

Outro elemento crucial é que os *trade-offs* da transição energética — como a conciliação entre sustentabilidade, segurança energética e acessibilidade — adquirem contornos distintos conforme o contexto analisado. Em economias emergentes, por exemplo, garantir acesso universal à energia a preços compatíveis com a renda da população pode ser tão prioritário quanto mitigar emissões. Já em países desenvolvidos, os desafios podem envolver a modernização da infraestrutura existente ou a descarbonização de setores altamente intensivos em carbono. Assim, os custos e benefícios da transição são distribuídos de maneira desigual entre os países e dentro deles, o que impõe a necessidade de políticas que considerem as especificidades locais para não reproduzir injustiças sociais e econômicas.

Diante desse cenário, torna-se fundamental analisar como diferentes países, mesmo partindo de um ponto comum — a elevada dependência do carvão —, têm construído suas trajetórias rumo a sistemas energéticos de baixo carbono. As estratégias e instrumentos adotados, os arranjos institucionais mobilizados e os ritmos de transição revelam não apenas diferenças contextuais, mas também escolhas políticas deliberadas que moldam os caminhos possíveis. Essa análise comparativa é o que se propõe nos capítulos seguintes, a partir dos casos da Alemanha, China e Índia.

O presente capítulo ofereceu uma contextualização histórica e política acerca da transição energética de baixo carbono, com foco na emergência climática, nas barreiras estruturais e nas pactuações multilaterais que moldaram a trajetória das políticas globais. A análise revelou como os sistemas energéticos, profundamente enraizados em paradigmas baseados em combustíveis fósseis, contribuíram para um padrão de desenvolvimento insustentável, ressaltando a urgência de uma transição energética capaz de conciliar sustentabilidade ambiental, segurança energética e acessibilidade.

Destacou-se como o fenômeno das mudanças climáticas ultrapassou o domínio técnico, tornando-se também uma questão política, dependente de ações coordenadas em diferentes níveis de governança. Pactos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, representaram importantes avanços no alinhamento de compromissos globais, mas enfrentam

limitações significativas em termos de implementação prática, especialmente em países com diferentes capacidades institucionais e socioeconômicas.

Além disso, foi abordada a complexidade inerente à transição energética de baixo carbono, que requer não apenas avanços tecnológicos, mas também mudanças nas estruturas institucionais e sociais. Esse contexto expõe os desafios associados às dependências de trajetória, *lock-ins* tecnológicos e dinâmicas de poder, que dificultam a adoção de políticas inovadoras e disruptivas (MARKAD, RAVEN & TRUFFER, 2012).

Nesse cenário, o Capítulo 2 assume o papel de avançar a discussão teórica, introduzindo os arcabouços analíticos do *Policy Mix* e do TIS. Esses *frameworks* serão utilizados para estruturar a análise das políticas e instrumentos que podem impulsionar a transição energética, fornecendo uma lente sistemática para compreender as interações entre inovação tecnológica, mudanças sociais e reformas institucionais.

Enquanto o Capítulo 1 estabeleceu as bases históricas e políticas, o Capítulo 2 se propõe a explorar como os conceitos teóricos podem ser aplicados para entender e superar os desafios destacados. Assim, a transição energética será abordada não apenas como um objetivo ambiental, mas como uma transformação sistêmica, que exige intervenções coordenadas em múltiplas dimensões. Essa abordagem integrativa será aprofundada nos capítulos subsequentes, culminando em uma análise empírica comparativa que investigará como Alemanha, China e Índia têm articulado políticas e instrumentos para promover a descarbonização de suas matrizes energéticas.

## 2 BASES TEÓRICAS E METODOLÓGICAS PARA A ANÁLISE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO

Esta seção tem como objetivo construir os fundamentos teóricos desta pesquisa, realizando uma revisão acerca da literatura que analisa as transições sociotécnicas, a partir de uma perspectiva sistêmica. Tal abordagem permite compreender a complexidade dos processos de transformação nos sistemas de energia, destacando a interdependência entre fatores tecnológicos, institucionais, econômicos e sociais. A partir dessa revisão crítica, será desenvolvido um arcabouço analítico que servirá como instrumento para a análise dos estudos de caso referentes ao grupo de países selecionado, permitindo uma avaliação comparativa das estratégias adotadas em seus respectivos processos de transição energética.

Partindo desse marco analítico, esta tese propõe-se a contribuir para o aprofundamento dos estudos voltados à transição para uma economia de baixo carbono. Ao lançar mão de uma abordagem ampliada do conceito de *Policy Mix*, busca-se ressaltar o papel central das políticas públicas como elemento estruturante dessas transições, oferecendo subsídios teóricos e analíticos que possam apoiar a formulação de estratégias mais coerentes, eficazes e alinhadas aos contextos específicos enfrentados pelos formuladores de políticas.

Esse debate torna-se ainda mais relevante diante do agravamento das crises climáticas, intensificadas nas últimas décadas em função de um modelo de crescimento econômico sustentado por padrões de produção e consumo altamente emissores de GEEs. Como ressaltado no capítulo anterior, esse processo evidenciou falhas estruturais nos sistemas socioeconômicos, levando reguladores e formuladores de políticas a buscar estratégias capazes de mitigar os riscos sistêmicos gerados por esse padrão de desenvolvimento (JACOBS & MAZZUCATO, 2016).

Atualmente, quase todas as atividades econômicas estão baseadas na emissão de GEEs, o que torna evidente a necessidade de uma mudança estrutural. Seria necessário modificar o entendimento de como o capitalismo funciona, indo além da visão ortodoxa, para uma análise mais complexa e investigar como as políticas públicas podem ajudar a moldar um futuro econômico diferente (JACOBS & MAZZUCATO, 2016).

Para Perez (2015), as regulações ambientais frequentemente são mal interpretadas como supressoras do crescimento econômico. A instalação de um novo paradigma envolve uma dolorosa alteração social e adaptação, no qual após grandes colapsos o Estado desempenha um papel ativo a favor do investimento e do crescimento. A sinergia entre as novas tecnologias,

indústrias e infraestrutura constitui a característica distintiva da revolução tecnológica e a base para seu rápido crescimento nas décadas iniciais da difusão.

Uma mudança de paradigma seria um novo senso comum para inovação e comportamento que tenha ou não as tecnologias atuais. Todas essas tendências que envolvem redução de detritos e resposta a necessidades por meio de soluções intangíveis estariam indo na direção do crescimento verde. Vale destacar que, em direção ao verde não necessariamente quer dizer que sustentabilidade e crescimento estão em lados opostos. Na realidade, coloca a crise ambiental como um problema econômico que pode gerar uma oportunidade para que haja um remodelamento radical do arcabouço institucional e de política existente, possibilitando um potencial completo de transformação (PEREZ, 2015).

Assim, compreende-se que a transição sociotécnica perpassa por uma transformação na forma como as relações de produção e consumo estão estabelecidas. Meadowcroft (2009) argumenta que a reforma de práticas de governança sociopolíticas deve ser realizada caso se deseje uma transição para um padrão de desenvolvimento sustentável. Tal transformação deve ser sustentada em segmentos chave, dentre eles o de energia. Assim, até mesmo os atores e organizações mais tradicionais dentro deste segmento, ligados aos combustíveis fósseis, percebem a importância de acelerar o processo de transição, dado o atual cenário de emergência climática, como descrito no capítulo anterior.

Meadowcroft (2009) e Rotmans et al. (2001) descrevem a transição como um processo complexo, no qual as mudanças ocorrem de maneira gradual, antes mesmo de qualquer mudança radical de paradigma. O governo deve desempenhar um papel central nesse processo, atuando como um facilitador, conduzindo os atores a promoverem mudanças que sejam interessantes aos objetivos de transição para um paradigma mais sustentável. A natureza complexa desse processo pode ser justificada pelo seu caráter multidimensional. Em outras palavras, o fato de uma transição bem-sucedida depender de diferentes dimensões (tecnológica, econômica, social e institucional) e níveis (micro, meso e macro) e da interação entre eles, torna necessária a existência, ao mesmo tempo, de inovações incrementais e mudanças profundas, de longo prazo.

Diante disso, fica evidente a necessidade da intervenção através de políticas públicas para que se possa alcançar os objetivos de descarbonização do sistema, uma vez que sem elas não seria possível que as mudanças desejadas ocorressem num ritmo no qual seria possível evitar as consequências negativas resultantes das mudanças climáticas.

Reichardt et al. (2016) descrevem que o desenvolvimento de tecnologias renováveis não depende apenas de um conjunto de políticas, mas de toda a estrutura do sistema de inovação,

chamado de *Technological Innovation System* (TIS). Estudos desenvolvidos dentro deste campo focam na análise da estrutura do sistema de inovação, bem como no seu funcionamento. A partir disso, seria possível observar em que pontos o sistema está “falhando” e assim determinar onde a intervenção se faria mais necessária.

Para que seja possível compreender a realidade além da mudança estritamente tecnológica, os arcabouços teóricos do TIS e *Policy Mix* devem ser estudados com a finalidade de verificar pontos de complementariedade e conseqüentemente sugerir uma estratégia analítica que possa melhor interpretar a realidade. Isto porque, diante da complexidade observada nos arranjos sociais, tecnológicos e institucionais, compreende-se que a “transição energética” a qual esta pesquisa se refere vai muito além da simples transformação tecnológica, perpassando por mudanças que também contemplem as dimensões sociais e institucionais.

A escolha dos arcabouços teóricos mencionados vai ao encontro do que Reichardt et al. (2016) analisam ao verificar as relações de interdependência entre ambos os conceitos, no qual buscam compreender um papel ampliado do *Policy Mix* no desenvolvimento do TIS. Essa abordagem justifica-se na medida em que permite avaliar, no grupo de países selecionados para esta pesquisa, em que grau as políticas adotadas efetivamente contribuíram para a descarbonização da matriz energética baseada no carvão e o desenvolvimento de tecnologias renováveis.

## 2.1 PANORAMA BIBLIOMÉTRICO DA LITERATURA EM TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Diante da diversidade de interpretações e abordagens presentes na literatura sobre transição energética, torna-se necessário compreender como o campo vem se consolidando nas últimas décadas. A transição para uma economia de baixo carbono envolve múltiplas dimensões — tecnológicas, institucionais, econômicas e sociais — e, por isso, exige a mobilização de referenciais analíticos amplos e interdisciplinares. Nesse contexto, uma etapa fundamental do processo de formulação do arcabouço teórico-analítico desta tese foi a realização de uma análise bibliométrica, que permitiu mapear a produção científica recente e identificar padrões, tendências e lacunas no campo de estudo.

Essa análise serviu não apenas para embasar a construção do referencial teórico, mas também para problematizar a dominância de determinadas abordagens e perspectivas geográficas na literatura. O levantamento contribuiu para a identificação de um possível viés

eurocêntrico nas publicações mais citadas e institutos mais produtivos, o que reforça a importância de estudos que considerem outras trajetórias nacionais, especialmente aquelas de países emergentes com elevada dependência do carvão, como China e Índia. A seguir, são apresentados os principais achados da análise bibliométrica, acompanhados de uma reflexão sobre seus desdobramentos para a formulação da perspectiva teórico-metodológica adotada nesta pesquisa.

O conceito de “transição energética” é, muitas vezes, associado à noção de mudança tecnológica, referindo-se à substituição, adaptação ou incorporação de tecnologias para geração, armazenamento e uso de energia. Seu uso começou a ganhar relevância nos anos 1970, impulsionado pelas crises do petróleo, que colocaram em evidência a vulnerabilidade dos sistemas energéticos e estimularam a busca por alternativas. A consolidação do termo ocorreu nas décadas seguintes, em meio ao crescente reconhecimento da emergência climática e da necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Apesar da ampla utilização do conceito, não há, na literatura, uma definição única e consolidada sobre o que constitui uma transição energética. Autores como Smil (2010) alertam para a limitação de abordagens que reduzem o processo à mera substituição de fontes energéticas, destacando a importância de compreender a transição como um fenômeno complexo, que envolve dimensões tecnológicas, institucionais, sociais e econômicas. Nesse sentido, torna-se fundamental adotar marcos analíticos capazes de captar essa complexidade, permitindo uma análise mais abrangente dos fatores que moldam e condicionam as trajetórias de mudança nos sistemas energéticos contemporâneos.

A pesquisa bibliométrica tem papel fundamental no desenvolvimento desta pesquisa, ao analisar os trabalhos mais recentes publicados sobre o tema, determinar quais áreas são saturadas e identificar lacunas que ainda podem ser exploradas. Além disso, essa análise possibilita a sistematização da literatura teórica e empírica e contribui para a escolha dos referenciais teóricos mais relevantes. Com base nisso, foi conduzido um levantamento na base de dados *Web of Science*, utilizando os descritores “*climate change*”, “*energy transition*” e “*low carbon*”, o que resultou em 1.463 documentos. Foram selecionados artigos e capítulos de livros, excluindo-se áreas técnicas fora do escopo deste estudo, como engenharia, química e nanociências, ainda que se tenha mantido o critério de multidisciplinaridade.

Como é possível observar na Tabela 1, dos 10 países com maior número de publicações, seis são europeus. Além disso, entre as 10 instituições com maior volume de produção científica sobre o tema, nove estão sediadas na Europa. Esses dados corroboram a hipótese de que a literatura sobre transição energética apresenta forte **concentração eurocêntrica**. Apesar disso,

destaca-se também a relevância crescente da China, que vem consolidando sua presença científica e tecnológica no tema, especialmente em razão dos investimentos realizados em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I) em seus planos quinquenais (BALL et al., 2017).

A Tabela 2 e a Tabela 3, portanto, evidenciam que a Europa se mantém como centro dominante na produção de conhecimento sobre transição energética, seguida pela China. Tal constatação reforça a relevância de análises que busquem diversificar as lentes de interpretação do fenômeno, incluindo realidades menos representadas nos estudos internacionais, como o caso da Índia. Esses achados bibliométricos fundamentam a escolha dos países analisados nesta tese e reforçam a necessidade de se aplicar um arcabouço teórico capaz de dialogar com diferentes trajetórias de transição energética.

Tabela 2 - Publicações por país

Posição	País	Documentos
1	Inglaterra	360
2	China	298
3	Estados Unidos	237
4	Alemanha	125
5	Australia	89
6	Canada	82
7	Holanda	81
8	Itália	71
9	Espanha	68
10	França	65
11	Suíça	62
12	Suécia	60
13	Áustria	56
14	Índia	54
15	Japão	47

Fonte: *Web of Science*. Elaboração própria.

Tabela 3 - Publicações por instituição/organização

Posição	Instituição/Organização	Documentos
1	<i>University of Sussex</i>	58
2	<i>University College London</i>	35
3	<i>Tsinghua University</i>	35
4	<i>The University of Manchester</i>	34

5	<i>University of Leeds</i>	33
6	<i>University of Oxford</i>	31
7	<i>Swiss Federal Inst of Technology</i>	30
8	<i>University of Cambridge</i>	30
9	<i>Imperial College London</i>	28
10	<i>Utrecht University</i>	25

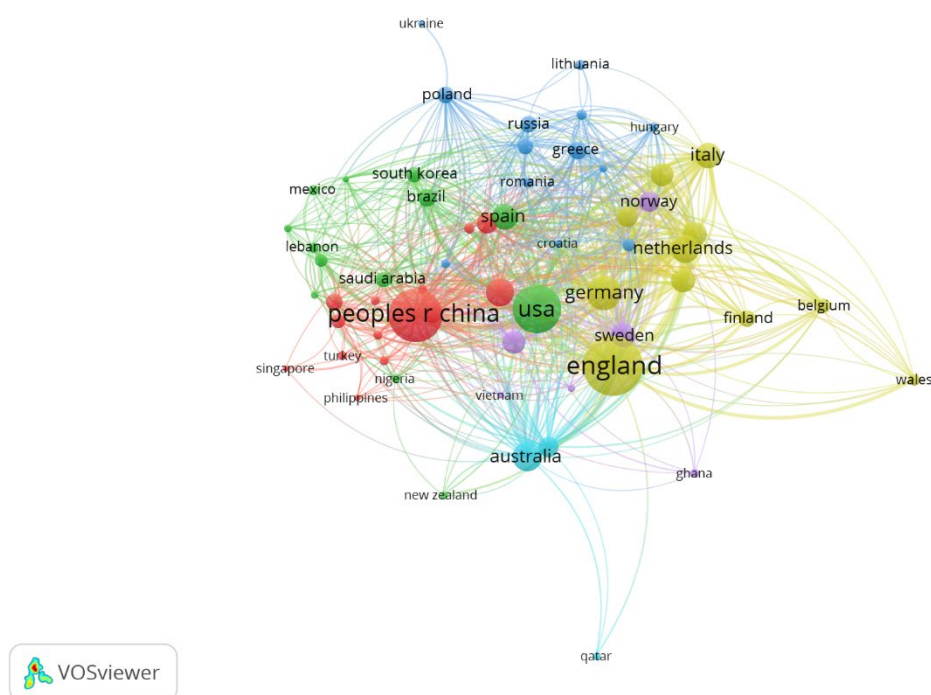
Fonte: *Web of Science*. Elaboração própria.

A Figura 5 ilustra o *cluster* formado quando analisada a coautoria por países. Observa-se que Alemanha, China, Estados Unidos e Inglaterra são os países com maior número de publicações. Dessa forma, o resultado obtido vai ao encontro da escolha de países realizada (Alemanha, China e Índia), uma vez que Alemanha e China possuem posição de destaque em termos de produção acadêmica. De maneira geral, ele revela uma dinâmica global de interações estruturada em blocos regionais e países líderes, destacando a centralidade de atores como China, Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha, que desempenham papéis cruciais na articulação das redes de colaboração. Esses países aparecem como polos de influência globais, conectando-se a outras nações e consolidando sua posição como polos de influência científica, econômica e política.

Essa análise reforça a ideia de que as redes internacionais não são homogêneas, mas sim moldadas por fatores históricos, econômicos e culturais. Portanto, compreender essas interações permite identificar oportunidades estratégicas para fortalecer colaborações, especialmente para países em desenvolvimento.

Adicionalmente, o pioneirismo da Alemanha sobre a formulação de políticas que visem a descarbonização de sua matriz energética e a relevância da China em termos de emissão de GEEs e capacidade instalada de renováveis, podem explicar a posição de destaque desses países, conforme observado na Tabela 2 e na Tabela 3, destacando a importância dos referidos países sobre o tema analisado.

Figura 5 - Análise bibliométrica (co-autoria por países)



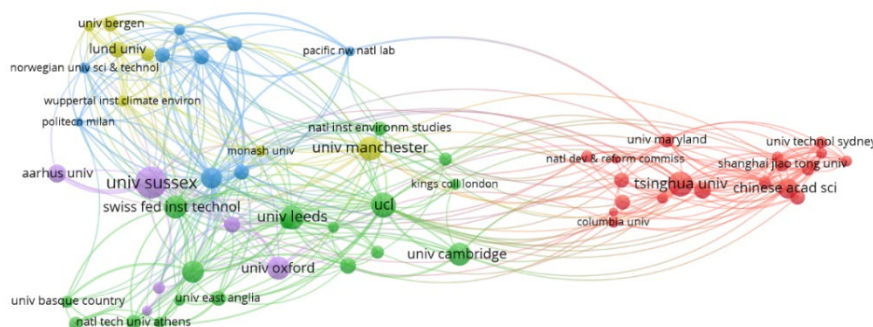
Fonte: *Web of Science*. Elaboração própria.

A Figura 6 representa o *cluster* quando analisada a co-autoria por instituição de ensino/organização. Destacam-se a *University of Sussex* e a *Tsinghua University*, corroborando os dados encontrados na Tabela 2. Destaca-se o fato de que a Índia não configura entre os 10 países com maior número de publicações, mas figura na 14ª colocação, como observado na Tabela 1. Ela evidencia a interação entre instituições acadêmicas e centros de pesquisa em redes globais, organizadas em *clusters* por sua proximidade colaborativa. O cluster vermelho, liderado por instituições chinesas, reflete a centralidade crescente da China na pesquisa científica e tecnológica, especialmente em áreas como energia e sustentabilidade. A presença de instituições ocidentais, como a *Columbia University*, dentro desse cluster indica colaborações estratégicas que fortalecem a posição global da China.

O cluster verde destaca a rede de colaboração do Reino Unido, com universidades de destaque como a *University of Sussex*, *University of Leeds*, *University of Oxford* e *University of Cambridge*. Este *cluster* revela a liderança britânica em temas como inovação tecnológica, políticas públicas e estudos ambientais, além de forte interação entre as instituições, demonstrando um sistema acadêmico altamente integrado e influente. As conexões entre os

clusters verde e vermelho reforçam a relevância das parcerias internacionais entre Reino Unido e China.

Figura 6 - Análise bibliométrica (co-autoria por instituição de ensino/organização).



Fonte: *Web of Science*. Elaboração própria.

A Figura 7 mostra a relevância do objeto desta pesquisa, quando analisamos os *clusters* resultantes da busca realizada. As palavras-chave “mudanças climáticas”, “energias renováveis” e “transição energética” são as que possuem maior número de ocorrências. Por outro lado, o fato de a palavra-chave “instituições” ou “institucionalismo” não figurar entre as mais frequentes, mostra uma possível lacuna a ser preenchida por esta pesquisa. Além disso, pesquisas que também tenham os parâmetros TIS e *Policy Mix*, em adição aos outros listados, não retornou resultados relevantes. Observa-se a complexidade interdisciplinar das discussões sobre transição energética, mudanças climáticas e sustentabilidade, com termos organizados em *clusters* que refletem diferentes dimensões do tema. Dentre os *clusters* analisados, alguns chamam atenção, considerando-se o objeto de estudo desta pesquisa.

No cluster vermelho, destacam-se conceitos como governança, transições de sustentabilidade e políticas climáticas, enfatizando o papel da gestão e da inovação social no processo de transição. Termos como “*multi-level perspective*” e “*technological innovation systems*” reforçam a utilização de abordagens analíticas para integrar diferentes níveis de governança e inovação tecnológica.

O cluster verde está centrado em temas relacionados às emissões de carbono, consumo e estratégias de mitigação. Termos como “*CO<sub>2</sub> emissions*”, “*carbon emissions*” e “*reduction*”



Adicionando-se o termo “*coal*” ou “carvão”, os resultados encontrados totalizam 303, conforme observado na Tabela 4 sendo China o país com maior número de trabalhos publicados, o que corrobora com a posição adotada a partir dos planos quinquenais e com a própria necessidade do país em desenvolver pesquisas neste segmento, uma vez que é dependente dele para conseguir suprir sua demanda por energia. A Alemanha, por sua vez, ocupa a terceira posição, país que foi pioneiro no desenvolvimento de políticas e estratégias para a descarbonização de sua matriz de energia.

A ausência da Índia entre os países com maior número de publicações sobre transição energética em nações dependentes do carvão pode ser explicada devido aos seus desafios institucionais, como limitações de financiamento, barreiras linguísticas e menor integração em redes globais de pesquisa, podem restringir a visibilidade de seus estudos. Apesar de sua dependência de carvão, a Índia prioriza a expansão de energias renováveis, como solar e eólica, com maior ênfase em relatórios técnicos e ações concretas do que na produção científica indexada, destacando seu pragmatismo em equilibrar compromissos climáticos e necessidades de desenvolvimento.

Tabela 4 - Publicações por país, incluindo-se o termo “carvão”.

Nº	País	Documentos
1	China	16
2	Estados Unidos	11
3	Inglaterra	8
4	Alemanha	6
5	Noruega	4
6	Austrália	4
7	Canadá	4
8	África do Sul	4
9	Áustria	3
10	Rússia	3

Fonte: *Web of Science*. Elaboração própria.

## 2.2 REVISÃO DA LITERATURA

Estudos sobre transição para uma economia de baixo carbono, anteriormente concentrados no desenvolvimento de novas tecnologias, sofreram transformações,

incorporando outros atores e processos determinantes para que ela ocorra. Ainda que se considerasse a importância de difusão tecnológica, o papel dos demais atores e principalmente das instituições (formais e informais) não possuía o destaque necessário para que houvesse uma compreensão mais fidedigna à realidade.

O conceito de sistema sociotécnico surgiu a partir do momento em que compreender apenas a mudança tecnológica era insuficiente para realizar mudanças de paradigmas dentro da sociedade. A difusão de uma nova tecnologia possui papel de destaque, porém os demais fatores – políticos, culturais, institucionais, dentre outros – precisam ser considerados. A adoção de estratégias imitativas é considerada parte importante do processo de difusão de tecnologias, mas é importante considerar que a adaptabilidade e a flexibilidade são elementos fundamentais para que ela ocorra de maneira bem-sucedida.

Os sistemas sociotécnicos surgiram a partir da necessidade de relacionar múltiplos elementos físicos e sociais para preencher determinada função social. Para se atingir o objetivo de transição para um sistema de energia com uma baixa emissão de carbono, além do processo de transição do sistema sociotécnico, será preciso pensar em como as interações entre eles são importantes.

Geels (2001; 2002; 2004) descreve que as conexões necessárias entre elementos necessários para preencher funções sociais, como energia, transporte, moradia e produção de alimentos são comumente compreendidos como sistemas. Eles são combinações de diferentes atores, redes, instituições, infraestrutura, mercados e práticas e representações culturais. As transições sobre sustentabilidade representam grandes desafios sociais, provocados por padrões de produção e consumo insustentáveis, existentes nos sistemas sociotécnicos vigentes (EDMONDSON, 2020; KOHLER et al., 2019).

Uma transição para uma economia de baixo carbono refletiria uma combinação de processos, objetivando-se uma mudança fundamental no paradigma sociotécnico vigente, para uma forma mais sustentável de sustentar às aspirações humanas. A importância das inovações radicais já vem sendo discutida desde os precursores da economia evolucionária. No entanto, compreende-se que esse tipo de transição necessita também de mudanças incrementais e da coexistência de paradigmas, dada a complexidade e dimensão que este tipo de transformação compreende. Assim, ela consiste em mudanças em nos aspectos tecnológicos, organizacionais, institucionais, políticos e socioculturais. Elementos do sistema vigente são ocasionalmente complementados, mas comumente substituídos por novas tecnologias.

Markard, Raven & Truffer (2012) descrevem que a transição para a sustentabilidade enfrenta grandes dificuldades devido aos fortes “aprisionamentos” e “dependência de

trajetória”. As tecnologias estabelecidas estão em grande medida enraizadas na sociedade por terem criado hábitos, padrões e costumes atrelados a elas, levando-se em consideração tecnologias complementares, modelos de negócios, cadeias de valor, estruturas organizacionais, regulações, estrutura institucional e até mesmo arranjos políticos. A mudança da infraestrutura que sustenta o atual paradigma requer um grande montante de recursos financeiros para realizar a mudança e expansão para um novo paradigma. Por esse motivo, sistemas sociotécnicos estabelecidos tendem a empreender mudanças incrementais e não radicais.

Estudos relativos à transição para uma economia de baixo carbono ganharam destaque nas últimas décadas, principalmente com a maior importância conferida aos problemas relacionados à sustentabilidade e segurança energética. Nesse contexto, quatro arcabouços teóricos se popularizaram como ferramenta de análise dentro desse processo: Gestão da Transição; Gestão Estratégica de Nichos; Perspectiva Multinível e Sistemas Tecnológicos de Inovação. Elas não são as únicas ferramentas de análise existentes, mas representam métodos que capturam uma visão sistêmica de transformações de longo alcance, capazes de modificar sistemas sociotécnicos (MARKARD, RAVEN & TRUFFER, 2012).

Os sistemas sociotécnicos podem ser entendidos como atores ou um conjunto de atores e instituições, bem como suas respectivas dotações materiais e conhecimento. A noção de sistema destaca o fato de que existem diversos elementos que estão interrelacionados e juntos prestam uma função à sociedade. A interpretação dessa dinâmica é essencial para compreender a maneira como funciona determinado sistema sociotécnico e assim analisar como ocorrerá o processo de transição (MARKARD, RAVEN & TRUFFER, 2012).

Mudanças de um sistema sociotécnico para outro implicam na existência de um processo de transição, que por sua vez significam mudanças em diferentes dimensões, como a tecnológica, material, organizacional, institucional, política, econômica e sociocultural. Em outras palavras, esse processo envolve uma ampla gama de atores e, dada sua complexidade é razoável considerar que mudanças de sistemas tendem a ocorrer em um longo espaço de tempo. Pesquisas nessa área ressaltam a existência de “aprisionamentos” e “dependências de trajetória” existentes nesse processo, o que corrobora com o fato dele durar longos períodos de tempo para ocorrer, inclusive notando-se a coexistência de paradigmas tecnológicos e sistemas sociotécnicos (SCHOT & GEELS, 2008; MARKARD, RAVEN & TRUFFER, 2012; GEELS, KERN & CLARK, 2023a; 2023b).

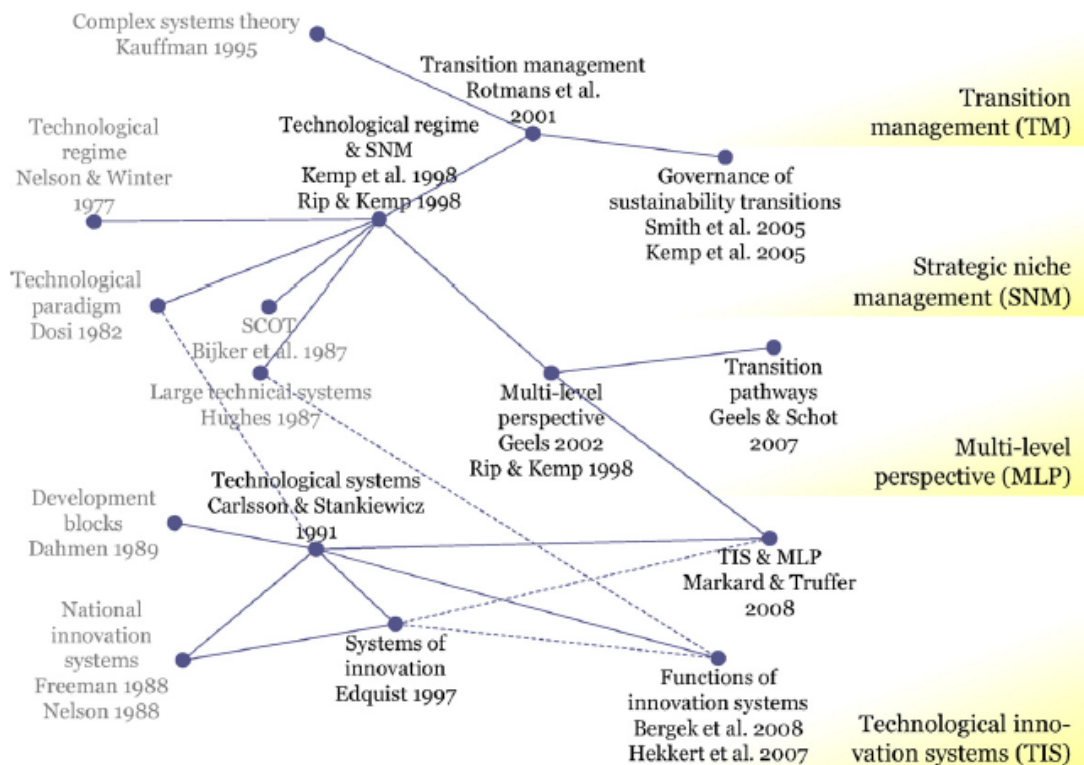
As transições sociotécnicas representam uma perspectiva de análise mais complexa que as transições tecnológicas, uma vez que também levam em consideração as práticas institucionais e dos usuários. Isto é, levam em consideração inovações tecnológicas e não-

tecnológicas como parte de sua perspectiva de análise. Assim, tais mudanças não influenciam apenas a estrutura existente sobre determinada tecnologia, mas toda a dinâmica sociocultural que a cerca.

Dessa forma, a transição para uma economia de baixo carbono pode ser compreendida como mudanças nos processos sociotécnicos já estabelecidos para sistemas de produção e consumo que tenham menor emissão de GEEs. A partir do momento em que a transição é planejada, decisões governamentais podem direcionar as instituições com a finalidade de acelerar esse processo.

Diversas ferramentas analíticas foram desenvolvidas com a finalidade de compreender o sistema sociotécnico relacionado à transição do sistema energético. Na Figura 8 é possível observar os quatro principais arcabouços teóricos e como as principais pesquisas desenvolvidas, tendo cada um deles como principal ferramenta de análise, relacionam-se entre si. Cada um deles ganhou contribuições significativas, bem como o reconhecimento de suas limitações, o que abriu espaço para novos campos de estudo.

Figura 8 - Mapa das principais contribuições e principais linhas de pesquisa do campo dos estudos de transição sustentável.



Fonte: Markard, Raven & Truffer (2012).

Estudos relacionados a transição tecnológica, que tenham a tecnologia como centro do processo de transição já vem sendo amplamente discutidos desde a década de 1980 (DOSI, 1982; NELSON & WINTER, 1977; FREEMAN, 1987; NELSON, 1988; EDQUIST, 1997). Contudo, a popularização dos debates referentes às transições para uma economia de baixo carbono a partir de uma perspectiva de mudança sociotécnica ocorreu apenas nos últimos 20 anos. Tal fato se deve, em grande parte, pela necessidade em encontrar respostas aos crescentes problemas ambientais e de segurança energética que a sociedade moderna tem enfrentado.

O processo de transição requer a mudança de diferentes sistemas sociotécnicos, que constantemente interagem entre si, como a eletricidade, aquecimento, transporte, agricultura, uso do solo, dentre outros. Para que seja possível a transição de energia, uma vez que o maior problema das renováveis é a sua intermitência, a transição dos outros sistemas também se faz necessária (GELLS et al., 2017; IPCC, 2023; BAKHUIS et al., 2024).

Assim, depreende-se que há uma crescente necessidade em se estudar sistemas não apenas sob uma ótica tecnológica, mas sobretudo através do ponto de vista sociotécnico, uma vez que não é possível compreender tal realidade sem levar em consideração a complexidade e a multiplicidade dos atores existentes nos sistemas analisados. Além disso, resta claro que a transição deve ser analisada sob um ponto de vista multissistêmico para se atingir ao objetivo desejado. Isto é, para que se caminhe em direção a uma economia de baixo carbono, não há que se falar na transição de apenas um sistema, mas em múltiplos sistemas e na forma como eles se interrelacionam (BAKHUIS et al., 2024).

Pesquisas relacionadas à transição para uma economia de baixo carbono ganharam proeminência principalmente a partir dos crescentes desafios relacionados à sustentabilidade, notadamente do fenômeno das mudanças climáticas. Assim, encontrar um sistema sociotécnico que consiga atender às necessidades dessa pressão por transformações no sistema como o conhecemos atualmente (não apenas em termos de infraestrutura e tecnologia, mas de todo o comportamento social conectado a uma economia baseada em combustíveis fósseis) se tornou um desafio para as pesquisas dentro deste campo de estudo. Rip & Camp (1998) discutem como a mudança tecnológica influencia na mitigação das mudanças climáticas, e reconhecem que as tecnologias não se desenvolvem isoladamente, mas precisam interagir constantemente com fatores econômicos, sociais e políticos.

Questões relacionadas à transição tecnológica incorporam um número cada vez maior de elementos nos diversos arcabouços analíticos existentes. Assim, tem-se que a transição em

questão não depende apenas da mudança tecnológica, mas sim de todo o conjunto de práticas, regulações, indústrias, infraestrutura e cultura (GEELS, 2002).

As ferramentas analíticas formuladas para compreender de maneira apropriada esta temática, buscam explicar as reconfigurações necessárias entre tecnologias, atores e instituições (GEELS, 2002). Em um esforço de explicar as complexas dinâmicas dos sistemas sociotécnicos, conceitos advindos de diferentes campos de estudo foram adotados, incluindo a economia evolucionária, construção social da tecnologia, teoria neoinstitucional e teorias de sistemas socioadaptativos complexos (GEELS, 2004).

Dessa forma, dentre os principais arcabouços teóricos que buscam compreender as dinâmicas de mudanças em sistemas sociotécnicos, como ilustrados na Figura 14, o que será utilizado nesta tese é o de Sistemas de Inovação Tecnológica ou em inglês, *Technological Innovation System* (TIS) (HEKKERT et al., 2007; BERGEK et al., 2008, 2015; BERGEK, 2019; MARKARD & TRUFFER, 2008). Complementarmente, será utilizado o *Policy Mix* (ROGGE & REICHARDT, 2013; ROGGE & REICHARDT, 2015; ROGGE & STADLER, 2023), como ferramenta analítica. Isto porque, apesar de ele não ser considerado tradicionalmente como uma literatura de transição sociotécnica, eles guardam relações significativas entre eles, especialmente no campo das transições sustentáveis, avaliando como diferentes políticas interagem com sistemas sociotécnicos.

### **2.2.1 Sistemas de Inovação Tecnológica ou *Technological Innovation System* (TIS)**

Uma das abordagens mais populares na literatura de transição para uma economia de baixo carbono é o *Technological Innovation Systems* (TIS) – doravante Sistemas de Inovação Tecnológica, que surgiu com o objetivo de construir uma base mais bem estruturada para políticas tecnológicas relacionadas ao tema. Bergek (2019) traz uma revisão sistemática das descobertas empíricas de estudos relacionados ao TIS, que até o momento eram escassas.

A TIS busca compreender como funciona um sistema em torno de uma determinada tecnologia e a sua relação com o contexto no qual está inserida. Criado como um arcabouço teórico centrado no desenvolvimento tecnológico, destaca em sua análise elementos essencialmente ligados ao mesmo, que expliquem os desafios no desenvolvimento, difusão e uso de determinada tecnologia (HEKKERT et al., 2007; BERGEK et al., 2015). Por ser uma abordagem sistêmica, sempre existiram tentativas no sentido de agregar elementos de análise

que fossem além do próprio TIS, incluindo atores, instituições e outras tecnologias, como uma ferramenta metodológica capaz de melhor compreender a realidade (BERGEK, et al., 2015).

A TIS pode ser caracterizada como um conjunto interrelacionado de atores, regras e artefatos materiais que influenciam a velocidade e a direção da mudança em um segmento tecnológico específico. O motivo pelo qual se analisa uma determinada TIS é o de compreender o desenvolvimento de um campo tecnológico em termos de estruturas e processos que estimulam ou obstaculizam o desenvolvimento e difusão de novas tecnologias. O objetivo fundamental é identificar os principais problemas e corrigi-los dentro do funcionamento desses sistemas (BERGEK et al., 2008; HEKKERT et al., 2007; REICHARDT et al., 2016).

A análise estrutural do TIS consiste na identificação de atores, redes, instituições e infraestrutura e avaliar a capacidade deles em estimular inovação. Enquanto podem existir sistemas de inovação com características semelhantes, eles podem funcionar de maneiras completamente diferentes. Para ela, existem processos que são indispensáveis ao bom funcionamento do sistema, chamados de “funções” (REICHARDT et al., 2016).

O funcionamento do TIS depende da existência de sete funções principais, como elencado por Bergek (2019), que são: desenvolvimento e difusão de conhecimento, experimentação empreendedora, orientação da pesquisa, criação de mercado, legitimação, mobilização de recursos e desenvolvimento de externalidades positivas. A sua análise mapeia tais funções com o intuito de verificar em que pontos o sistema pode estar falhando, para que então possa entender o que dificulta o desenvolvimento de determinada tecnologia. A partir dessas informações, seria possível o desenvolvimento de recomendações de políticas para fortalecer o sistema, até mesmo por meio de intervenções governamentais (BERGEK et al., 2015).

O Quadro 2 ilustra de forma esquemática as funções necessárias para que uma TIS possa surgir e funcionar adequadamente. Para fins desta pesquisa, será utilizada a abordagem desenvolvida por Bergek et al. (2008) no que diz respeito ao que contempla cada função. Estrutura e função são conceitos distintos, que se complementam. Enquanto as funções desempenham um papel de natureza avaliativa, na qual é possível verificar o que funciona ou não dentro de uma TIS, a estrutura representa o que pode ser modificado para melhorar o funcionamento do sistema (por isso devem ser alvo das intervenções de políticas públicas). Assim, funções com problemas significam falhas na estrutura, que ao serem identificadas devem ser o alvo dos formuladores de política para corrigi-los. Tais problemas influenciam negativamente a direção e a velocidade com que ocorrem os processos de inovação, afetando diretamente seu desempenho (REICHARDT, et al., 2016; ROGGE & REICHARDT, 2013).

Bergek et al. (2015), descrevem a importância em desenvolver uma ferramenta analítica que considere o “contexto” de uma maneira mais explícita. Nesse sentido, o artigo identifica quatro principais estruturas que influenciam a TIS: tecnológica, setorial, geográfica e política. Esta ferramenta de análise busca formular sugestões de política a partir de entraves encontrados para o desenvolvimento tecnológico (BERGEK et al., 2015; BERGEK, 2019).

Quadro 2 - Descrição das 7 principais “funções” do TIS.

Função	Nome da Função	Descrição
F1	Desenvolvimento e difusão do conhecimento	Captura a amplitude e a profundidade da base de conhecimento atual do TIS e como ela muda ao longo do tempo, bem como a forma como o conhecimento é difundido e combinado no sistema.
F2	Experimentação empreendedora	Redução da incerteza por meio da experimentação de tentativa e erro com novas tecnologias, aplicações e mercados.
F3	Influência na direção da busca	A força combinada de fatores que incentivam empresas e outras organizações a ingressarem no TIS e os mecanismos que influenciam a direção da busca dentro dele, orientando os esforços das organizações para explorar tecnologias, mercados e modelos de negócios específicos
F4	Formação de mercado	A formação e abertura de um espaço de mercado e a articulação da demanda.
F5	Legitimação	Aumento da aceitação social e da conformidade com as instituições da nova tecnologia.
F6	Mobilização de recursos	Mobilização de competências/capital humano, capital financeiro e ativos complementares, direcionando recursos essenciais para o desenvolvimento e implementação de inovações.
F7	Desenvolvimento de externalidades positivas	Desenvolvimento de utilidades no sistema, como mercados de trabalho compartilhados e fornecedores especializados, que beneficiam todos os participantes de um sistema de inovação sem custos diretos para eles.

Fonte: Bergek et al. (2008); Bergek (2019). Traduzido e adaptado.

A partir desse quadro analítico, observa-se a importância dos contextos específicos os quais a inovação está inserida, para a formulação de políticas e estratégias de transição para energética de baixo carbono. A TIS fornece ferramentas que ressaltam a importância de como é necessário compreender as características específicas dos contextos analisados dos países.

Permeando todo esse conjunto, deve-se considerar a importância que as instituições possuem, uma vez que elas constituem um dos principais atores para acelerar ou constituir óbice a este processo, como será mais bem explorado nas seções subsequentes.

A transição energética de baixo carbono pode ser considerada uma resposta às pressões que o atual paradigma baseado em combustíveis fósseis tem provocado ao meio ambiente. Esta motivação, ainda que central para mitigar os problemas ambientais que a sociedade tem enfrentado atualmente, não deve desconsiderar o contexto de desenvolvimento de cada país analisado. Isto porque, a maior parte das pesquisas realizadas está concentrada nos países europeus, formulando-se políticas e estratégias baseadas em suas próprias características sociotécnicas, o que não pode ser diretamente transportado para países em desenvolvimento.

Para economias em desenvolvimento, a capacidade de adaptar tecnologias adquiridas de fora do sistema Tecnológico de Inovação pode ser mais relevante que o conceito tradicional de Pesquisa e Desenvolvimento (BERGEK, 2019).

Para Reichardt et al. (2016), as políticas fazem parte da estrutura institucional que compõe a TIS e possuem um papel fundamental em sua análise. Apesar disso, são poucos os estudos nos quais é realizada uma análise em como as políticas impactam a TIS e ainda em menor escala aqueles que incorporam a literatura de *Policy Mix*. Contudo, a importância em se considerar o conjunto de políticas que atuam nela tem se tornado cada vez mais evidente, especialmente na literatura referente a políticas sobre o clima, energia e inovação. Isto porque, a transição energética pode sofrer atrasos devido a diferentes falhas de mercado, sistêmicas e institucionais, fazendo-se necessária uma intervenção multifacetada.

Frequentemente se lida com um conjunto complexo de políticas e não com instrumentos únicos, fazendo com que a adoção da literatura de *Policy Mix* seja fundamental para que possamos idealizar um arcabouço teórico capaz de melhor interpretar os estudos de caso referentes ao grupo de países selecionados, descritos no capítulo 3.

### **2.2.2 *Policy Mix***

O conceito de *Policy Mix* tem se mostrado fundamental para a compreensão de como diferentes políticas interagem para atingir objetivos complexos em cenários de transição sustentável, como a mitigação da pobreza energética e a promoção de inovações tecnológicas e sociais. Ele não se limita à combinação de diferentes instrumentos de política, mas trata também de sua coerência, consistência e credibilidade ao longo do tempo, focando em sua interação dentro de um contexto institucional.

Como frequentemente não estamos lidando com instrumentos isolados, o *Policy Mix* auxilia a melhor compreender o papel que as políticas podem desempenhar dentro do TIS. Conforme discutido por Rogge & Reichardt (2016), o *Policy Mix* deve ser analisado a partir de uma abordagem integrada, que considera não apenas a presença de múltiplos instrumentos, mas também como eles interagem para produzir um impacto sistêmico. Assim, essa abordagem não procura concentrar esforços na compreensão da eficácia individualizada de cada instrumento, o foco da análise está nas interações entre as dimensões analisadas, em um esforço para alinhar esses instrumentos, a um objetivo comum.

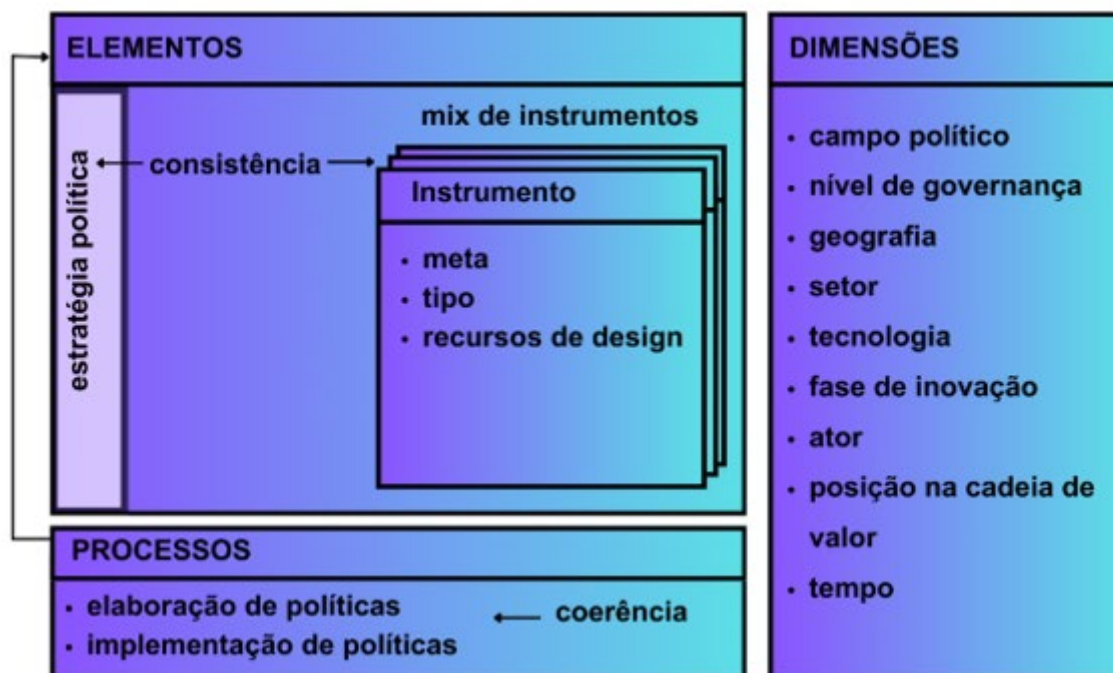
O termo *Policy Mix* se refere a situações nas quais os formuladores de política usam um conjunto de instrumentos para atingir a um mesmo objetivo de forma mais eficiente que utilizando um único instrumento. Dentro da sua abordagem, possui um objetivo de política abstrato e instrumentos de ações concretos. Além disso, também contempla mais dois elementos, que são as estratégias de política e o *mix* de instrumentos (LI & TAEIHAGH, 2020).

Conforme exemplificam Li & Taelhagh (2020) para o caso chinês, ao seguir o objetivo de transição para um sistema de energia com menos emissão de GEEs, uma possível estratégia a ser adotada seria o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Ao assumir tal estratégia de política, um objetivo a ser perseguido pelo país seria aumentar o percentual de renováveis em sua matriz energética. Para tanto, o plano quinquenal traz como plano principal o desenvolvimento de diversas fontes de recursos renováveis para que se possa atingir esse objetivo de política.

Rogge & Reichardt (2013) propõem uma abordagem mais bem sistematizada para superar tal problema. Eles propõem um conceito abrangente de *Policy Mix* como ferramenta para analisar políticas, incluindo elementos, processos, dimensões e outras características gerais.

Os elementos compreendem uma estratégia política orientada por objetivos de longo prazo e planos principais, bem como um conjunto de instrumentos interativos que envolvem diferentes tipos e características de desenho. Já os processos dizem respeito à formulação e implementação das políticas, influenciando diretamente o desempenho dos elementos que compõem o *Policy Mix*. As características, por sua vez, descrevem a natureza desse conjunto de políticas, incluindo sua consistência, coerência nos processos políticos, credibilidade, estabilidade e abrangência (ROGGE & REICHARDT, 2013).

Para ilustrar este entendimento, Rogge & Reichardt (2013) propõem um esquema analítico sobre a literatura, ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Conceito de *Policy Mix*.

Fonte: Rogge & Reichardt (2013). Traduzido.

Os elementos fundamentais do *Policy Mix* são os componentes que estruturam e influenciam um conjunto de políticas voltadas para objetivos específicos. São eles: Elementos, processos e dimensões. Na Figura 9 é possível observar que os elementos incluem não apenas o conjunto de instrumentos, mas também pela estratégia política, incluindo metas de longo prazo e objetivos principais. Ao incorporar os processos políticos, o conceito inclui os procedimentos e disposições institucionais para a formulação e implementação de políticas. Por fim, seu conceito reflete sua natureza complexa e dinâmica por meio de suas dimensões, que podem ser usadas para especificar elementos, processos e suas características.

A definição de objetivos e a seleção de instrumentos são pontos cruciais no processo de formulação de políticas. A análise dos instrumentos individualmente e em suas interações é essencial para garantir que não existam sobreposições ou contradições entre as políticas. Conforme Kern & Howlett (2009), a consistência entre os instrumentos políticos é necessária para que a política seja eficaz e não enfrente barreiras sistêmicas ao tentar promover transições.

Essa literatura enfatiza a necessidade de definir claramente os limites da análise. Rogge & Reichardt (2016) sugerem que a análise deve focar no formato dos instrumentos e no contexto específico de implementação. Ou seja, os instrumentos precisam ser avaliados em relação aos seus "alvos" e ao ambiente institucional em que estão inseridos. Isso é particularmente relevante

em contextos de transição sustentável, onde diferentes políticas (tecnológicas, ambientais, sociais) devem ser aplicadas em conjunto.

Outro aspecto chave desta literatura é sua credibilidade, uma vez que políticas eficazes precisam ser não apenas consistentes, mas também confiáveis ao longo do tempo. Isso envolve garantir que os atores acreditem na durabilidade e no impacto das políticas propostas. Um conjunto de políticas credível é capaz de proporcionar previsibilidade, essencial para em segmentos como o de energia (ROGGE & REICHARDT, 2013).

Embora grande parte da literatura tenha se concentrado nas inovações tecnológicas, Rogge & Reichardt (2013, 2016), juntamente com Kivimaa & Kern (2016), destacam a importância de considerar também a inovação social nas políticas de transição sustentável. Em transições de baixo carbono, como no setor de energia, ela pode desempenhar um papel central ao redefinir práticas e relações sociais.

A inovação social é descrita como ideias, objetos e/ou ações que mudam relações sociais e envolvem novas formas de fazer, pensar e organizar. Para lidar com essas transformações, o conjunto de políticas precisa ser adaptado para apoiar tanto a criação de novas práticas sociais quanto a destruição de estruturas obsoletas, um processo descrito como destruição criativa por Kivimaa & Kern (2016).

Outro aspecto fundamental da análise está na integração dos atores envolvidos no processo de transição. Rogge & Reichardt (2016) sugerem que sua eficácia depende não apenas da qualidade dos instrumentos, mas também de como eles interagem com os atores no sistema, complementar a análise do sistema tecnológico proposto na TIS. Estudos mostram que as transições dependem de mudanças em três elementos: atores, tecnologias e instituições.

Seu conceito apresenta estrutura para analisar as políticas voltadas para a transição sustentável, permitindo uma visão mais ampla e integrada entre as políticas em questão. Rogge & Reichardt (2016) fornecem um arcabouço sólido para entender como os diferentes instrumentos de política podem interagir, enquanto autores como Kivimaa & Kern (2016) apontam para a importância de fomentar inovações sociais dentro desse processo. Ao abordar tanto as inovações tecnológicas quanto as sociais, ele se torna uma ferramenta capaz de auxiliar no processo de transição. No entanto, sua efetividade depende da compreensão dos contextos institucionais e dos atores envolvidos, bem como da capacidade de criar políticas consistentes, coerentes, credíveis e compreensivas.

### 2.2.3 Classificação em termos de tipologia de instrumento

Hood (1983; 2007) descreve que a tipologia “NATO” tem como objetivo classificar os instrumentos de políticas. Essa abordagem fornece estrutura para identificar como os governos utilizam seus recursos para atingir os objetivos de políticas públicas, destacando a importância em compreender em como fazer sua gestão. Dessa forma, tal categorização é feita com base em quatro elementos principais, que são: nodalidade, autoridade, recursos e organização.

A nodalidade consiste no papel de centralidade do governo no sistema social, assegurando-lhe acesso a um conjunto de informações sobre problemas políticos. Os instrumentos caracterizados por alta nodalidade são aqueles em que o governo atua como um ponto central em uma rede, conectando diversos atores e facilitando a troca de informações. Assim, tal acesso permite ao governo mobilizar recursos diversos criando, por exemplo, campanhas públicas que visem esclarecer a população sobre temas de interesse. Além disso, também pode influenciar no desenvolvimento de instrumentos de comunicação para grupos específicos, visando algum comportamento específico de determinado público-alvo. Trata-se de uma ferramenta que não requer grandes dispêndios financeiros ou comprometimento da burocracia. Por outro lado, sua utilização pode não se traduzir em resultado imediato.

A autoridade refere-se ao uso do poder legítimo do governo, fundamentado em sua capacidade legal ou normativa para influenciar ou regular comportamentos. Segundo Howlett & Ramesh (2003), eles podem ser divididos em três categorias principais: regulação, regulação delegada e comitês consultivos.

A regulação refere-se à habilidade do governo de prescrever, de forma oficial, ações que devem ser seguidas pelos atores-alvo, prevendo penalidades em caso de descumprimento. Esse tipo de regulação, conhecido como comando e controle, pode ser exercido de duas formas: Legal (por meio de leis que coíbem práticas consideradas indesejáveis, envolvendo a atuação de sistemas policiais e judiciais) e administrativa (a partir de normas emitidas por órgãos públicos, como padrões, permissões e regras que regulam atividades econômicas e sociais).

Segundo Howlett & Ramesh (2003), a regulação apresenta vantagens significativas. Primeiro, demanda menos informações do governo em comparação a outros instrumentos, já que basta estabelecer padrões e monitorar sua aplicação. Além disso, os custos associados à regulação tendem a ser menores, considerando que proibir atividades indesejáveis é, muitas vezes, mais simples do que criar estímulos para atividades desejáveis. Outro benefício é a contribuição para a coordenação e o planejamento governamentais, garantindo maior previsibilidade, especialmente em contextos que exigem respostas rápidas.

Do ponto de vista político, a regulação também se mostra atrativa por demonstrar capacidade de resposta imediata às demandas sociais. Por outro lado, a regulação pode interferir nas atividades do setor privado, gerando ineficiências econômicas e restringindo a inovação tecnológica devido à segurança excessiva que proporciona ao mercado. Além disso, sua inflexibilidade dificulta a consideração de situações específicas, o que pode levar a resultados não intencionais, especialmente em áreas sociais. Outra limitação é a impossibilidade de regular todas as atividades indesejáveis enfrentadas pelos governos, além do custo elevado associado à aplicação das normas por meio de comissões.

A regulação delegada ocorre quando o governo transfere a responsabilidade regulatória para atores não governamentais. Isso pode ser feito de forma explícita, como no caso de entidades de regulação profissional, ou de maneira menos formal, quando indústrias estabelecem seus próprios padrões de fabricação. A principal vantagem dessa abordagem é o baixo custo para o governo, que não precisa investir na criação e manutenção das normas. Por outro lado, a delegação para atores não-governamentais pode trazer riscos associados à má administração do processo regulatório, comprometendo sua eficiência e eficácia.

Os comitês consultivos constituem outra ferramenta disponível ao governo. Esses comitês permitem a participação de alguns atores relevantes no processo de formulação de políticas públicas (trazendo-os para o processo de produção), garantindo que suas perspectivas sejam ouvidas e que tenham acesso aos tomadores de decisão. Esses comitês podem ser formais, com estrutura permanente, ou informais e temporários.

Os instrumentos baseados nos recursos (ou tesouro) dizem respeito à capacidade do governo de mobilizar recursos financeiros para alcançar objetivos de políticas públicas, influenciando comportamentos sociais e econômicos. Esses instrumentos podem ser usados tanto para incentivar ações consideradas desejáveis, quanto para desestimular práticas indesejáveis.

No caso dos subsídios, esses incentivos financeiros podem assumir diversas formas, como incentivos fiscais para atrair empresas a determinadas regiões, financiamentos para habitação popular ou investimentos direcionados para setores como educação. Esses instrumentos apresentam vantagens significativas. Quando há alinhamento entre os interesses do governo e dos beneficiários, os subsídios tendem a ser eficientes e efetivos. Além disso, são relativamente fáceis de administrar e permitem flexibilidade na sua gestão, considerando as peculiaridades locais e setoriais. Outro aspecto positivo é o baixo custo político, já que os benefícios são focalizados enquanto os custos são distribuídos entre toda a sociedade.

Por outro lado, os subsídios também têm desvantagens, pois eles enfrentam competição com outros programas governamentais pelo orçamento disponível, o que pode limitar sua aplicação. Além disso, há um custo elevado para reunir informações adequadas que permitam determinar o valor ideal a ser alocado. O tempo necessário para que os subsídios produzam efeitos também é um desafio, tornando-os menos adequados para situações emergenciais. Outra limitação é a dificuldade em descontinuar subsídios, especialmente quando os beneficiários passam a depender deles, o que pode torná-los redundantes em cenários onde os objetivos poderiam ser alcançados sem essa ferramenta. Adicionalmente, acordos internacionais podem restringir o uso de subsídios por governos nacionais.

Além dos subsídios, os governos também utilizam impostos e taxas como instrumentos financeiros para desestimular comportamentos indesejados. Exemplos incluem a tributação de produtos como cigarros e bebidas alcoólicas, que visa reduzir seu consumo ao torná-los mais caros. Esses instrumentos têm vantagens, como sua facilidade de implementação do ponto de vista administrativo e sua flexibilidade de gerenciamento. Eles oferecem incentivos financeiros claros para a redução de atividades nocivas, cumprindo seu propósito.

Entretanto, impostos e taxas também apresentam limitações. Para que sejam efetivos, é necessário que o governo disponha de informações precisas para definir as alíquotas ideais. Custos administrativos podem ser elevados se os valores não forem calculados de forma adequada. Além disso, esses instrumentos não proporcionam respostas rápidas, o que dificulta a avaliação de seus efeitos em curto prazo.

A organização refere-se à capacidade do governo de coordenar ações por meio das estruturas sob sua jurisdição. Isso pode incluir abordagens coercitivas, como a utilização de forças policiais, ou ações baseadas na gestão de sua burocracia. Em essência, trata-se do conjunto de estruturas organizacionais que o governo utiliza para implementar suas políticas e alcançar seus objetivos. Suas vantagens incluem facilidade de execução, por utilizar recursos próprios do governo, reduzindo a necessidade de supervisão e controle externos, além de concentrar competências e informações.

Por outro lado, esse instrumento apresenta desvantagens, como a rigidez burocrática, que embora essencial para garantir os princípios democráticos, pode dificultar a agilidade nos processos. Além disso, o componente político nas burocracias públicas pode levar à priorização de ações com fins eleitorais ou gerar diretrizes contraditórias, comprometendo a eficácia das atividades governamentais.

Howlett & Ramesh (2003) identificam três aspectos críticos no uso de empresas públicas como instrumentos de política. Primeiro, o controle dessas organizações pode ser

desafiador, especialmente quando seus gestores não seguem as diretrizes estabelecidas. O segundo aspecto é a ineficiência operacional dessas empresas que pode resultar em perdas financeiras significativas ao longo do tempo. Por fim, em situações de monopólio, a ineficiência das empresas públicas tende a ser transferida para os consumidores, que acabam arcando com os custos desse desempenho inadequado.

#### **2.2.4 TIS, *Policy Mix*, instituições e arranjos institucionais**

Como já destacado anteriormente, em função do conjunto de fatores políticos e climáticos observados atualmente, não é surpresa que as atenções estejam voltadas para as transições energéticas. Dentro da literatura que cobre essa temática, destaca-se o arcabouço teórico que tem como base a análise de sistemas sociotécnicos, mostrando-se dominantes enquanto ferramenta de análise das transições sociotécnicas. Contudo, enquanto as transições para uma economia de baixo carbono são profundamente arraigadas por conteúdo político, devido ao grau com que política e escolhas sociais estão envolvidas, também é claro que a abordagem teórica dos sistemas sociotécnicos carece de conteúdo político.

As transições ou transformações para a energia sustentável têm recebido atenção crescente. Dentro dessa literatura, a análise de sistemas sociotécnicos tem se destacado como uma abordagem dominante (MARKARD et al., 2012). Contudo, embora seja amplamente reconhecido que as transições energéticas sustentáveis possuem uma natureza profundamente política, dado o envolvimento de políticas públicas e escolhas sociais amplas (SMITH; STIRLING & BERKHOUT, 2005; MEADOWCROFT, 2005), também é evidente que a abordagem dos sistemas sociotécnicos carece de uma análise aprofundada sobre o aspecto político (MEADOWCROFT, 2009, 2011). Como resultado, a busca por uma melhor compreensão das dimensões políticas nas transições energéticas sustentáveis tornou-se uma prioridade de pesquisa (KUZEMKO et al., 2016).

As instituições são importantes elementos que complementam a análise deste processo, uma vez que elas possibilitam a realização de uma análise mais próxima à realidade no tocante à transição energética de baixo carbono. A frequência com que as instituições são descritas como importantes tanto na literatura referente à transição sociotécnica, quanto na transição de energia, denota a existência de uma estreita correlação entre regimes sociotécnicos e instituições. Contudo, a ausência da palavra-chave instituições/institucionalismo dentre as que

têm maior frequência na pesquisa bibliométrica, caracteriza uma lacuna a ser preenchida nos artigos científicos que as considerem como parte importante da análise.

A literatura institucional argumenta que os comportamentos são resultado de ideias, valores e crenças moldados pelo contexto institucional (MEYER & ROWAN, 1977; MEYER, SCOTT & DEAL, 1983; ZUCKER, 1983). Dessa forma, a teoria institucional sugere que as organizações precisam se adaptar às expectativas institucionais (D'AUNNO, SUTTON & PRICE, 1991; DIMAGGIO & POWELL, 1991; SCOTT, 1987), respondendo às pressões provenientes de agências reguladoras e do Estado.

A definição mais comum para instituições é a de “regras” (STEINMO, 2008). Alguns autores enfatizam regras e organizações formais (STREECK & THELEN, 2005), enquanto outros destacam normas e regras informais (MARCUSSEN, 2000; HALL, 1989). Independentemente de se tratar de instituições formais ou normas informais, elas são fundamentais para a política, pois determinam quem participa de um processo decisório e moldam o comportamento estratégico desses participantes.

As políticas, por si só, fazem parte das instituições, pois são os arranjos formais que estruturam as atividades dos atores envolvidos. Mudanças nas políticas, que geralmente representam alterações intencionais nas instituições formais (e, em alguns casos, nas informais) promovidas por atores estatais, geralmente envolvem mudanças institucionais (NEEDHAM & LOUW, 2006) e tendem a ocorrer de forma incremental (NORTH, 1990). Dessa forma, a mudança de políticas pode ser vista como uma forma de desenho institucional (ALEXANDER, 2005) e deve ser guiada por uma compreensão de como as instituições e os atores que as compõem mudam e podem ser modificados.

Alguns autores, como McLeod (1997) e Payne (2013), argumentam que mudanças institucionais significativas tendem a surgir de uma parceria ou senso de cooperação entre o Estado e atores do mercado. Embora as instituições possuam uma natureza “resistente” ou “inercial”, as políticas podem alcançar seus objetivos se considerarem a existência de trajetórias institucionais prévias (NEEDHAM & LOUW, 2006; SMITH & LEWIS, 2011). Assim, uma questão central para o desenho eficaz de políticas é entender se o fracasso de uma política está relacionado ao seu próprio desenho ou se é reflexo de um padrão mais amplo de falhas estruturais nas próprias instituições.

Andrews-Speed (2015) entende que o setor de energia pode ser compreendido como um regime sociotécnico. As instituições, que podem ser compreendidas em parte como um conjunto de regras formais e informais, permitem que os atores tomem decisões a partir da quantidade

limitada de informação que possuem. O institucionalismo pode ser considerado uma ferramenta de análise que complementa e aprofunda os estudos relacionados à transição energética.

O segmento de energia pode ser considerado como um tipo específico de regime sociotécnico, que se desenvolveu ao redor de um conjunto de instituições e tecnologias, de acordo com cada contexto específico no qual está inserido. Existe um alto grau de correlação entre tecnologia e sociedade, no qual uma pode influenciar diretamente no comportamento da outra. A transição energética de baixo carbono, por ser considerada uma transição de regime sociotécnico, alterando a maneira como a sociedade vive, pode demorar um longo período. Como o objetivo é modificar a estrutura e a conjuntura no qual está inserido o sistema de energia, espera-se que esse processo possa levar décadas e ainda seja necessária a intervenção no governo para que as mudanças sejam encorajadas (ANDREWS-SPEED, 2015).

A adaptabilidade e a capacidade de transição guardam uma relação direta com a capacidade de a sociedade de adaptar às mudanças no ambiente, sendo que elas tendem a ser maiores em locais com uma quantidade e qualidade maior de instituições. Nesse sentido, pode-se afirmar que o conhecimento tácito influencia diretamente na capacidade de absorção de novas ideias. Além disso, a capacidade de absorção pode ser influenciada diretamente pelas instituições que impulsionem o fluxo de ideias e informações (ANDREWS-SPEED, 2015).

O institucionalismo emerge como uma abordagem essencial para analisar as complexidades envolvidas nas transições energéticas. Ele permite investigar como as estruturas políticas, econômicas e sociais influenciam as decisões estratégicas e as dinâmicas das políticas públicas. Essa perspectiva foca nos arranjos institucionais que definem as regras do jogo político e moldam as interações entre os atores envolvidos. Desde as dependências de trajetória até os mecanismos de legitimação, o institucionalismo fornece ferramentas analíticas para desvendar como as políticas energéticas são formuladas, implementadas e ajustadas ao longo do tempo (HALL & TAYLOR, 1996; LOCKWOOD et al., 2017).

Ao considerar as transições energéticas como processos sociotécnicos profundamente influenciados por questões políticas, o institucionalismo destaca a interdependência entre sistemas tecnológicos e os contextos institucionais em que estão inseridos. Essa abordagem é particularmente relevante em situações em que mudanças tecnológicas desestabilizam regimes estabelecidos, como no caso da substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis. Nesses contextos, as instituições atuam como mediadoras das tensões entre inovação e continuidade, desempenhando um papel crucial na superação das barreiras institucionais e no suporte à legitimidade das mudanças.

As instituições desempenham papéis centrais na formulação e implementação de políticas energéticas. Elas determinam os incentivos e as restrições para os atores envolvidos, definindo as condições sob as quais a inovação pode prosperar. Conforme destacado por Steinmo & Thelen (1992), o institucionalismo histórico enfatiza as dependências de trajetória, explicando como escolhas políticas passadas limitam as opções disponíveis no presente. No setor energético, isso é evidente em países como a Alemanha, onde as tarifas *feed-in* para energias renováveis foram inicialmente introduzidas como um incentivo para superar o domínio das tecnologias fósseis (LOCKWOOD et al., 2017).

O caso da Alemanha também ilustra como instituições específicas podem moldar o sucesso das políticas de transição energética. O sistema de tarifas garantidas (*feed-in tariffs*), por exemplo, criou um ambiente favorável para a expansão da energia solar e eólica, ao mesmo tempo em que reduziu os custos dessas tecnologias. Esses resultados foram possíveis devido ao forte apoio institucional por parte de sindicatos, associações setoriais e governos regionais. A institucionalização desse mecanismo demonstrou como políticas bem desenhadas podem criar mercados dinâmicos e sustentáveis.

Os atores com poder de veto, definidos por Tsebelis (2002) como aqueles cuja aprovação é necessária para alterar o *status quo*, desempenham papéis decisivos nas transições energéticas. Eles podem acelerar ou bloquear mudanças, dependendo de seus interesses e do contexto institucional. Na Alemanha, por exemplo, o sistema político descentralizado oferece múltiplos pontos de veto, que frequentemente exigem negociações amplas para alcançar consensos. Embora isso possa atrasar a implementação de políticas, também garante maior estabilidade e legitimidade às decisões adotadas.

Em contraste, países com sistema de maioria simples, enfrenta menos barreiras institucionais, mas suas políticas de transição tendem a ser mais vulneráveis a mudanças abruptas de governo. Essa diferença estrutural ajuda a explicar por que a Alemanha, com seu sistema político descentralizado, manteve seu compromisso com a *Energiewende*, mesmo diante de desafios econômicos (EDMONDSON et al., 2019).

A interação entre instituições econômicas e políticas energéticas é outro aspecto central do institucionalismo. Modelos de capitalismo coordenado, como o alemão, tendem a favorecer transições energéticas bem-sucedidas, ao promover a cooperação entre empresas, sindicatos e governos. Essa estrutura facilita a implementação de políticas de longo prazo e incentiva inovações incrementais que fortalecem a competitividade das tecnologias renováveis (HALL & SOSKICE, 2001).

Por outro lado, economias de mercado liberal enfrentam maiores desafios para integrar interesses divergentes em políticas coerentes. A falta de coordenação entre os setores pode dificultar o desenvolvimento de cadeias de valor e limitar os impactos positivos das políticas de transição energética. Isso é evidente na indústria solar fotovoltaica, onde a Alemanha conseguiu construir uma base industrial sólida, graças a políticas públicas direcionadas e um ambiente regulatório que incentivou investimentos privados, desenvolvimento tecnológico e formação de mercado. Em contraste, economias com menor coordenação frequentemente enfrentam dificuldades para alinhar interesses de stakeholders, resultando em fragmentação de esforços e menor competitividade no setor energético renovável. (LOCKWOOD et al., 2017).

Embora o institucionalismo ofereça uma base analítica sólida, ele também apresenta limitações. Uma crítica recorrente é sua tendência a enfatizar a continuidade em detrimento da mudança, o que pode obscurecer dinâmicas disruptivas em transições tecnológicas. Além disso, o institucionalismo histórico, ao focar em dependências de trajetória, pode subestimar o papel de atores emergentes e inovações radicais na transformação dos regimes energéticos (STEINMO & THELEN, 1992).

No entanto, essas limitações podem ser superadas ao integrar perspectivas complementares, como o institucionalismo discursivo, que explora como ideias e narrativas moldam as preferências dos atores e influenciam os processos de legitimação. Essa abordagem pode ser particularmente útil para entender como discursos sobre mudança climática e sustentabilidade estão redefinindo as prioridades das políticas energéticas em diferentes contextos (HALL & TAYLOR, 1996).

As análises baseadas no institucionalismo têm implicações práticas significativas para o desenho de políticas públicas. Elas ressaltam a importância de alinhar as políticas energéticas aos contextos institucionais específicos, levando em conta fatores como a distribuição de poder, os interesses dos atores e as normas culturais. Além disso, sugerem que políticas eficazes devem combinar incentivos econômicos com estratégias de legitimação social, a fim de construir coalizões amplas de apoio (LOCKWOOD et al., 2017; EDMONDSON et al., 2019).

No caso da Alemanha, por exemplo, o sucesso da *Energiewende* reflete a capacidade de suas instituições de coordenar múltiplos interesses e adaptar as políticas às demandas de um mercado global em transformação. Esse exemplo demonstra como o institucionalismo pode oferecer ideias valiosas para a elaboração de estratégias de transição em outros países.

O institucionalismo permite explorar como as instituições moldam as políticas públicas, mediando as interações entre atores e estruturas e influenciando os resultados das políticas. Ao integrar perspectivas históricas e contextuais, o institucionalismo oferece ferramentas para

identificar os desafios e as oportunidades das transições energéticas em diferentes contextos. Assim, contribui não apenas para uma análise mais profunda dos processos de mudança, mas também para o desenvolvimento de políticas mais eficazes e sustentáveis.

A literatura de *Policy Feedback* tem sido usada para analisar a persistência e a redução das pesquisas relativas ao apoio às energias renováveis em diferentes países. Além disso, também auxilia na compreensão dos resultados observados a partir da implementação de políticas. Também aparece como um importante elemento nas análises mais amplas para entender e acelerar as transições sustentáveis.

Essa literatura fornece importantes ferramentas para que se possa pensar nas estratégias existentes nas dinâmicas pós-implementação de políticas. Apesar de ela ter sido importante ao fornecer importantes informações a respeito de mecanismos de estabilidade e mudança, suscita o questionamento de porque as políticas têm se apresentado de maneiras tão diferentes entre países e entre tipos de energias renováveis.

Lockwood (2022) descreve que a literatura de *Policy Feedback* analisou um fator determinante no que se diz respeito aos resultados tão distintos observados durante o processo de implementação de determinada política. As diferenças existentes entre as estruturas institucionais onde as políticas são implementadas, em seu sentido mais amplo e nos quais interesses são moldados. Elas podem influenciar os resultados das políticas implementadas ao longo de todos os estágios. Os tipos de instituições que influenciam o processo dependerão de qual segmento de política está sendo analisado.

As transições energéticas não podem ser compreendidas sem considerar a relação intrínseca entre instituições e sustentabilidade. As instituições estabelecem as bases para a governança sustentável, definindo os parâmetros dentro dos quais as decisões de política são tomadas e implementadas. A estruturação de incentivos, a criação de mercados e a distribuição de custos e benefícios estão diretamente vinculadas às configurações institucionais de cada país. Segundo Andrews-Speed (2015), essas configurações influenciam significativamente a eficácia das políticas energéticas e sua capacidade de atender a objetivos de longo prazo, como a descarbonização e a justiça social.

No contexto alemão, a institucionalização da *Energiewende* destaca o papel crítico das instituições na integração de metas ambientais e econômicas. A abordagem coordenada permitiu o desenvolvimento de políticas integradas que, ao mesmo tempo, estimulam a inovação tecnológica e abordam questões sociais, como o impacto do fechamento de minas de carvão nas comunidades locais. Essa integração só foi possível devido ao envolvimento ativo

de instituições de base, como sindicatos, associações comunitárias e governos regionais, que contribuíram para a construção de um consenso político em torno da transição.

Uma contribuição importante do institucionalismo histórico é o conceito de dependências de trajetória (*path dependence*), que explica como escolhas políticas passadas influenciam e restringem as opções disponíveis no presente. Essa abordagem é particularmente relevante para o setor energético, onde infraestruturas físicas e regulatórias criam inércia institucional. Por exemplo, os sistemas elétricos baseados em combustíveis fósseis muitas vezes se tornam entrincheirados devido a investimentos significativos em infraestrutura, acordos contratuais de longo prazo e redes de interesse associadas.

Na Alemanha, a dependência de trajetória foi mitigada pelo compromisso do governo em reestruturar o setor energético por meio de políticas ambiciosas, como as tarifas *feed-in* e os subsídios para tecnologias renováveis. Esse compromisso foi reforçado por pressões sociais e políticas, especialmente após o acidente nuclear de Fukushima em 2011, que acelerou o fechamento das usinas nucleares do país (LOCKWOOD et al., 2017). Apesar dessas conquistas, a transição enfrenta desafios significativos, incluindo o custo elevado da eletricidade para consumidores e a necessidade de atualizar a infraestrutura de transmissão para acomodar a geração descentralizada de energia renovável.

Os diferentes modelos de capitalismo também influenciam as dinâmicas de inovação e a capacidade dos países de implementar transições energéticas eficazes. No modelo coordenado da Alemanha, a colaboração entre empresas, sindicatos e governo facilita a implementação de políticas que promovem a inovação incremental e o desenvolvimento de mercados globais para tecnologias renováveis. Esse modelo contrasta com as economias de mercado liberal, onde a ênfase em soluções de curto prazo muitas vezes limita a capacidade de planejamento de longo prazo (LOCKWOOD, 2022).

Este debate também pode ser encontrado em Gutierrez (2014), que utiliza o marco teórico das Variedades de Capitalismo (VOCs) de Hall & Soskice (2000) para discutir como diferentes sistemas de governança afetam a transição para um sistema energético sustentável. Economias de mercado coordenadas (CMEs), baseiam-se em mecanismos deliberativos que promovem a colaboração entre empresas, governo e sindicatos. Esse modelo facilita o estabelecimento de metas de sustentabilidade de longo prazo, bem como a criação de políticas que promovem inovações incrementais no setor energético.

Por outro lado, Economias de Mercado Liberal (LMEs), apresentam um modelo mais dependente de mecanismos de mercado e estruturas hierárquicas para a coordenação das atividades econômicas. Segundo Gutierrez (2014), essa abordagem prioriza soluções de curto

prazo baseadas em custos financeiros imediatos, dificultando a incorporação de objetivos ambientais em suas políticas públicas.

Por exemplo, a Alemanha, como uma Economia de Mercado Coordenada (CME), desenvolveu um sistema de treinamento vocacional, financiado em grande parte por empresas, que apoia a força de trabalho na adaptação às mudanças tecnológicas. Além disso, as instituições financeiras alemãs demonstraram uma maior disposição para financiar pequenas e médias empresas no setor de renováveis, contribuindo para a criação de uma base industrial diversificada e resiliente (HALL & SOSKICE, 2001).

A China, por sua vez, opera em um modelo de "capitalismo estatal" fortemente centralizado, no qual o governo desempenha um papel dominante na definição de metas e na coordenação das políticas energéticas. Esse modelo apresenta similaridades com as economias de mercado coordenadas (CMEs), especialmente pela capacidade de planejamento de longo prazo e de coordenação institucional. Por meio de mecanismos deliberativos centralizados, o governo chinês alinha empresas estatais, reguladores e outros atores importantes em torno de objetivos estratégicos, como o aumento da eficiência energética, a expansão de fontes renováveis e a redução da intensidade de carbono. Exemplos dessa abordagem são os planos quinquenais que estabelecem metas para o setor energético e incentivam investimentos em larga escala em tecnologias renováveis, como energia solar e eólica. No entanto, esse modelo centralizado também enfrenta desafios, incluindo ineficiências sistêmicas e a ausência de participação democrática nos processos decisórios.

A Índia, por sua vez, segue um modelo de capitalismo híbrido, caracterizado por uma governança energética fragmentada e elementos que remetem às economias de mercado liberal (LMEs). Nesse contexto, as decisões políticas frequentemente dependem de mercados e incentivos financeiros, enquanto a descentralização política reflete a diversidade de atores e interesses envolvidos. Apesar de sua estrutura fragmentada, a Índia tem implementado iniciativas significativas, como o Plano Nacional de Ação sobre Mudança Climática (NAPCC), que inclui missões voltadas para energia solar e eficiência energética. No entanto, a execução dessas políticas enfrenta barreiras significativas, como a falta de infraestrutura adequada, limitações de financiamento e disputas regulatórias, que frequentemente restringem seu impacto em comparação com os avanços observados na China.

Ao relacionar os modelos da China e da Índia com o debate sobre as Variedades de Capitalismo, é possível identificar dinâmicas distintas em suas trajetórias de transição energética. A China, com seu modelo centralizado e coordenado, se assemelha às CMEs em sua capacidade de promover avanços rápidos e consistentes, ainda que careça de maior participação

de atores privados e locais. Por outro lado, a Índia reflete aspectos das LMEs, com maior flexibilidade e dependência de mecanismos de mercado, mas sofre com a fragmentação institucional e desigualdades regionais que limitam a eficácia de suas políticas energéticas. Assim, enquanto a China se beneficia de uma coordenação centralizada, a Índia precisa superar desafios institucionais para acelerar sua transição para uma economia de baixo carbono.

Além das dimensões econômicas e políticas, as transições energéticas também são moldadas por fatores sociais e culturais. A aceitação pública de tecnologias renováveis, por exemplo, depende de narrativas culturais, percepções estéticas e valores comunitários. No caso da Alemanha, a cultura de consenso desempenhou um papel central na superação da resistência local a projetos de energia renovável, como parques eólicos e solares.

Em contraste, países com culturas políticas mais competitivas frequentemente enfrentam maiores desafios para implementar transições energéticas. Eles lidam com uma oposição significativa a projetos de energia renovável em áreas rurais, onde preocupações estéticas e econômicas frequentemente entram em conflito com os objetivos nacionais de descarbonização. Esses desafios destacam a importância de sistemas de planejamento que integrem perspectivas locais e nacionais, promovendo a legitimidade das políticas energéticas (EDMONDSON et al., 2019).

À medida que as transições energéticas se tornam uma prioridade global, instituições internacionais desempenham um papel essencial na coordenação de políticas e na disseminação de boas práticas. No contexto europeu, a União Europeia tem sido um ator central, criando metas climáticas e energéticas para seus Estados-membros, como exemplificado pelo Pacto Verde Europeu. Essa estrutura multilateral proporciona um quadro para a cooperação regional, incentivando a inovação e a troca de experiências entre os países (LOCKWOOD et al., 2017). No caso de países como a Alemanha, essas diretrizes são integradas ao nível nacional por meio de processos deliberativos e alinhados com a política regional, promovendo a convergência de estratégias em direção à descarbonização. Essa interação reflete a integração multilateral europeia, em que os países participam ativamente de um modelo coordenado de governança climática e energética.

Por outro lado, no contexto da China e da Índia, o peso das instituições multilaterais é consideravelmente menor. Ambos os países possuem estruturas político-econômicas que priorizam a coordenação interna e o controle nacional sobre a governança energética, em detrimento de uma integração regional ou multilateral mais profunda. A China, por exemplo, adota um modelo estatal centralizado, onde os planos quinquenais e as metas estabelecidas pelo governo nacional são os principais direcionadores das políticas energéticas, reduzindo a

influência de instituições multilaterais na formulação de suas estratégias. Da mesma forma, a Índia, com sua governança descentralizada, foca mais em políticas adaptadas às suas necessidades regionais e internas.

Essa diferença de abordagem explica, em alguma medida, por que a análise sobre transição energética no capítulo 2 não se aprofunda em instituições internacionais no caso da China e da Índia. Enquanto na Europa a dimensão multilateral é essencial para entender a dinâmica das políticas climáticas, na China e na Índia a governança energética é predominantemente moldada por arranjos internos. No entanto, isso não significa que esses países estejam desconectados das estruturas multilaterais. Ambos participam de fóruns como o Acordo de Paris e o G20, embora a implementação de suas políticas energéticas seja, em grande parte, determinada por suas prioridades e contextos domésticos específicos. Essa abordagem distinta justifica o foco analítico diferenciado entre as regiões e os países discutidos.

O avanço das transições energéticas requer um esforço contínuo para superar barreiras institucionais e alinhar os interesses dos múltiplos atores envolvidos. À medida que novas tecnologias ganham destaque, as instituições terão que se adaptar para apoiar sua implementação. Além disso, questões relacionadas à justiça social e à equidade na distribuição dos custos e benefícios da transição se tornarão cada vez mais centrais.

A integração dessas considerações no planejamento energético exige um compromisso renovado com a inovação institucional. Isso inclui a criação de mecanismos participativos que permitam às comunidades locais influenciarem as decisões políticas, bem como a promoção de cooperação internacional para enfrentar desafios globais, como as mudanças climáticas e a segurança energética.

Quadro 3 apresenta uma síntese da comparação entre os arcabouços teóricos apresentados do TIS e do *Policy Mix*, destacando suas definições, principais conceitos, componentes e relevância para políticas públicas. Ambos os arcabouços compartilham o objetivo de promover a inovação e a transição sustentável, mas diferem em suas abordagens analíticas e no papel das instituições.

O TIS foca em funções de inovação e nas dinâmicas sistêmicas que moldam o desenvolvimento e a difusão de tecnologias, enquanto o *Policy Mix* enfatiza a combinação de estratégias, instrumentos e processos políticos em múltiplos níveis de governança. Apesar de suas diferenças, ambos reconhecem as instituições como elementos centrais na promoção ou restrição da inovação, o que reforça sua complementaridade como ferramentas analíticas.

Essa análise comparativa ilustra como os dois arcabouços oferecem perspectivas distintas, porém complementares, para abordar os desafios da transição energética. O TIS permite identificar falhas sistêmicas específicas que podem ser corrigidas por políticas públicas, enquanto o *Policy Mix* contribui para uma visão mais ampla das interações entre diferentes instrumentos e níveis de governança. Assim, a integração dessas abordagens amplia a capacidade de análise e intervenção em políticas voltadas para a transição energética sustentável.

Quadro 3 - Quadro síntese dos arcabouços teóricos utilizados

<b>Arcabouço Teórico</b>	<b>Sistemas de Inovação Tecnológica (TIS)</b>	<b><i>Policy Mix</i></b>	<b>Semelhanças</b>
<b>Artigos importantes</b>	Hekkert et al. (2007; Bergek et al. (2008; 2015); Bergek (2019)	Rogge & Reichardt (2015); Rogge & Stadler (2023)	-
<b>Definição</b>	Conjunto de políticas e instrumentos para alcançar objetivos de inovação ou transição.	Estrutura de análise que examina o desenvolvimento e difusão de tecnologias inovadoras.	Ambos buscam promover a inovação e a transição sustentável.
<b>Foco da análise</b>	Compreender a estrutura e dinâmica dos sistemas de inovação e a sua relação com o contexto inserido para entender o desenvolvimento de determinada tecnologia	Políticas públicas e instrumentos (subsídios, regulamentações, incentivos) que influenciam as inovações.	Envolvem intervenções para corrigir falhas sistêmicas que impedem inovações, sejam elas tecnológicas ou sociais.
<b>Principais conceitos</b>	Funções de inovação: desenvolvimento e difusão de conhecimento, experimentação empreendedora, orientação de pesquisa, criação de mercado, legitimação, mobilização de recursos e desenvolvimento de externalidades positivas.	Políticas e mix de instrumentos em vários níveis de governança (local, regional, nacional, supranacional). Estruturas de políticas, combinações de instrumentos, consistência e credibilidade de políticas.	-
<b>Componentes</b>	1. Atores 2. Redes de interações 3. Instituições e funções de inovação	1. Estratégia política 2. Instrumentos políticos 3. Processos institucionais e políticos	Ambos reconhecem o papel das instituições como facilitadores ou entraves.

		(dinâmicas de implementação e resistência)	
<b>Papel das Instituições</b>	Instituições são fundamentais no TIS, pois estabelecem regras formais e informais que moldam o comportamento dos atores e influenciam o desenvolvimento e difusão da tecnologia.	Instituições aparecem nas dinâmicas de política e nos processos de implementação, resistência e adaptação de políticas (mudanças regulatórias, políticas públicas ajustadas à medida que surgem novas inovações).	Instituições (regras, normas, leis) desempenham um papel central em moldar o ambiente de inovação.
<b>Limitações</b>	A tecnologia é julgada com base no conceito de TIS. Foco demasiado nas funções do sistema em detrimento das mudanças no sistema. Pode vir a negligenciar atores menores.	Complexidade de coordenação e integração dos diversos instrumentos e atores envolvidos. Dificuldades de mensuração do impacto de cada política.	Em ambos os casos, a complexidade da análise sistêmica pode ser um fator limitante. Dificuldade em mensurar interações e dependência de contextos institucionais.
<b>Relevância para políticas públicas</b>	Ajuda a identificar falhas no sistema de inovação que podem ser corrigidas através de políticas	Possibilita uma visão abrangente sobre como combinar diferentes políticas para alcançar os objetivos pretendidos	Ambas buscam compreender como as políticas públicas podem lidar com questões complexas, como o processo de transição e focam em múltiplos atores e níveis de governança.

**Fonte:** GEELS, 2002; 2004; SMITH, VOß & GRIN, 2010; HEKKERT ET AL., 2007; BERGEK et al., 2008, 2015; BERGEK, 2019; ROGGUE & REICHARDT, 2015; ROGGUE & STADLER; 2023. Elaboração própria.

### 2.2.5 Uma sugestão de arcabouço teórico-analítico

Com o objetivo de enfrentar as consequências resultantes das mudanças climáticas, necessita-se pensar na descarbonização do sistema energético. Assim, Reichardt et al. (2016) tratam da necessidade de descarbonização do sistema. Nesse sentido, ela não significa apenas a substituição tecnológica, mas também adaptação do sistema existente. Meadowcroft (2009) e Rotmans; Kemp & Van Asselt (2001), também realizam análises que colocam em evidência a importância de mudanças incrementais, uma vez que a mudança tecnológica pode ser um processo custoso e demorado, por envolver adaptações e mudanças do sistema como um todo.

Li & Taeihagh (2020) realizaram uma análise da evolução das políticas implementadas na China que buscavam a redução das emissões de GEE, mapeando cronologicamente a intensidade e a densidade delas ao longo do tempo, além das mudanças na combinação de instrumentos de política. A queima do carvão é o responsável pela maior parte da emissão de GEEs no país, trazendo múltiplos problemas ambientais e de saúde para sua população.

Apesar de as políticas fazerem parte da estrutura institucional que constrói a TIS e representarem parte importante da análise, são poucos os estudos que concentram esforços nas políticas e em seus impactos. Adicionalmente, menor ainda a quantidade de estudos existente sobre a perspectiva ampliada de *Policy Mix*. Por outro lado, existe uma crescente necessidade em considerá-la, seja pelos pesquisadores ou formuladores de política, especialmente nas literaturas sobre o clima, energia e inovação política.

O principal argumento sobre a necessidade de transformação do sistema sociotécnico, especialmente o de energia, é o de que essa transição é retardada por diversas falhas de mercado, do sistema e institucionais existentes, que requerem intervenções de política. Nesta literatura, compreende-se uma visão mais abrangente de política, a qual enfatiza a importância de aspectos políticos, como as características do design do instrumento de política, as características do *Policy Mix* e processos políticos.

Apesar dos esforços para se construir uma abordagem mais abrangente sobre o *Policy Mix*, sua definição na literatura pode ser considerada superficial e ambígua. Assim, estabelecer uma definição mais bem sistematizada, que diferencia instrumentos de política, estratégia de política, processos políticos e características mais abrangentes como credibilidade são fundamentais para melhorar a clareza analítica de seus estudos empíricos.

Rogge & Reichardt (2013), incorporaram a abordagem de *Policy Mix*, incluindo-a explicitamente como um dos componentes do componente estrutural de instituições na TIS. Como a estrutura do TIS é determinada amplamente pelo seu funcionamento, deve-se focar no impacto do *Policy Mix* no funcionamento do TIS. O arcabouço analítico apresentado por eles explora, de um lado, o papel do *mix* de políticas, incluindo sua estratégia, o conjunto de instrumentos, os processos de formulação e implementação. Por outro, permite avaliar como essas políticas influenciam o desenvolvimento de aspectos específicos do sistema de inovação tecnológica. A efetivação de mudanças no mix de políticas requer interações entre formuladores de políticas e outros atores dentro do TIS. Além disso, também são identificadas as organizações-chave e descreve seus papéis no contexto de problemas específicos enfrentados pelo TIS.

Segundo Reichardt et al. (2016) a atividade empreendedora inicial requer regulamentação, que se manifesta por meio de componentes do *Policy Mix*. Além disso, a maior parte dos problemas sistêmicos é tratada por meio da modificação de instrumentos de política, especialmente aqueles relacionados à demanda e instrumentos sistêmicos. Problemas ligados à demanda estão geralmente associados à formação de mercado, atividades empreendedoras e à orientação da pesquisa. Ele dá um primeiro passo em direção à explicitação da influência das políticas no desenvolvimento do TIS. Uma abordagem específica permite compreender de forma mais detalhada o papel e a eficácia dos elementos, processos e características do *Policy Mix*. Seu papel no TIS deve ser visto como mais do que um simples componente institucional ou funcional (como a formação de mercado), pois essa visão não reflete adequadamente sua importância central.

Assim, pode-se elencar quatro principais implicações para os formuladores de política:

1. **Estratégias políticas de longo prazo:** A existência de uma estratégia política estável e ambiciosa a longo prazo é altamente vantajosa para o desenvolvimento do TIS, pois cria expectativas positivas no mercado.
2. **Instrumentos de demanda:** Ferramentas desenhadas especificamente para novas tecnologias, como tarifas *feed-in* adequadas (FIT), desempenham um papel fundamental no desenvolvimento do TIS. Além disso, instrumentos sistêmicos são essenciais para apoiar projetos piloto e viabilizar tecnologias emergentes e infraestrutura.
3. **Compromisso político confiável:** Um compromisso político consistente com a tecnologia é crucial para uma TIS emergente, pois funciona como um motor principal para o avanço frente a problemas sistêmicos.
4. **Ajustes dinâmicos e flexíveis:** Dado o caráter dinâmico do TIS, ajustes flexíveis são indispensáveis para seu desenvolvimento. É necessário estabelecer processos que equilibrem a estabilidade com a capacidade de adaptação às mudanças necessárias.

A abordagem baseada no TIS deve se beneficiar de uma distinção clara entre as políticas (ou *Policy Mix*), as estruturas e as funções do TIS, proporcionando maior clareza conceitual e eficácia na aplicação.

Kathoon et al. (2024), descrevem que estudos relacionados à transição para uma economia de baixo carbono que possuem como arcabouço teórico principal a TIS são divididos em duas grandes abordagens.

Subsequent studies furthered TIS-based transition studies in two major approaches – one integrated TIS with the multilevel perspective (MLP) (e.g., Markard and Truffer, 2008; Hillman et al., 2011; Walrave and Raven, 2016; Raven and Walrave, 2020) and the other with the policy mix concept (e.g., Kivimaa and Kern, 2016; Reichardt et al., 2016; Kivimaa et al., 2017) (KATHOON, et al., 2024. p. 3).

Estudos recentes combinam o conceito de TIS com abordagens como a Perspectiva Multinível (MLP) e o *Policy Mix*. A MLP argumenta que as transições acontecem pela interação de três níveis: nichos, regimes e o *landscape*. Essa interação gera pressões que desestabilizam regimes existentes, possibilitando que tecnologias inovadoras, oriundas de nichos, emergjam. A integração desses conceitos permite uma análise mais completa das dinâmicas internas (atores, regras, estratégias) e externas (pressões sociotécnicas) que influenciam as transições.

A literatura que utiliza a combinação entre TIS e MLP explora a dinâmica das inovações tecnológicas e suas transições, porém apresenta lacuna quanto ao processo de formulação de políticas que envolvam vários setores. Em outras palavras, elas têm dificuldades em compreender como eles interagem entre si quanto ao processo de transição. Assim, para que se pudesse dar conta desta abordagem multissetorial referente ao processo de transição, foi realizada a análise conjunta dos conceitos de TIS e *Policy Mix*.

Kathoon et al. (2024) descrevem que, embora a integração entre TIS e *Policy Mix* tenha ganhado destaque nos últimos anos, ela apresenta lacunas ao tentar explicar o processo de desestabilização de mudanças transformativas. O pressuposto básico é que o conjunto de políticas formuladas e implementadas precisam ao mesmo tempo promover e fomentar a inovação em busca de uma menor emissão de GEEs e desestabilizar o paradigma baseado em combustíveis fósseis.

Enquanto as pesquisas relacionadas ao *Policy Mix* têm aumentado nos últimos anos, Kathoon et al. (2024) formularam uma análise sobre o conjunto existente de objetivos de política, instrumentos e processos através de um arcabouço que, elaborados das funções do TIS, estuda como o conjunto de políticas tanto podem apoiar a criação de novas TIS (e inovações de nicho) e desestabilizar regimes insustentáveis. Aqui, importa destacar dois movimentos simultâneos. São necessárias tanto novas tecnologias, quanto a desestabilização de regimes antigos. No caso da transição de energia, seria a desestabilização da matriz energética baseada nos combustíveis fósseis para a matriz baseada nos renováveis. O movimento deve ser ao mesmo tempo o de inserir novas tecnologias na matriz, quanto descarbonizar a matriz existente.

Um regime dominante se refere a estruturas dominantes enraizadas, tecnologias, infraestruturas, regras e crenças formadas ao redor de um determinado sistema sociotécnico

(DOSI, 1982). Esses regimes sociotécnicos são marcados por dependências de trajetória e processos de *lock-in* que dificultam mudanças, como argumentam Geels & Schot (2007).

Para Kathoon et al. (2024), no caso de dilemas relacionados ao transporte urbano, por exemplo, os governos adotaram políticas multissetoriais que promovem eficiência e práticas de baixa emissão, desencorajando sistemas poluentes e incentivando a transição para tecnologias de baixo carbono.

Em economias em desenvolvimento, frequentemente surge o dilema entre priorizar o crescimento econômico ou adotar políticas de mitigação. Além disso, essas regiões enfrentam características como instituições fracas, regimes instáveis, desigualdades profundas e governança limitada, que afetam diretamente o processo de transição. Estudos que investiguem a interação entre setores no contexto do Sul global ainda são insuficientes (KATHOON et al., 2024).

Na Índia, o dilema entre priorizar o crescimento econômico e adotar políticas de mitigação climática é particularmente evidente, refletindo os desafios enfrentados por muitas economias em desenvolvimento. Como uma das maiores economias emergentes, a Índia precisa equilibrar a necessidade de fornecer energia acessível para uma população em crescimento e promover o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que enfrenta pressões internacionais para reduzir suas emissões de carbono. Este equilíbrio é dificultado por características como desigualdades regionais, infraestrutura insuficiente e governança fragmentada, que comprometem a implementação de políticas de transição energética eficazes (SOBHA, 2022).

O *Policy Mix* também abrange instrumentos econômicos (como subsídios e financiamento de P&D), regulatórios (banimentos tecnológicos, taxaço) e "soft" (disseminação de informações), que podem ser integrados para apoiar o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias dentro do TIS.

Walrave e Raven (2016) identificam quatro cenários de transição:

1. **Caminho de transformação:** Pressões externas afetam uma TIS emergente, mas enfrentam forte resistência do regime.
2. **Desalinhamento e realinhamento:** A resistência do regime é baixa, facilitando mudanças.
3. **Caminho de substituição tecnológica:** A TIS se desenvolve, mas permanece alinhada a elementos dominantes.

4. **Caminho de reconfiguração:** Regimes adaptam elementos do TIS ao sistema existente, indicando baixa resistência.

Esses cenários ajudam a entender a formulação de políticas e como elas podem superar lacunas sistêmicas em processos multissetoriais ainda pouco compreendidos. Nesse contexto, a integração do *Policy Mix* com a TIS é particularmente relevante, permitindo que as políticas desempenhem tanto funções de suporte a nichos quanto funções de desestabilização de regimes dominantes.

A ideia central é que as políticas precisam equilibrar inovações de baixa emissão com a desestabilização de regimes poluentes, promovendo transições sustentáveis (Kivimaa & Kern, 2016). Esse equilíbrio é essencial para impulsionar transformações profundas, especialmente em países em desenvolvimento, onde dinâmicas de governança fraca e desigualdades estruturais representam desafios adicionais.

A integração dos referidos conceitos é particularmente útil para entender a importância da formulação de políticas que sejam orientadas para a transição, mas a falta de compreensão sistêmica no processo de políticas multissetoriais ainda permanece pouco explorada. Dessa forma, estudos posteriores incorporaram o conceito de *Policy Mix* para preencher esta lacuna.

Concomitante ao fato de que estudos que relacionam o conceito de TIS ou de *Policy Mix* ganharam destaque na literatura para a formulação de políticas, notou-se a ausência de dinâmicas de desestabilização inerentes às mudanças transformadoras. Kivimaa e Kern (2016) reformularam e integraram a TIS com elementos de nichos e desestabilização de regimes, criando duas categorias: funções de suporte a nichos e função de desestabilização de regimes. Tal abordagem foi denominada de *Policy Mix* criativo-destrutivo para inovação.

A premissa fundamental do conceito de *Policy Mix* em transições sustentáveis é a de que as políticas precisam promover inovações de baixa emissão e, ao mesmo tempo, desestabilizar regimes de alta emissão com o intuito de estimular as transições (Kivimaa & Kern, 2016).

A partir das reflexões realizadas de outras pesquisas já realizadas, nas quais foram utilizadas abordagens teóricas que combinavam *Policy Mix* com a TIS, optou-se pela realização de análise documental e do mapeamento das políticas. A Figura 10 ilustra de forma esquemática as etapas que devem ser percorridas para analisar as políticas e instrumentos de política implementados no grupo de países selecionados que tenham como objetivo a transição energética de baixo carbono.

Figura 10 - Etapas de Análise



Fonte: Elaboração própria.

O primeiro passo é identificar os principais objetivos de política pública relacionados à transição energética em cada um dos países selecionados. Isso permite compreender os propósitos gerais estabelecidos pelo governo e verificar se as estratégias e instrumentos implementados são compatíveis com essas metas.

Na segunda etapa, selecionam-se três estratégias principais de políticas públicas voltadas para a descarbonização dos setores energéticos. Essas estratégias são analisadas com base na tipologia de instrumentos de política pública, no terceiro passo, proposta por Christopher Hood (1983): nodalidade (capacidade de disseminação ou coleta de informações), autoridade (poder legítimo para regulamentar ou obrigar), recursos financeiros (utilização de fundos públicos para incentivos ou subsídios) e organização (uso de recursos materiais e humanos do governo).

O quarto passo consiste em aplicar o *framework* ampliado de Li & Taeihagh (2020) para examinar as relações entre as estratégias de políticas públicas, os instrumentos utilizados e os objetivos gerais de transição energética do país. Nessa etapa, avalia-se a aderência das estratégias a três pilares fundamentais: segurança de abastecimento energético, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade.

Por fim, na quinta etapa, verifica-se quais funções do Sistema de Inovação Tecnológica (TIS) estão relacionadas às políticas analisadas. As funções incluem o desenvolvimento e difusão de conhecimento, experimentação empreendedora, orientação da pesquisa, criação de mercado, legitimação, mobilização de recursos e desenvolvimento de externalidades positivas. Essa análise permite identificar quais funções do sistema o governo busca fortalecer ou corrigir para garantir o funcionamento eficaz do sistema e promover uma transição energética bem-sucedida.

Esse processo oferece uma estrutura abrangente para avaliar a coerência, eficácia e impactos das políticas públicas em relação à transição energética, garantindo alinhamento com os objetivos nacionais e globais de sustentabilidade.

A articulação entre os arcabouços de *Policy Mix* e *TIS* revelou-se particularmente útil para compreender a transição energética como um processo multidimensional, que envolve não apenas mudanças tecnológicas, mas também transformações institucionais e sociais. A análise demonstrou que os instrumentos de política, ao serem desenhados e implementados em contextos específicos, devem responder a objetivos múltiplos e muitas vezes conflitantes, como sustentabilidade ambiental, segurança energética e acessibilidade econômica. Nesse sentido, o capítulo reforçou a importância de avaliar tanto a diversidade quanto a intensidade dos instrumentos, considerando suas interações e efeitos sobre os sistemas sociotécnicos.

A construção dessa base teórica não apenas fornece um referencial para a análise das trajetórias de descarbonização em diferentes contextos nacionais, mas também permite identificar e categorizar os fatores que facilitam ou obstaculizam as transições sociotécnicas. Com isso, o arcabouço aqui desenvolvido será aplicado no próximo capítulo para analisar de forma comparativa as estratégias e os conjuntos de instrumentos adotados por Alemanha, China e Índia. O objetivo será explorar como esses países, com contextos institucionais, econômicos e tecnológicos distintos, têm estruturado suas políticas gerais de transição energética e enfrentado os desafios associados à redução de sua dependência de combustíveis fósseis.

### 3 EXPERIÊNCIAS COMPARADAS

A transição energética, como exposto até o presente capítulo, consiste em um processo complexo, no qual vai além de uma simples substituição tecnológica. Para que se torne efetiva, são necessárias transformações sociotécnicas que também contemplem as dimensões de sustentabilidade e que procurem mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas.

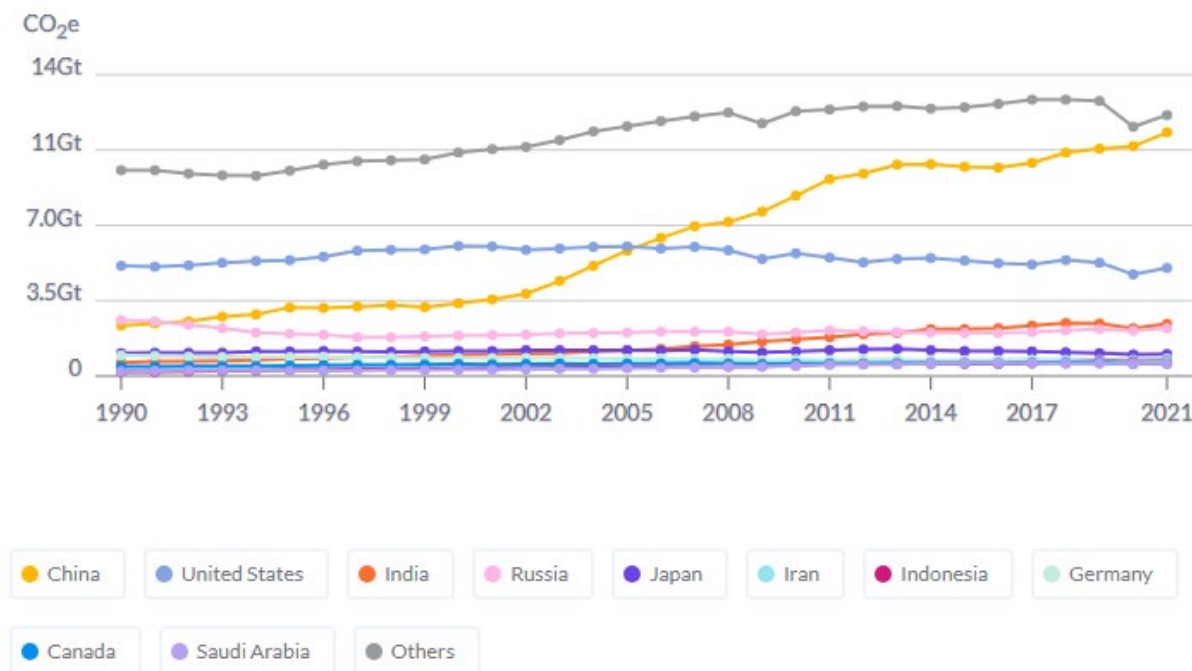
As transições energéticas representam um dos maiores desafios e oportunidades do século XXI, sendo fundamentais para enfrentar as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável. Como visto no capítulo 1, a busca por sistemas energéticos mais limpos, seguros e eficientes é um objetivo global, especialmente no contexto dos compromissos assumidos no Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No entanto, as trajetórias para alcançar uma transição energética sustentável variam amplamente entre os países, refletindo diferenças em estruturas institucionais, capacidades econômicas, prioridades políticas e características socioculturais.

Dentre os casos mais emblemáticos, destacam-se a Alemanha, pioneira na implementação de políticas voltadas à descarbonização por meio da *Energiewende*, e a China, que tem liderado as estatísticas tanto de capacidade instalada, quanto de emissão de poluentes (IEA, 2024a). Apesar de suas particularidades, ambos os países oferecem lições valiosas sobre como diferentes abordagens podem ser empregadas para superar barreiras e alavancar oportunidades em direção a uma economia de baixo carbono. Adicionalmente, em função do peso econômico, populacional, além da dotação de fatores, esta pesquisa também se debruçará sobre a Índia.

A seleção dos países para análise neste estudo foi baseada em critérios que consideram a relevância de suas trajetórias no contexto da transição energética global e das emissões de carbono. Optou-se por escolher a China, a Índia e a Alemanha, pois esses países representam diferentes estágios de desenvolvimento econômico, configurações energéticas e níveis de contribuição para as emissões globais. A China e a Índia foram escolhidas por serem economias emergentes com alto crescimento industrial e populacional, dependentes de combustíveis fósseis, especialmente carvão, e, portanto, enfrentam desafios significativos para equilibrar desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. Já a Alemanha, como uma economia avançada, destaca-se por seu compromisso com a descarbonização e sua liderança na implementação de políticas energéticas, como a substituição de fontes fósseis por energias

renováveis. Essa diversidade permite uma análise comparativa abrangente, refletindo os distintos desafios e oportunidades da transição energética em diferentes contextos globais.

Figura 11 - Emissão de GEEs relacionadas ao setor de energia (entre 1990 – 2021).



Fonte: *Climate Watch Data* (2025)

A Figura 11 ilustra a emissão de GEEs entre os anos de 1990 e 2021, relacionadas ao setor de energia. Elas evidenciam o impacto das diferentes matrizes energéticas e estratégias de desenvolvimento econômico na contribuição de cada país para as mudanças climáticas. A análise destaca o papel central do setor energético, particularmente em economias com forte dependência de combustíveis fósseis.

A China se sobressai pelo crescimento exponencial de suas emissões relacionadas a energia, especialmente a partir de 2000, atingindo cerca de 11 Gt de CO<sub>2</sub> em 2021. Esse aumento está diretamente ligado à dependência de carvão, que sustenta sua rápida industrialização e urbanização. Apesar de esforços recentes para diversificar sua matriz energética, a China mantém o título de maior emissor global de GEEs no setor de energia, evidenciado por sua curva ascendente e pela continuidade do uso intensivo de carvão.

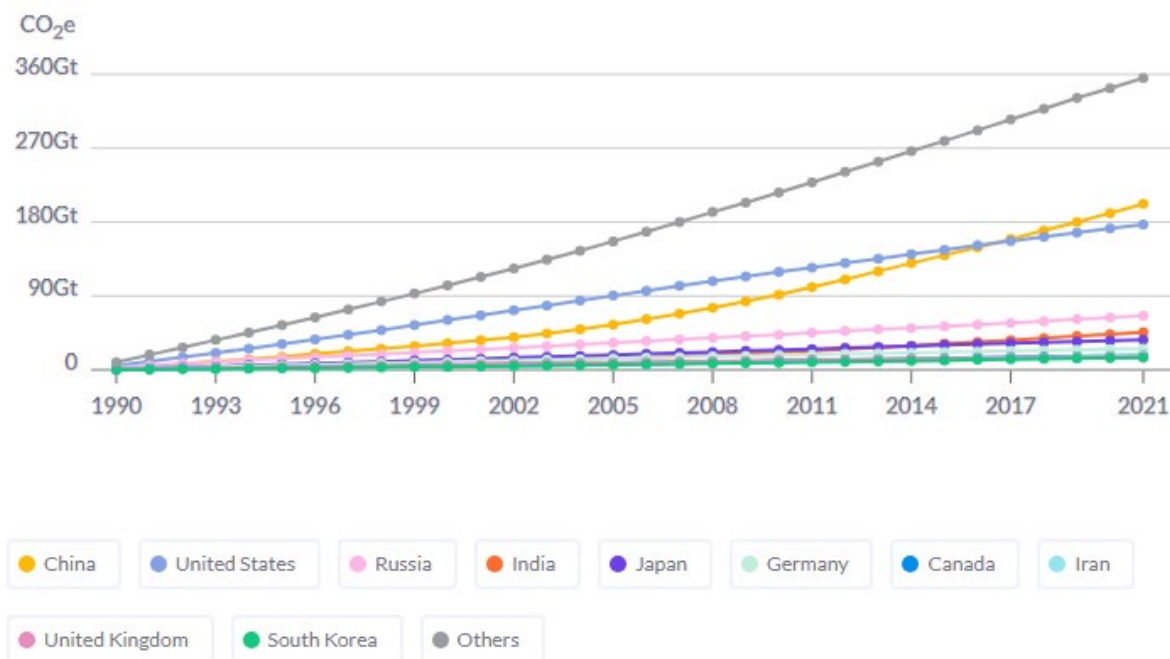
A Índia, embora em menor escala, também apresenta aumento contínuo de emissões energéticas, alcançando cerca de 2.5 Gt de CO<sub>2</sub> em 2021. Esse crescimento está associado ao papel predominante do carvão em sua matriz elétrica e ao aumento da demanda energética resultante de sua expansão econômica e populacional.

Em contraste, a Alemanha demonstra uma trajetória de declínio nas emissões energéticas desde os anos 1990. Essa redução reflete os avanços alcançados pela política de transição energética (*Energiewende*), que prioriza a substituição do carvão por fontes renováveis, a eficiência energética e o fechamento gradual de usinas nucleares e a carvão. Em 2021, as emissões energéticas da Alemanha são consideravelmente menores em comparação às economias emergentes e outros grandes emissores, como os Estados Unidos.

Enquanto China e Índia ainda enfrentam dificuldades significativas para reduzir suas emissões devido à forte dependência de carvão e à crescente demanda energética, a Alemanha exemplifica como políticas climáticas podem ajudar a dissociar o crescimento econômico das emissões energéticas. Esses contrastes destacam a necessidade de abordagens personalizadas para descarbonizar o setor de energia, respeitando o contexto econômico, energético e social de cada país, e reforçam o papel crítico do setor energético nas estratégias globais de mitigação climática.

A análise das emissões históricas e acumuladas revela uma conexão direta entre o ritmo de emissões ao longo do tempo e o impacto global de cada país no aquecimento climático. Países como a China e a Índia demonstram trajetórias de crescimento acelerado nas emissões históricas, especialmente nas últimas décadas, impulsionadas pelo rápido crescimento econômico e pela dependência do carvão. Isso contribui para sua relevância nas emissões acumuladas, com a China liderando globalmente e a Índia ocupando uma posição de destaque entre os países emergentes. Em contraste, a Alemanha apresenta uma trajetória de redução nas emissões históricas, o que se reflete em uma contribuição menor para as emissões acumuladas, destacando seus esforços na transição energética. Essas diferenças evidenciam as desigualdades nas responsabilidades climáticas e os desafios distintos enfrentados por países em diferentes estágios de desenvolvimento.

Figura 12 - Emissões acumuladas de GEEs relacionadas ao setor de energia.



Fonte: *Climate Watch Data* (2025).

A Figura 12 apresenta uma análise das emissões acumuladas de GEEs em termos de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e), entre 1990 e 2021. As emissões acumuladas ajudam a fornecer uma visão complementar às emissões históricas analisadas anteriormente. Enquanto as emissões históricas mostram a evolução ano a ano, as emissões acumuladas permitem compreender o impacto total de cada país no aquecimento global ao longo do tempo.

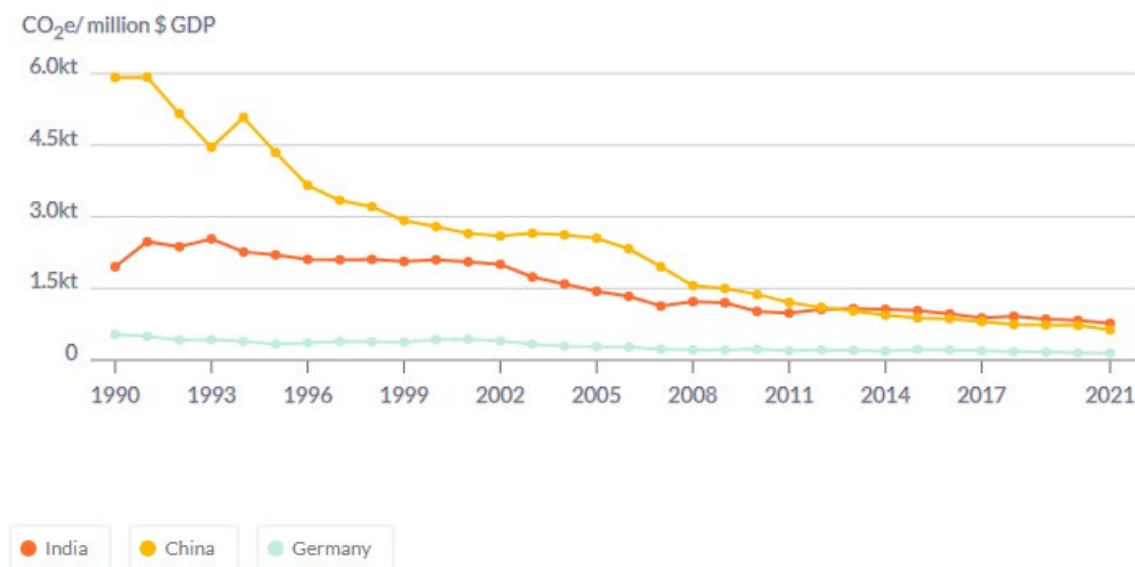
A China lidera as emissões acumuladas, com um crescimento acelerado desde os anos 2000, resultado de sua industrialização rápida e alta dependência de carvão. O impacto cumulativo reflete o papel central da matriz energética baseada em combustíveis fósseis para sustentar seu crescimento econômico. A análise histórica revela como o aumento exponencial de emissões em anos recentes teve um impacto significativo no total acumulado.

A Índia, embora com emissões acumuladas menores que a China, apresenta uma curva de crescimento constante. Sua dependência de carvão e o crescimento populacional e econômico explicam a trajetória histórica e seu impacto acumulado. A conexão entre as emissões históricas e acumuladas reforça como a Índia, apesar de ainda estar em um estágio de transição energética, tem aumentado sua contribuição global para as emissões ao longo do tempo.

Por outro lado, a Alemanha demonstra uma curva de emissões acumuladas consideravelmente mais plana, destacando sua trajetória de redução contínua nas emissões

históricas desde os anos 1990. Esse padrão reflete a implementação de políticas climáticas como a *Energiewende*, que priorizaram a substituição de combustíveis fósseis por renováveis e o aumento da eficiência energética. A redução histórica permitiu limitar significativamente seu impacto acumulado, contrastando com economias que ainda dependem de combustíveis fósseis.

Figura 13 - Intensidade de emissões de GEEs por unidade de PIB relacionadas ao setor de energia (CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares do PIB)



Fonte: *Climate Watch Data* (2025).

A Figura 13 apresenta a intensidade de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por unidade de PIB (CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares) para Índia, China e Alemanha entre 1990 e 2021. Essa métrica permite avaliar a eficiência econômica desses países em relação às emissões de carbono, fornecendo uma análise complementar às análises de emissões históricas e acumuladas.

A China demonstra uma redução significativa na intensidade de emissões ao longo do período, partindo de níveis elevados de cerca de 7,2 kt CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 1990 para valores próximos de 717 t CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 2021. Apesar da evolução, atribuída ao avanço tecnológico e à diversificação parcial da matriz energética, a China permanece em um patamar elevado em termos absolutos de emissões, como evidenciado pelas análises de emissões históricas e acumuladas. Isso reflete sua forte dependência de carvão para sustentar a expansão industrial e urbana, mesmo com esforços significativos para incorporar fontes renováveis.

A Índia apresenta uma trajetória de redução mais moderada na intensidade de emissões, passando de cerca de 3,2 kt CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 1990 para valores próximos de 1,1 kt

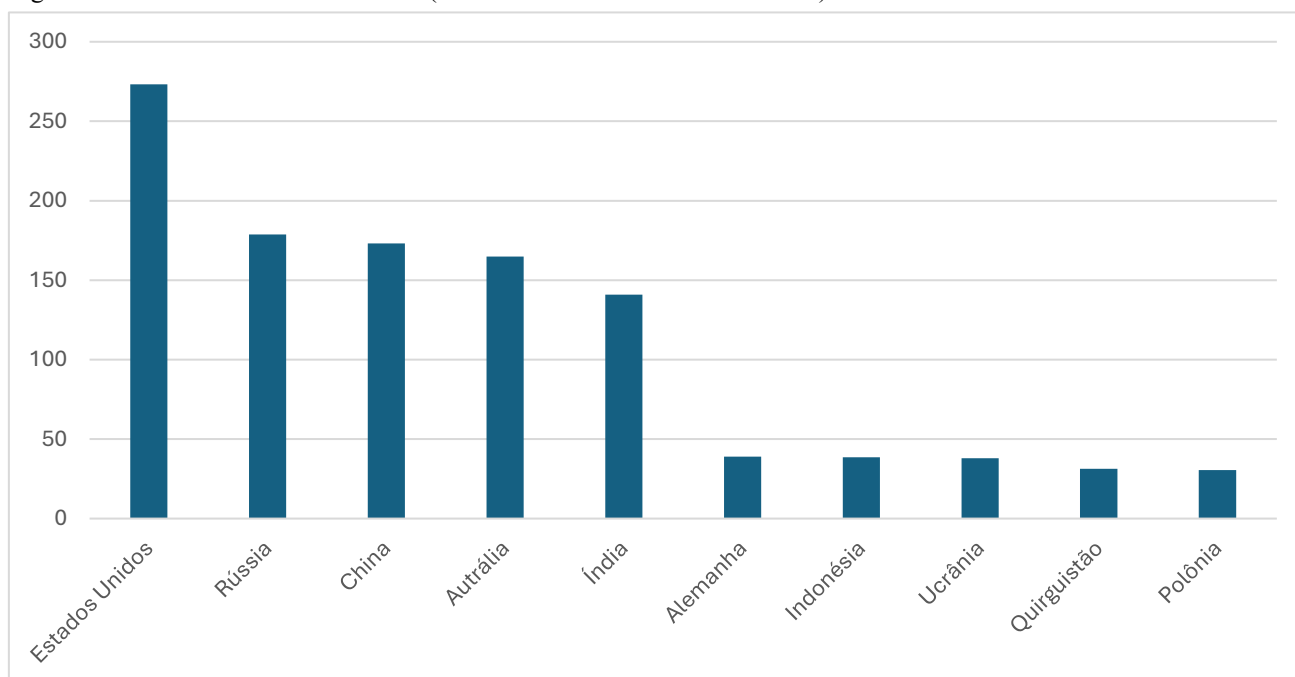
CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 2021. Esse comportamento está associado ao crescimento econômico acelerado e à dependência de carvão na matriz energética. Embora a Índia apresente emissões históricas e acumuladas menores que a China, sua crescente intensidade econômica e energética reforça os desafios para mitigar emissões enquanto atende às demandas de uma população em expansão.

A Alemanha, em contraste, exibe os menores níveis de intensidade de emissões ao longo do período, variando de cerca de 0,6 kt CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 1990 para menos de 0,2 kt CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares em 2021. Essa trajetória reflete a implementação de políticas de transição energética (*Energiewende*), que priorizam a redução de combustíveis fósseis, o aumento da eficiência energética e a ampliação da participação de renováveis. Os menores níveis de intensidade de emissões da Alemanha corroboram sua contribuição relativamente menor às emissões acumuladas, destacando os esforços do país na dissociação entre crescimento econômico e emissões.

A escolha desses três países para análise é justificada pela representatividade de suas trajetórias na transição energética global. A China e a Índia exemplificam economias emergentes altamente dependentes de carvão, com desafios distintos para equilibrar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental, como evidenciado por suas emissões históricas, acumuladas e intensidade de emissões. Já a Alemanha, com suas políticas de descarbonização, destaca-se como um caso de sucesso na redução de emissões e no aumento da eficiência climática, servindo como referência para economias em transição. Essa análise comparativa permite uma compreensão da importância de estratégias adaptadas a contextos econômicos e energéticos específicos.

A dependência do carvão na matriz energética mundial varia consideravelmente entre os países, especialmente de acordo com a dotação de recursos naturais, seu percentual de participação na matriz energética, da estrutura da economia e do mercado de trabalho. Ele tem um custo relativamente alto de transporte, o que faz com que a maior parte do carvão produzido mundialmente seja para utilização doméstica. Assim, uma redução na utilização do carvão impacta diretamente na indústria nacional (IEA, 2024b).

Figura 14 - Reservas de Carvão - 2023 (MMst - milhões de toneladas curtas).



Fonte: US EIA (2025). Elaboração própria.

A Figura 14 destaca os dez países com as maiores reservas de carvão, medidas em milhões de toneladas curtas (MMst), evidenciando a disparidade entre economias emergentes e desenvolvidas no uso desse recurso. A China, terceira colocada com 173,108 MMst, possui uma das maiores reservas globais, sustentando sua matriz energética predominantemente baseada em carvão. Esse recurso é essencial para atender à demanda de sua crescente industrialização e urbanização, mas também é o principal fator responsável pelas elevadas emissões de CO<sub>2</sub> do país, como mostrado em análises anteriores. Apesar de avanços em energia renovável, o carvão ainda desempenha um papel central em sua economia.

A Índia, quinta colocada com 140,795 MMst, também apresenta alta dependência de carvão, que compõe uma parcela significativa de sua matriz energética. Suas reservas garantem a expansão da geração de eletricidade e o suporte ao crescimento econômico e populacional, características de uma economia em desenvolvimento. No entanto, a Índia enfrenta o desafio de equilibrar o uso de suas reservas com as demandas internacionais de descarbonização, buscando expandir o uso de energias renováveis para reduzir suas emissões, que seguem em ritmo crescente.

Já a Alemanha, sexta colocada com 39,022 MMst, apresenta uma trajetória diferente. Apesar de possuir reservas consideráveis de carvão, o país tem priorizado sua redução no uso como parte das políticas da *Energiewende*, que promove a transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada. O fechamento gradual de minas de carvão e o aumento da geração

a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, refletem seu compromisso com a neutralidade climática até 2045. Essa postura diferencia a Alemanha de outros grandes emissores e ressalta seu papel na transição energética global.

A conexão entre as reservas de carvão e a matriz energética de cada país destaca a relação entre a disponibilidade desse recurso e a dependência de sua utilização na geração de energia. Países com grandes reservas, como a China e a Índia, estruturaram suas matrizes energéticas historicamente em torno do carvão, dada sua abundância local e custo relativamente baixo, o que garantiu suporte ao crescimento industrial e econômico. No entanto, essa dependência tem implicações diretas nas emissões de GEEs, como evidenciado por suas elevadas contribuições históricas e acumuladas. Em contraste, países como a Alemanha, embora possuam reservas consideráveis, optaram por implementar planos que têm como objetivo a redução do uso de carvão em sua matriz energética, priorizando a transição para fontes renováveis e a descarbonização como estratégia central para atender às metas climáticas globais. Essa divergência evidencia como a gestão das reservas de carvão é diretamente influenciada pelas políticas energéticas e pelos compromissos climáticos de cada nação.

No relatório IEA (2024b), a dependência do carvão é avaliada por meio do *Coal Transition Exposure Index* (CTEI), que mede o impacto do carvão em diferentes dimensões, como energia, economia, desenvolvimento e infraestrutura. A pontuação geral é composta por quatro categorias: dependência energética, que reflete a participação do carvão na matriz energética e na geração de eletricidade; lacuna de desenvolvimento, que indica o nível de industrialização e produtividade; dependência econômica, relacionada à importância do carvão nas exportações e na produção doméstica; e o "*lock-in*", que avalia a idade e a depreciação da infraestrutura de carvão existente.

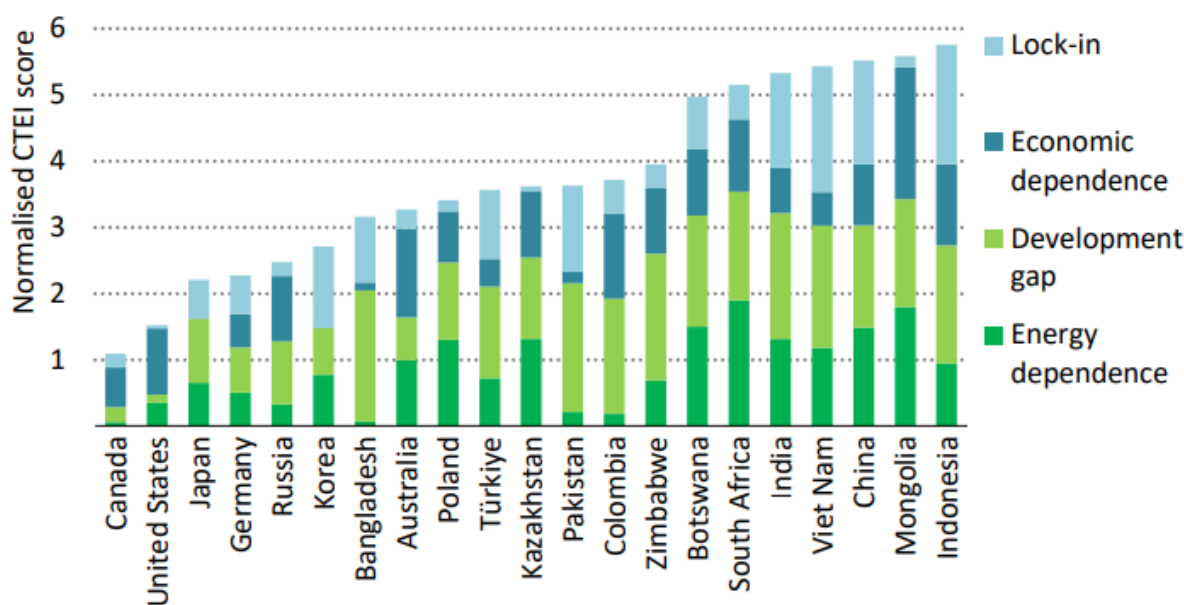
Na Figura 15 é possível observar diferenças entre os países. A Alemanha apresenta uma pontuação média no índice CTEI, com baixa dependência energética e econômica, refletindo seu progresso na transição energética. No entanto, o "*lock-in*" demonstra que a infraestrutura existente ainda desempenha um papel relevante, o que pode dificultar a eliminação total do carvão no curto prazo.

A China, por sua vez, está entre os países com maior pontuação no índice, destacando-se pela forte dependência energética e pelo elevado "*lock-in*". Isso reflete o papel crucial do carvão em sua matriz energética e economia, devido à ampla infraestrutura instalada e ao crescimento da demanda energética. Esses fatores tornam a transição energética um grande desafio, especialmente em um cenário de contínua expansão econômica.

Já a Índia também apresenta uma pontuação elevada, impulsionada principalmente pela lacuna de desenvolvimento e pela dependência energética. A alta participação do carvão na geração de energia é agravada pelas dificuldades econômicas e sociais de suas regiões mineradoras, que apresentam baixa industrialização e alta dependência do setor de carvão para empregos. Assim, o índice reflete os desafios duplos enfrentados pela Índia: atender à crescente demanda energética enquanto promove uma transição acessível para alternativas mais limpas.

Essas diferenças mostram como o impacto da transição energética depende das características econômicas, estruturais e sociais de cada país, destacando a necessidade de estratégias específicas para enfrentar os desafios do abandono do carvão.

Figura 15 - Dependência do carvão



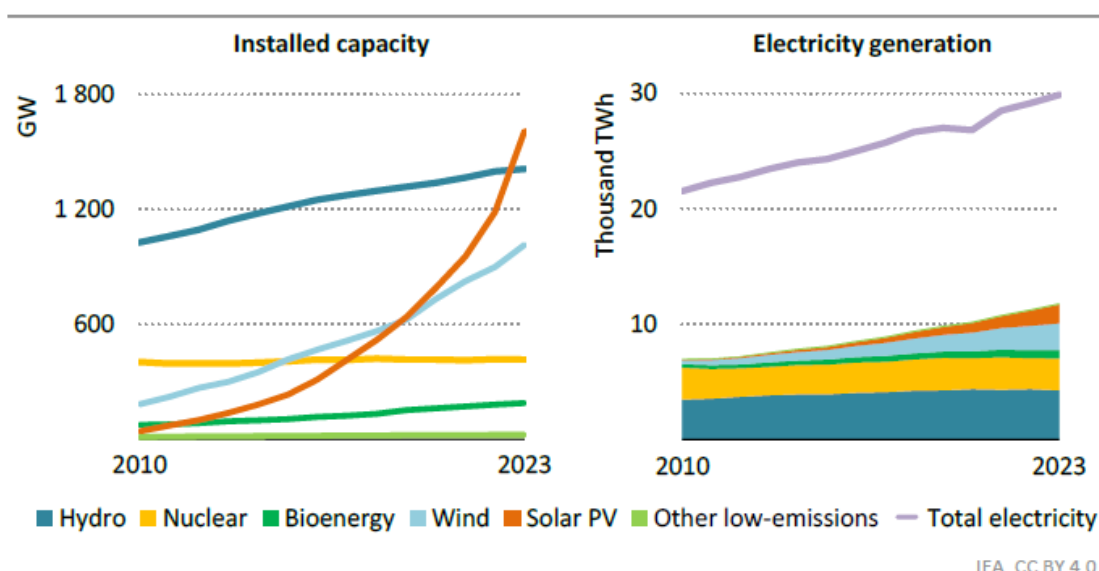
Fonte: IEA (2024b).

Observando a Figura 16, pode-se constatar que entre 2010 e 2023, as energias solar e eólica foram as fontes de energia renováveis que experimentaram o crescimento mais acelerado. A capacidade instalada da energia solar fotovoltaica cresceu 40 vezes e a da energia eólica seis vezes, com o crescimento concentrado na China, União Europeia, Estados Unidos e Japão. Juntas, a energia solar fotovoltaica e a eólica representam três quartos do crescimento da energia limpa no período, enquanto as demais fontes representam o restante (IEA, 2024b).

Apesar dos dados demonstrarem expansão, o crescimento na geração de energia limpa não acompanhou a demanda global por eletricidade. A produção proveniente de fontes com

baixa emissão de GEEs aumentou em 4.800 TWh entre 2010 e 2023. Por outro lado, a demanda por eletricidade aumentou em quase 8.400 TWh, como ilustrado na Figura 10. Assim, para suprir tal lacuna, a geração de energia a carvão aumentou em quase 2.000 TWh, o que representa um aumento de 23%, comparando-se os dados do mesmo período, bem como a geração a gás natural, que experimentou um aumento de cerca de 36%. Consequentemente, as emissões de GEEs do setor elétrico aumentaram 20% durante o período, evidenciando a necessidade de pesquisas que tenham como objetivo analisar políticas eficazes que permitam aos países realizarem a transição energética de baixo carbono (IEA, 2024a).

Figura 16 - Capacidade global instalada de energias renováveis.



Fonte: IEA (2024a).

Apesar de este ser o panorama global, deve-se destacar que houve regiões nas quais a oferta de energia limpa cresceu muito mais rápido que a demanda por eletricidade, o que resultou em queda na necessidade por combustíveis fósseis não mitigados. Países como a Austrália, Coreia, Japão, Argentina, África do Sul, Brasil e México são exemplos onde as fontes de eletricidade de baixa emissão cresceram mais de 20%, o que foi muito maior que qualquer crescimento na demanda por eletricidade (IEA, 2024a).

Em várias economias emergentes e em desenvolvimento, as fontes de baixa emissão de carbono não conseguiram acompanhar o ritmo da demanda por eletricidade, o que resultou em aumento na demanda por carvão e gás natural para a geração de energia (IEA, 2024a).

A China é líder global em capacidade instalada de energias renováveis, especialmente solar fotovoltaica e eólica, mas também registrou aumento de 20% na utilização do carvão e de

40% no gás natural entre 2019 e 2023. Sendo um dos países de maior expressão quanto à demanda por energia, a velocidade com que ela realiza sua transição para uma economia de baixo carbono é de grande relevância para o cenário global (IEA, 2024b).

Entre 2018 e 2023, a Índia registrou aumento significativo na geração de energia limpa, com crescimento de 40%. No entanto, esse progresso partiu de uma base inicial reduzida, enquanto o uso de combustíveis fósseis não mitigados no setor elétrico também apresentou um crescimento expressivo. Considerando sua elevada dependência de carvão, seu plano de curto prazo para acelerar a transição energética e os compromissos de longo prazo com emissões líquidas desempenham um papel fundamental para o futuro energético sustentável (IEA, 2024a).

Entre 2018 e 2023, a Alemanha também apresentou avanços significativos na transição energética, destacando-se como líder global no desenvolvimento de fontes renováveis, especialmente energia eólica e solar. Durante esse período, a participação das energias renováveis na matriz elétrica alemã continuou a crescer, contribuindo para a redução gradual da dependência de combustíveis fósseis, como carvão e gás natural. Contudo, desafios persistem, especialmente no contexto do desligamento de suas usinas nucleares e das metas de descarbonização de setores intensivos em emissões, como transporte e indústria.

O compromisso da Alemanha com a neutralidade climática até 2045 e sua ambiciosa agenda de expansão de renováveis desempenham um papel fundamental na estratégia de longo prazo para alcançar a neutralidade de emissões. O país também tem investido em modernização de infraestrutura, como redes elétricas inteligentes e armazenamento de energia, e na promoção de tecnologias emergentes, como hidrogênio verde, para realizar a transição energética de forma sustentável (IEA, 2024a).

A Figura 17 evidencia os compromissos relacionados ao uso do carvão por diferentes países e também destaca o percentual de participação do carvão na matriz energética de cada um. Esse dado é crucial para compreender a dependência de cada país em relação a esse recurso e como isso influencia suas políticas climáticas e de transição energética, especialmente no caso da Alemanha, China e Índia, que possuem trajetórias contrastantes.

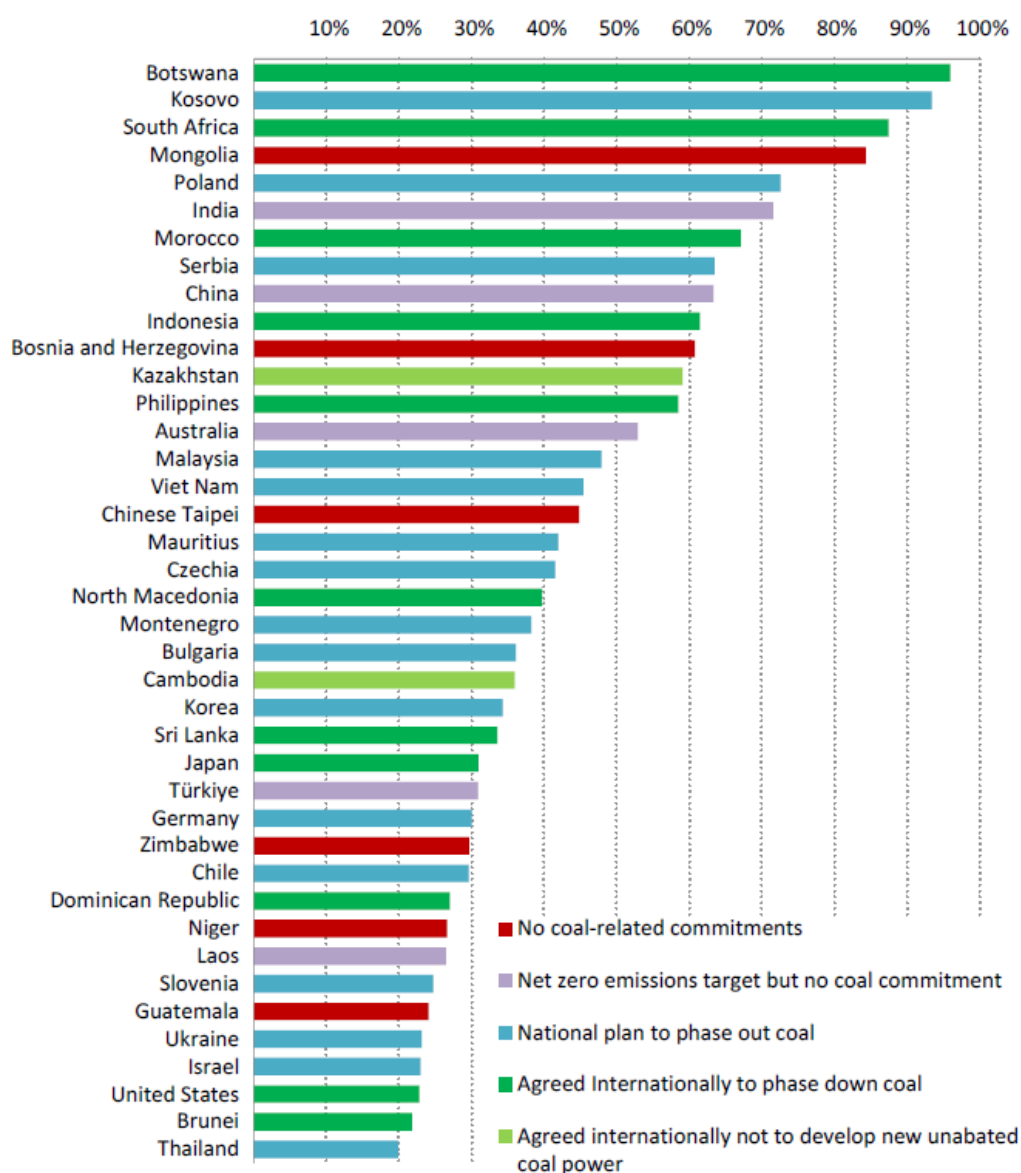
A Alemanha demonstra um percentual moderado de dependência de carvão na matriz energética, o que reflete os avanços de sua política de transição energética (*Energiewende*). Apesar de ainda utilizar carvão, principalmente lignito<sup>2</sup>, sua redução consistente no uso desse

---

<sup>2</sup> Lignito é um tipo de carvão mineral com baixo teor de carbono e alto teor de umidade, classificado como uma das formas mais jovens de carvão fóssil. Ele apresenta menor densidade energética em comparação com o carvão

recurso está alinhada com compromissos internacionais de eliminar gradualmente sua utilização até 2038 e alcançar neutralidade climática até 2045. Essa transição é corroborada pelos dados das análises anteriores, que mostram uma trajetória de redução nas emissões históricas e intensidade de emissões por PIB, destacando a Alemanha como exemplo de como economias avançadas podem auferir esforços para reduzir a participação de combustíveis fósseis em sua matriz energética.

Figura 17- Participação do carvão na geração de energia e políticas de carvão por país, 2023.



IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA (2024b).

betuminoso e é frequentemente utilizado em usinas termoeletricas próximas ao local de extração devido ao custo elevado de transporte e baixa eficiência energética. (ALPERN & DE SOUSA; 2002).

Na China, o carvão ainda domina a matriz energética com um percentual elevado de participação, o que sustenta sua posição como maior emissor global de GEEs. Esse dado se conecta diretamente às análises anteriores, que mostram a China como líder em emissões históricas e acumuladas devido à sua dependência desse recurso para atender às demandas de sua economia em rápido crescimento. Embora a China tenha compromissos internacionais para reduzir o uso de carvão, os dados destacam o desafio de descarbonizar uma matriz altamente dependente desse combustível, mesmo com significativos investimentos em energias renováveis.

A Índia, por sua vez, apresenta uma matriz energética fortemente baseada em carvão, refletindo sua dependência estrutural para atender às necessidades de uma população em expansão e de um crescimento econômico acelerado. Apesar de possuir um plano nacional para eliminar gradualmente o carvão, a alta participação desse recurso na matriz energética limita sua capacidade de reduzir emissões rapidamente, como evidenciado pelas análises de emissões crescentes. Esse contexto ressalta os desafios enfrentados por economias emergentes para equilibrar sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

A combinação desses dados reforça a escolha de Alemanha, China e Índia como foco desta tese. Enquanto a Alemanha ilustra um modelo de transição energética e descarbonização, a China e a Índia representam os desafios de economias emergentes com elevada dependência de carvão. A análise comparativa dessas realidades distintas permite explorar as complexidades e oportunidades para a mitigação das emissões globais e a transformação das matrizes energéticas em diferentes contextos.

Este capítulo tem como objetivo realizar uma análise comparativa das políticas públicas e estratégias de transição energética na Alemanha, China e Índia, destacando os principais objetivos, instrumentos e resultados alcançados por cada país. A partir dessa abordagem, busca-se compreender como esses países, inseridos em contextos econômicos, institucionais e tecnológicos distintos, têm respondido aos desafios da transição energética de baixo carbono. A análise também visa avaliar o grau de alinhamento entre suas políticas e as metas globais de descarbonização, segurança energética, acessibilidade e desenvolvimento socioeconômico sustentável, contribuindo para a formulação de lições aplicáveis a outros contextos.

A estrutura da análise segue as etapas metodológicas descritas no capítulo anterior, com base em um arcabouço teórico-analítico ampliado, que combina os frameworks do TIS e do *Policy Mix*. Inicialmente, foram identificados os principais objetivos de política pública voltados à transição energética em cada país. Em seguida, foram mapeadas as estratégias

centrais de descarbonização e os instrumentos adotados, classificados de acordo com a tipologia de Hood (1983): Nodalidade, Autoridade, Tesouro e Organização.

Além disso, a análise considera o papel das estruturas institucionais e da governança em cada país, reconhecendo que a transição energética ocorre em ambientes sociotécnicos complexos e historicamente condicionados. A comparação entre Alemanha, China e Índia permite, portanto, evidenciar tanto trajetórias de sucesso quanto barreiras persistentes, oferecendo subsídios relevantes para o aprimoramento de políticas públicas voltadas à construção de uma economia de baixo carbono.

### 3.1 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – ALEMANHA

A Alemanha está situada na Europa Ocidental, com os mares Báltico e do Norte ao norte e os Alpes ao sul. É o quarto maior país da União Europeia (UE) em extensão territorial e o mais populoso. Faz fronteira com nove países europeus: Dinamarca, Países Baixos, Bélgica, Luxemburgo, França, Suíça, Áustria, República Tcheca e Polônia. Sua capital e maior cidade é Berlim, enquanto outras importantes regiões metropolitanas incluem Reno-Ruhr, Frankfurt, Hamburgo, Munique e Leipzig.

Figura 18 - Mapa da Alemanha



Fonte: IEA, 2020.

A Alemanha foi um dos países fundadores da Comunidade Econômica Europeia, criada em 1957, e da União Europeia, instituída em 1993. O país integra o Espaço Schengen e a zona do euro desde a sua criação em 1999. Além disso, é um dos membros fundadores da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), formada por 20 países, e participa da IEA desde sua fundação em 1974. Ela é baseada no modelo de mercado social, destacando-se por sua força de trabalho qualificada, elevado estoque de capital, baixos índices de corrupção e alta capacidade de inovação (IEA, 2020).

A Alemanha é uma república federal parlamentarista composta por 16 estados (*Länder*). O sistema político conta com duas instâncias representativas: o parlamento federal (*Bundestag*) e o conselho federal (*Bundesrat*). Os membros do Bundestag são eleitos por voto popular para mandatos de quatro anos (Deutscher Bundestag, 2019). Já os 69 integrantes do *Bundesrat* não

são eleitos diretamente; sua composição é determinada pelos governos dos 16 *Länder* (IEA, 2020).

O chefe de Estado é o presidente, cuja função é essencialmente representativa. O presidente é eleito para um mandato de cinco anos pela convenção federal (*Bundesversammlung*), que é composta pelos membros do Bundestag e delegados dos estados. O governo federal é liderado pelo chanceler, que é indicado pelo *Bundestag*. O chanceler, por sua vez, nomeia os ministros federais, incluindo um vice-chanceler. Embora os estados tenham uma considerável autonomia no sistema federal alemão, as leis federais têm primazia sobre as leis estaduais (IEA, 2020).

O governo federal da Alemanha detém a principal responsabilidade na formulação da legislação relacionada à política energética. Os estados (*Länder*) participam do processo por meio do *Bundesrat* (conselho federal), contribuindo para a definição das políticas no âmbito federal.

Com base no modelo de economia de mercado social, a política energética alemã prioriza a mínima intervenção estatal, que ocorre apenas quando os mecanismos de mercado não estão presentes ou não funcionam de forma eficiente.

O Ministério Federal de Assuntos Econômicos e Energia (BMW<sub>i</sub>) é responsável por coordenar a política energética e climática, incluindo a transição energética no nível federal. Além disso, devido à sua supervisão sobre as indústrias alemãs, o ministério busca garantir que a transição energética não afete negativamente a competitividade industrial. Entre suas atribuições estão a introdução de energias renováveis no mercado, a promoção da eficiência energética e o planejamento de emergências para o abastecimento de petróleo, gás e eletricidade. O BMW<sub>i</sub> também lidera as políticas de pesquisa energética e representa a Alemanha nas discussões sobre energia na União Europeia e em outros fóruns internacionais. Junto ao Ministério Federal do Interior, Construção e Comunidades (BMI), também aborda questões relacionadas à eficiência energética em edifícios (IEA, 2020).

O Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU), criado em 1986 após o desastre de Chernobyl, é encarregado das políticas ambientais e climáticas, com foco em proteger a população de agentes tóxicos e radiação, assegurar o uso eficiente de recursos naturais, fomentar a conservação da biodiversidade e promover ações climáticas. Além de desenvolver legislação em suas áreas de atuação, o BMU participa de esforços de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, tanto nacional quanto internacional.

O Ministério Federal de Transporte e Infraestrutura Digital (BMV<sub>i</sub>) coordena a estratégia de combustíveis do governo e a transição energética no setor de transporte,

abrangendo diferentes modais, como rodoviário, ferroviário, aéreo e hidroviário. No setor de bioenergia, o Ministério Federal de Alimentação e Agricultura (BMEL) promove a produção sustentável de biomassa para combustíveis domésticos e importados.

O Ministério Federal de Educação e Pesquisa (BMBF) financia projetos e pesquisas em áreas como energia, clima, saúde, mobilidade, segurança e comunicação, colaborando com o BMWi e o BMEL no apoio ao desenvolvimento tecnológico e à inovação.

O Ministério Federal das Finanças (BMF) gerencia a política fiscal e tributária, incluindo os tributos sobre energia, e coordena os gastos públicos associados à transição energética.

A Agência Federal de Redes (*Bundesnetzagentur*), uma autoridade independente, regula mercados de energia, telecomunicações, transporte ferroviário e correios. Sua atuação abrange a supervisão do comércio atacadista de energia, a regulação de redes elétricas e a garantia de concorrência justa no setor energético.

O Escritório Federal de Concorrência (*Bundeskartellamt*) protege a concorrência econômica, monitorando fusões, práticas abusivas e a aplicação de leis antitruste. No contexto energético, atua em colaboração com o BMWi para regular práticas anticoncorrenciais.

O Escritório Federal de Assuntos Econômicos e Controle de Exportação (BAFA) é responsável por fomentar o uso de energias renováveis e medidas de eficiência energética, além de monitorar exportações e apoiar o desenvolvimento de pequenas e médias empresas.

A Comissão de Monopólios (*Monopolkommission*) assessora o governo em questões de competitividade no mercado energético, publicando relatórios bienais sobre os mercados de eletricidade e gás.

A Agência Federal de Meio Ambiente (*Umweltbundesamt*) conduz pesquisas e presta consultoria sobre questões ambientais, como redução de resíduos e mudanças climáticas, além de garantir a aplicação de leis ambientais no comércio de carbono.

O Instituto Federal de Geociências e Recursos Naturais (BGR) realiza estudos científicos sobre recursos energéticos, contribuindo para a segurança no abastecimento de energia e fornecendo relatórios anuais com análises detalhadas sobre o setor.

No final do século XIX e início do XX, a Alemanha dependia fortemente do carvão como principal fonte de energia, especialmente para a industrialização e produção elétrica. Essa base energética contribuiu para consolidar sua posição como uma potência industrial europeia. O carvão continuou dominante até a Segunda Guerra Mundial, sendo uma fonte essencial para a reconstrução econômica no pós-guerra (TAVARES, 2019).

Após a Segunda Guerra Mundial, a infraestrutura energética foi reconstruída e ampliada. O carvão continuou sendo essencial, mas o país diversificou sua matriz ao incorporar petróleo e gás natural. Isso atendeu à crescente demanda energética, enquanto o foco em redes de transmissão mais modernas garantiu a distribuição eficiente. Essa diversificação marcou o início de uma redução lenta, mas progressiva, da dependência exclusiva do carvão (CHEN et al., 2019).

Na década de 1970, as crises do petróleo expuseram a vulnerabilidade energética da Alemanha, impulsionando um movimento para reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados. Isso levou ao desenvolvimento da energia nuclear como uma solução estratégica para garantir segurança energética. Entretanto, o crescimento do setor nuclear enfrentou oposição pública crescente, culminando no abandono gradual dessa fonte após o desastre de Fukushima em 2011 (CHEN et al., 2019; TAVARES, 2019).

O termo *Energiewende* surgiu na Alemanha em 1980, quando foi utilizado pela primeira vez em um relatório intitulado *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran* (Transição Energética – Crescimento e Prosperidade sem Petróleo e Urânio). Esse relatório foi produzido pelo Instituto de Ecologia Aplicada (*Öko-Institut*), um dos principais centros de pesquisa ambientais do país. No entanto, o conceito seria institucionalizado e incorporado às políticas públicas alemãs mais tarde, particularmente a partir dos anos 1990 à 2000, com a aplicação de legislações e metas específicas voltadas para a redução de emissões de carbono e a promoção de fontes renováveis de energia (IEA, 2020).

A partir de 2011, deu-se início oficialmente a política de transição energética alemã, conhecida como *Energiewende*, tornando-se um marco global. Baseada em objetivos de sustentabilidade, incorporando as dimensões de descarbonização, ampliação de fontes renováveis, e a eliminação de fontes tradicionais. Embora tenha começado nesse ano, importa lembrar que a transição energética alemã tem raízes anteriores, remontando às décadas de 1970 e 1980.

A Lei de Fontes Renováveis (*Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG*), implementada nos anos 2000, foi central para criar um mercado robusto para energias renováveis, utilizando instrumentos como tarifas *feed-in* para garantir preços competitivos e atrair investimentos. Essa lei também promoveu a descentralização, incentivando cooperativas locais e iniciativas comunitárias na produção de energia (TAVARES, 2019; LOCKWOOD et al., 2017).

As políticas listadas no Anexo I, que elencam as diversas políticas e instrumentos utilizados para a transição energética de baixo carbono no setor elétrico na Alemanha, foram extraídos principalmente das seguintes fontes:

1. Agência Internacional de Energia (IEA): Diversas políticas, especialmente relacionadas a subsídios e incentivos, são descritas no site oficial da IEA, como no caso de subsídios para instalação de sistemas de armazenamento e painéis solares;
2. *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle* ou Escritório Federal de Economia e Controle de Exportações (BAFA): Fonte de informações sobre políticas relacionadas a incentivos de mercado e programas para promoção de tecnologias limpas e eficiência energética;
3. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* ou Ministério da Economia e Energia da Alemanha (BMWi): Relatórios e publicações sobre pesquisa energética e políticas estruturantes para energias renováveis, disponíveis nos portais do BMWi;
4. *European Environment Agency* ou Agência Europeia do Ambiente (EEA): Dados e análises sobre o progresso das políticas energéticas nacionais, incluindo os Planos de Ação Nacional para Energias Renováveis (NREAPs), utilizados para medir o alcance das metas climáticas;
5. Estudos técnicos e estratégias apresentados em congressos ou plataformas acadêmicas, como *Scopus*, *Web of Science*, dentre outros.

### 3.1.1 Objetivos de Política Pública

Chen et al. (2019) descrevem que a política energética alemã é guiada pelos seguintes objetivos principais:

- Neutralidade climática até 2045, antecipando as metas climáticas europeias.
- Redução de emissões de gases de efeito estufa em 65% até 2030, em relação aos níveis de 1990.
- Aumento da participação de energias renováveis na matriz elétrica para 80% até 2030.
- Fim do uso de energia nuclear e carvão, com descomissionamento das usinas nucleares concluído em 2022 e eliminação do carvão programada para 2038.
- Reduzir o consumo primário de energia em 50% até 2050.

A partir desses objetivos, foram elaboradas e implementadas diversas políticas públicas voltadas para a transição energética e a descarbonização da economia, incluindo-se ações

específicas voltadas à eliminação do carvão. Essas políticas incluem planos para o encerramento progressivo das usinas a carvão até 2038, incentivos para a substituição dessa fonte energética por alternativas renováveis, investimentos em infraestrutura para geração e transmissão de energias limpas e medidas de apoio às regiões e trabalhadores afetados pela transição. Esse esforço reflete o compromisso em reduzir a dependência de combustíveis fósseis e alinhar estratégias nacionais aos compromissos climáticos internacionais.

### **3.1.2 Estratégias de políticas públicas voltadas à descarbonização**

#### **3.1.2.1 Tarifas *Feed-in***

Uma das políticas mais emblemáticas da Alemanha é o sistema de tarifas *feed-in*, introduzido na década de 1990. Esse mecanismo oferece preços garantidos para produtores de energia renovável, incentivando investimentos em energia solar, eólica e biomassa. As tarifas *feed-in* desempenharam um papel crucial na redução dos custos das tecnologias renováveis, permitindo que a Alemanha se tornasse líder mundial no setor (EDMONDSON; KERN & ROGGE, 2019).

Com isso, esperava-se um aumento significativo da capacidade instalada de energia renovável; estímulo à participação de pequenos produtores, incluindo cooperativas locais e famílias e o desenvolvimento de um mercado doméstico para tecnologias renováveis (LOCKWOOD, 2016).

#### **3.1.2.2 Eliminação Gradual do Carvão e da Energia Nuclear**

A decisão de eliminar o uso de carvão e energia nuclear foi central para a *Energiewende*. Após o acidente de Fukushima em 2011, a Alemanha acelerou o fechamento de suas usinas nucleares, enquanto programas de transição para comunidades dependentes do carvão foram implementados para mitigar os impactos socioeconômicos.

O *Coal Phase-Out Act*, aprovado em agosto de 2020, estabelece a meta principal de eliminar gradualmente o uso de energia gerada a partir de carvão na Alemanha até, no máximo, 2038. Esse objetivo faz parte da estratégia do país para reduzir emissões de gases de efeito estufa e garantir uma matriz energética mais segura, eficiente, acessível e compatível com os compromissos climáticos. Entre as metas intermediárias, destacam-se as reduções adicionais

para 8 GW de carvão duro e 9 GW de lignito até 2030, com a eliminação completa até 2038. Há ainda a possibilidade de antecipação para 2035, dependendo das revisões periódicas programadas para 2026, 2029 e 2032 (GERMANY, 2020a).

Além disso, o ato prevê um aumento na participação de fontes renováveis na matriz energética, com a meta de alcançar 65% de energias renováveis até 2030. Para mitigar os impactos socioeconômicos dessa transição, foram destinados até 14 bilhões de euros para investimentos estruturais em regiões dependentes do carvão, além de 26 bilhões de euros para medidas adicionais, como melhorias em infraestrutura e criação de empregos. O ato também proíbe a operação de novas usinas a carvão a partir de agosto de 2020, exceto aquelas licenciadas antes de janeiro de 2020. Essas medidas reforçam o compromisso alemão com uma transição energética sustentável e o cumprimento de suas metas climáticas (GERMANY, 2020a).

### 3.1.2.3 Estratégias de Eficiência Energética

A "*Energy Efficiency Strategy 2050*" da Alemanha estabelece metas para o setor energético, priorizando a redução do consumo de energia primária e a transição para fontes renováveis mais eficientes. A principal meta para o setor é reduzir o consumo de energia primária em 30% até 2030 e em 50% até 2050, em comparação aos níveis de 2008. Essa redução será alcançada principalmente pela substituição de usinas a carvão e nucleares por fontes renováveis, como energia solar e eólica, que são significativamente mais eficientes. Apenas a transição para essas fontes renováveis deve resultar na diminuição de 700 terawatts-hora (TWh) no consumo de energia primária até 2030 (GERMANY, 2020b).

Além disso, o plano prevê a ampliação da participação das energias renováveis na matriz energética para 65% até 2030, reforçando a integração dessas fontes em setores como aquecimento, transporte e indústria por meio do acoplamento setorial. A digitalização desempenha um papel crucial, com o uso de tecnologias para otimizar a eficiência das redes elétricas e monitorar o consumo em tempo real. Essas medidas são complementadas por um sistema de precificação de carbono que incentiva economicamente a descarbonização e a modernização do setor. Todas essas ações são coordenadas pelo Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética, que integra as iniciativas para atingir os objetivos climáticos e energéticos do país (GERMANY, 2020b).

### 3.1.3 Análise em termos de tipologia de instrumento

A classificação de instrumentos de políticas públicas proposta por Hood (1983; 2007), como apresentado no capítulo teórico, organiza as ferramentas governamentais em quatro dimensões principais, conhecidas como "NATO" – Nodalidade, Autoridade, Tesouro e Organização. Cada dimensão reflete uma forma distinta de intervenção estatal. A Nodalidade está relacionada ao uso da posição do governo como centro de informação, englobando campanhas públicas e disseminação de conhecimento para influenciar comportamentos. A Autoridade refere-se ao uso do poder legítimo para estabelecer normas, regulamentos e padrões obrigatórios. O Tesouro envolve a mobilização de recursos financeiros, como subsídios, incentivos fiscais ou tributação, para fomentar ou desincentivar ações específicas. Já a Organização diz respeito à capacidade governamental de coordenar ações e implementar políticas por meio de suas estruturas administrativas. Essa tipologia permite compreender como os governos combinam diferentes instrumentos para alcançar seus objetivos de forma eficiente, especialmente em contextos complexos como a transição energética de baixo carbono. A análise das políticas alemãs está detalhada no Anexo I.

No que tange à Autoridade, observa-se que a Alemanha faz uso consistente de instrumentos regulatórios voltados à descarbonização, com destaque para a Lei de Energias Renováveis (*Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG*), que estabelece metas formais para a participação de fontes renováveis na matriz energética e define tarifas de alimentação para produtores de energia limpa. A abordagem alemã é caracterizada por processos participativos e negociações com setores econômicos e sociais, o que contrasta com modelos mais centralizados como o chinês. Embora esse modelo regulatório possa levar a processos mais lentos de implementação, ele favorece a construção de consensos, a legitimação social e maior flexibilidade ao longo do tempo.

Em relação ao Tesouro, a Alemanha demonstra um uso estratégico e criterioso de incentivos financeiros, direcionando recursos para tecnologias com elevado potencial de impacto. Programas como o "*KfW Renewable Energy Programme*", que oferece financiamento a taxas reduzidas para projetos de energia renovável, e o "*Environmental Bonus*" (*Umweltbonus*), que concede subsídios para a aquisição de veículos elétricos, exemplificam essa abordagem seletiva. Em vez de um financiamento indiscriminado, como observado em outros países, os recursos são alocados com base em critérios de eficiência e retorno econômico, o que revela uma orientação pragmática e tecnicamente fundamentada na formulação das políticas.

No que se refere à Nodalidade, esse instrumento é utilizado de forma mais moderada, ainda que relevante em determinadas frentes. A Alemanha promove campanhas de conscientização e educação energética, como a iniciativa "*Deutschland macht's effizient*" ("A Alemanha faz isso de forma eficiente"), voltada a promover a eficiência energética entre consumidores residenciais e setores produtivos. No entanto, essas ações não ocupam papel central na estratégia nacional, sendo complementares aos esforços regulatórios e financeiros que estruturam a maior parte da intervenção estatal no setor energético.

No campo da Organização, observa-se uma estrutura institucional articulada e descentralizada, com coordenação entre os níveis federal, estadual e municipal. A implementação das políticas ocorre por meio de instituições especializadas e arranjos intergovernamentais, como a "Plataforma da *Energiewende*", que reúne representantes do governo, da indústria, da academia e da sociedade civil para coordenar ações e debater os rumos da transição energética. Essa estrutura possibilita a adaptação das políticas às especificidades regionais, ao mesmo tempo em que assegura a coerência com os compromissos nacionais e internacionais assumidos pela Alemanha.

A abordagem adotada pela Alemanha na transição energética, embora institucionalmente robusta e caracterizada por mecanismos participativos, estabilidade regulatória e incentivo à inovação, tem sido objeto de críticas quanto à sua capacidade de adaptação frente à crescente urgência climática. Conforme apontam relatórios recentes da International Energy Agency (IEA, 2023) e da International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023), o modelo alemão tem avançado de forma relativamente gradual, sobretudo em virtude das complexidades inerentes ao seu modelo federativo, à elevada dependência da concertação política e aos desafios de coordenação multiescalar. Ainda que políticas como os leilões de renováveis, a precificação de carbono e os investimentos em redes inteligentes sejam internacionalmente reconhecidos como boas práticas, observa-se uma defasagem entre a ambição climática declarada e a efetividade na redução estrutural das emissões, especialmente no setor de aquecimento e transporte. Ademais, a tentativa de conciliar segurança energética, competitividade industrial e justiça social dentro dos marcos da transição tende a produzir soluções incrementalistas, que podem mitigar o ímpeto transformador necessário para alcançar a neutralidade climática até 2045, como previsto na Lei de Proteção Climática alemã.

### 3.1.4 Análise de *Policy Mix*

A transição energética alemã, conhecida como *Energiewende*, visa transformar a matriz energética do país, promovendo a descarbonização e a sustentabilidade econômica e social. Para alcançar seus objetivos climáticos, a Alemanha estruturou suas políticas em torno de três estratégias principais: (i) a expansão das energias renováveis, (ii) a eliminação gradual do carvão e da energia nuclear, e (iii) a promoção da eficiência energética e de tecnologias de baixo carbono. Essas estratégias são fundamentadas em instrumentos de políticas públicas, como tarifas *feed-in*, leilões, regulamentos e incentivos financeiros. Baseada em documentos como o *Renewable Energy Sources Act* (EEG) e o *Climate Action Plan 2050*, a análise dessas estratégias será conduzida à luz do arcabouço teórico-analítico adotado, que integra a tipologia de instrumentos de Hood (1983; 2007) e as funções do Sistema de Inovação Tecnológica (TIS), permitindo avaliar como as políticas alemãs dialogam com os pilares de segurança de abastecimento, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade.

A primeira estratégia, expansão das energias renováveis, tem como objetivo substituir combustíveis fósseis e energia nuclear por fontes renováveis, promovendo a descentralização do sistema energético. Os principais instrumentos utilizados incluem tarifas *feed-in* e leilões para incentivar a geração renovável, além de regulações que garantem acesso prioritário das renováveis à rede elétrica (BMW, 2017; Reichardt & Rogge, 2016). Essa abordagem aumenta a resiliência energética ao diversificar a matriz e reduzir a dependência de importações de combustíveis fósseis (PELEGRY; MARTÍNEZ & SÁNCHEZ, 2016).

No entanto, a intermitência de fontes como solar e eólica exige investimentos em armazenamento e modernização da infraestrutura elétrica (Rogge & Reichardt, 2016; BMW, 2017). Do ponto de vista socioeconômico, essa estratégia estimula a criação de empregos no setor de renováveis, impulsiona a economia local por meio de modelos cooperativos e beneficia comunidades rurais (Reichardt & Rogge, 2016; BMW, 2020). Em termos de acessibilidade, as renováveis tornaram-se mais competitivas ao longo do tempo, mas o modelo inicial de tarifas *feed-in* transferiu custos para os consumidores, o que levou a ajustes posteriores para minimizar impactos financeiros (PELEGRY; MARTÍNEZ & SÁNCHEZ, 2016).

A segunda estratégia, eliminação gradual do carvão e da energia nuclear, visa descarbonizar setores energéticos eliminando fontes de alto impacto ambiental. Para isso, foram implementados instrumentos como leis que estabelecem cronogramas de descomissionamento e programas de apoio financeiro para regiões e trabalhadores afetados (BMW, 2020). Essa estratégia apresentou riscos iniciais à segurança de abastecimento, mitigados por investimentos

em energias renováveis e gás natural como solução de transição (BMW, 2020). Além disso, o redesenho da rede elétrica foi essencial para suportar novas fontes energéticas (Rogge e Reichardt, 2016; BMW, 2020). No âmbito socioeconômico, foram criados programas específicos para diversificar a economia de regiões dependentes do carvão, promovendo novas indústrias e infraestrutura local (BMW, 2020). A redução de empregos no setor de carvão e nuclear foi parcialmente compensada pela expansão das renováveis (Reichardt e Rogge, 2016; BMW, 2020). Quanto à acessibilidade, a transição reduziu a dependência de fontes fósseis de preços voláteis, mas gerou pressão inicial sobre os consumidores devido aos custos associados, mitigados por subsídios governamentais (BMW, 2020).

A terceira estratégia, promoção da eficiência energética e tecnologias de baixo carbono, busca reduzir a demanda total de energia e incentivar inovações tecnológicas em setores difíceis de descarbonizar. Os principais instrumentos incluem incentivos financeiros para a renovação de edifícios e eficiência industrial, bem como investimentos em tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde (BMW, 2017; Reichardt & Rogge, 2016). Essa estratégia contribui para a segurança de abastecimento ao aliviar a pressão sobre a infraestrutura de geração e transmissão e aumentar a flexibilidade do sistema energético com novas tecnologias (BMW, 2020; Rogge & Reichardt, 2016). No âmbito socioeconômico, impulsiona setores de inovação e pesquisa, consolidando a Alemanha como líder global em tecnologias de baixo carbono (Reichardt & Rogge, 2016). Além disso, gera benefícios econômicos de longo prazo ao reduzir custos energéticos e aumentar a competitividade industrial (Rogge & Reichardt, 2016; BMW, 2017). Em relação à acessibilidade, incentivos tornam essas tecnologias mais acessíveis, embora o alto custo inicial de tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde, exija financiamento contínuo (BMW, 2020).

O arcabouço analítico adaptado de Li & Taihagh (2020) evidencia que essas estratégias estão alinhadas ao objetivo geral da transição energética alemã, mas apresentam desafios específicos em cada dimensão. A segurança de abastecimento é reforçada pela diversificação da matriz energética e pela eficiência energética, embora dependa de melhorias na infraestrutura e no armazenamento de energia. O desenvolvimento socioeconômico é impulsionado pela criação de empregos e pela liderança tecnológica, mas requer atenção contínua à justiça social nas regiões afetadas pela transição. A acessibilidade energética, ampliada por subsídios e incentivos, enfrenta barreiras relacionadas aos custos iniciais das novas tecnologias. Essa abordagem integrada destaca a importância de ajustar continuamente instrumentos e políticas para maximizar os benefícios e mitigar os desafios, garantindo a eficácia e a sustentabilidade das estratégias implementadas.

### 3.1.5 Análise das funções do TIS

A análise das funções do Sistema de Inovação Tecnológica (TIS) aplicadas ao caso alemão revela uma estrutura institucional consolidada e estrategicamente orientada para promover a transição energética de baixo carbono. A Função F1 – Desenvolvimento e difusão do conhecimento é fortemente desempenhada, alicerçada na longa tradição alemã em pesquisa aplicada e na presença de instituições como o *Fraunhofer Institute*, a *Sociedade Max Planck* e universidades técnicas que operam em sinergia com o setor produtivo. Essa função é reforçada por programas públicos como o *Energieforschungsprogramm*, que articula recursos federais para P&D em tecnologias limpas, embora ainda existam lacunas no incentivo a pesquisas interdisciplinares em tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde em larga escala (IEA, 2023).

A Função F2 – Experimentação empreendedora apresenta desempenho mais restrito, reflexo de uma cultura institucional de aversão a riscos e da preferência por tecnologias já maduras. Apesar da existência de *testbeds* e *Living Labs* em setores específicos (como mobilidade elétrica), a escala e a flexibilidade dos ambientes de experimentação são limitadas, especialmente quando comparadas a modelos mais disruptivos como os dos países nórdicos ou da Califórnia. Isso reduz o espaço para inovações radicais e tende a privilegiar soluções incrementalistas (IRENA, 2023).

Quanto à F3 – Influência na direção da busca, a Alemanha constitui um dos casos mais consistentes globalmente. O arcabouço político, traduzido em documentos como o *Klimaschutzplan 2050* e as metas de neutralidade climática até 2045, estabelece trajetórias claras e metas setoriais, proporcionando orientação estratégica tanto para o setor público quanto privado. A existência de metas intermediárias, associadas a instrumentos de monitoramento e revisão periódica, consolida essa função como eixo estruturante do sistema de inovação.

A F4 – Formação de mercado é operacionalizada por meio de uma série de instrumentos robustos. O *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)*, que introduziu tarifas feed-in e posteriormente leilões de energia renovável, foi central para o crescimento do setor eólico e solar. Além disso, subsídios para veículos elétricos, isenções fiscais para tecnologias limpas e metas obrigatórias de eficiência energética compõem um ecossistema regulatório que reduz barreiras de entrada e sinaliza oportunidades de investimento. No entanto, há críticas quanto à estabilidade de alguns desses incentivos, especialmente após as reformas do EEG pós-2014, que reduziram a previsibilidade para investidores.

A F5 – Legitimação das tecnologias de baixo carbono constitui uma das funções mais consolidadas na Alemanha. A aceitação social da transição energética, conhecida como *Energiewende*, foi construída ao longo de décadas por meio de processos participativos, debates públicos, transparência nas decisões e articulação com organizações da sociedade civil e governos locais. Tal legitimidade é reforçada por campanhas públicas, como as promovidas pelo *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*, que promovem a cultura da sustentabilidade como valor compartilhado.

No que tange à F6 – Mobilização de recursos, a Alemanha demonstra capacidade significativa, com a presença de bancos públicos como o *KfW* fornecendo financiamento de longo prazo a projetos de inovação e transição energética. A política industrial verde também contempla incentivos fiscais e apoio à formação de mão de obra especializada. Ainda assim, observa-se uma concentração dos recursos em setores já consolidados, com menor apoio a tecnologias periféricas ou menos maduras.

Por fim, a função F7 – Desenvolvimento de externalidades positivas ainda se encontra em estágio menos desenvolvido. Embora existam *clusters* regionais de inovação e sinergias entre universidades e empresas, como nos casos da *Região do Ruhr* e da *Baviera*, os efeitos sistêmicos mais amplos – como a criação de mercados secundários, plataformas compartilhadas e redes logísticas integradas – ainda são incipientes. A priorização de soluções locais, embora eficiente, limita o alcance das externalidades positivas em nível nacional.

### 3.2 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – CHINA

A transição energética da China é marcada por sua dependência estrutural do carvão, que ainda ocupa uma posição central na matriz energética do país. A dependência é resultado de décadas de industrialização acelerada e de políticas energéticas que priorizaram a segurança no abastecimento, utilizando o carvão como fonte abundante e acessível. Atualmente, o país é o maior consumidor e produtor de carvão do mundo, com o recurso atendendo cerca de 60% de suas necessidades energéticas primárias (IEA, 2024a).

A importância do carvão na China é histórica, tendo sido a principal base para a revolução industrial que impulsionou o crescimento econômico desde meados do século XX. A ampla disponibilidade de carvão doméstico, aliada à necessidade de eletrificação rápida e barata, consolidou o combustível como o pilar do sistema energético chinês. Regiões como

*Shanxi, Inner Mongolia e Xinjiang* se tornaram polos de mineração e geração de energia térmica, contribuindo significativamente para o desenvolvimento industrial (IEA, 2022b).

Entretanto, essa forte dependência apresenta desafios críticos no contexto da transição para um sistema de baixo carbono. A infraestrutura energética existente, amplamente baseada em usinas a carvão, dificulta mudanças rápidas. A resistência socioeconômica também é significativa, uma vez que milhões de empregos dependem diretamente da cadeia produtiva do carvão, incluindo mineração, transporte e geração térmica. Além disso, a predominância do carvão na matriz energética é sustentada por *lock-ins* institucionais e tecnológicos, que incluem subsídios estatais e investimentos em infraestrutura térmica relativamente recentes.

Apesar dos esforços para reduzir as emissões e diversificar a matriz energética, a segurança energética ainda é uma prioridade para o governo chinês, o que torna o carvão uma fonte estratégica. Durante períodos de alta demanda ou crises energéticas, o país tem recorrido a aumentos na produção e consumo de carvão como medida emergencial. Essa dinâmica evidencia o desafio de equilibrar metas climáticas com a necessidade de estabilidade no fornecimento de energia (IEA, 2021a).

A transição energética na China é uma jornada complexa e multifacetada, profundamente enraizada em desafios econômicos, sociais e ambientais. Durante o início das reformas e início da abertura econômica (1978-1990) a prioridade era a modernização econômica. A China começou a investir em infraestrutura energética para suportar sua rápida industrialização. O carvão desempenhou um papel central, fornecendo uma fonte de energia acessível e amplamente disponível, mas ao custo de altas emissões de carbono.

A transição energética da China é marcada por características institucionais específicas que desempenham um papel crucial em sua implementação. Em primeiro lugar, o modelo de governança é baseado em um Estado desenvolvimentista, onde o governo central exerce controle significativo sobre o planejamento e a implementação de políticas energéticas. Esse modelo é caracterizado por decisões de cima para baixo, com uma presença de empresas estatais, que dominam tanto o mercado quanto o desenvolvimento tecnológico.

O planejamento centralizado é uma das principais ferramentas do governo para impulsionar a transição. Por meio dos Planos Quinquenais, metas de expansão de capacidade instalada para fontes renováveis, como energia solar e eólica, são estabelecidas, incentivando investimentos em larga escala. No entanto, a implementação dessas metas é influenciada pela fragmentação institucional, onde diferentes ministérios desempenham funções complementares: a Administração Nacional de Energia (NEA) regula a geração de energia, o Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT) supervisiona a fabricação de

tecnologias renováveis, e o Ministério das Finanças (MOF) gerencia os subsídios por meio do Fundo de Desenvolvimento de Energia Renovável.

O financiamento estatal é outra característica marcante. Bancos estatais desempenham um papel crucial ao fornecer recursos para a construção de infraestrutura renovável, destacando a importância do sistema financeiro estatal na transição energética. Contudo, a China enfrenta desafios internos e externos significativos. Internamente, há disputas de poder entre ministérios e governos locais, enquanto externamente, a desaceleração econômica e a queda na demanda energética colocam pressão sobre a continuidade dos investimentos no setor renovável, ao mesmo tempo em que a manutenção de indústrias de combustíveis fósseis permanece uma prioridade (HUANG & ZHANG, 2024).

Essas características demonstram como o sistema institucional da China equilibra o controle centralizado com a autonomia local, enfrentando desafios políticos e econômicos para alcançar uma transição energética eficaz.

O contexto da transição energética na China, conforme analisado em IEA (2021a), reflete um esforço contínuo e sistemático para mitigar as emissões de carbono e poluentes atmosféricos, enquanto promove tecnologias de energia renovável. A transição chinesa tem sido caracterizada por um aumento na densidade e diversidade dos instrumentos de política, passando de abordagens predominantemente regulatórias para estratégias que incluem incentivos econômicos e experimentação.

Durante a década de 1990, surgiram preocupações crescentes com a poluição do ar e a dependência de combustíveis fósseis. Nesse período, a China começou a implementar políticas de incentivo a fontes renováveis. No entanto, o carvão continuou dominante, dado seu papel estratégico no desenvolvimento industrial do país (IEA, 2021a).

Com a aprovação da Lei de Energia Renovável em 2005, a China deu um passo importante para diversificar sua matriz energética. Essa lei estabeleceu mecanismos como tarifas *feed-in*, que incentivaram o desenvolvimento de energia solar e eólica. Como resultado, o país viu um crescimento expressivo na capacidade instalada dessas tecnologias (IEA, 2021a).

Em 1995, a utilização de energias renováveis no referido país ainda era incipiente e a indústria operava em pequena escala. A partir do ano 2000, a emergência de empresas não-estatais iniciou um processo de evolução deste segmento da indústria. Até o ano de 2008, o governo, através dos programas de eletrificação rural em regiões remotas da China, constituía a principal e praticamente única fonte de demanda. Contudo, a partir desse ano se iniciou um processo de inflexão neste segmento, especialmente através de políticas de subsídios e cotas,

fazendo com que ela pudesse ocupar atualmente a liderança em produção e capacidade instalada no mundo (HOPKINS & LI, 2015).

De acordo com a análise observada em CSTEP (2015), fica muito claro que o governo chinês sempre apoiou o desenvolvimento de uma indústria capaz de liderar o comércio internacional. Em 1999 o Ministério da Ciência e Tecnologia já havia apresentado um programa em que estimulava a inovação por meio de pequenas firmas de energia solar capazes de fabricar produtos com elevado conteúdo tecnológico. Foi concedido um aporte de quase US\$ 3 bilhões para auxiliá-las, além de as províncias concederem diversos tipos de isenção e benefícios para atrai-las em seu território. Além disso, as políticas implementadas no país, tinham como pauta de destino: reembolso de taxas de eletricidade, um fundo de inovação para firmas pequenas e altamente inovativas, empréstimos garantidos em órgãos ligados ao governo ou pelo próprio governo e empréstimos e facilidades de crédito garantidos por bancos públicos. Assim, fica evidente que o governo percebe a grande importância da estrutura científica, pois é ela que dá suporte para a melhora da capacitação de mão-de-obra, possibilitando o desenvolvimento de inovações autóctones e sua disseminação de forma otimizada.

O compromisso da China com o Acordo de Paris, em 2015, representou um marco. O país assumiu metas ambiciosas, como atingir o pico de emissões de carbono até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2060. A partir desse momento, o governo intensificou investimentos em infraestrutura renovável e tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

Em 2015, a China investiu US\$ 102,9 bilhões em energias renováveis, o que representa 36% do total mundial, estando na liderança desse segmento em investimentos, produção e capacidade instalada. Sua capacidade instalada, capacidade sob construção e capacidade de geração de energia hidrelétrica, energia solar fotovoltaica e nuclear representam a maior do mundo (HAO & HAN, 2016).

Em 2017, pela primeira vez a Agência Internacional de Energia concluiu que a expansão da capacidade instalada em energia solar cresceu mais rápido que qualquer outra fonte de energia. A China, por sua vez, exerce papel dominante nesse cenário, pois é o país com maior participação nesta estatística (STATE FORESTRY ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, 2017).

Hoje, a China é líder mundial em capacidade instalada de energia solar e eólica. Apesar de ainda depender significativamente do carvão, o país investe em tecnologias de armazenamento de energia e modernização de redes elétricas, buscando equilibrar suas metas climáticas com a estabilidade econômica e social.

Existem diferentes conceitos de políticas públicas, como pode ser observado a partir do debate realizado por Yu (2016), mas o que melhor sintetiza esta noção é a de que elas constituem um ato de grande impacto do governo, que objetiva se dirigir a uma questão de relevância pública específica, podendo ser para um tempo presente ou futuro. Vale ressaltar que pode ser relativo a qualquer esfera (nacional, regional, municipal, provincial, dentre outros).

Na China, observa-se que diversos planos e políticas foram levados a cabo pelo governo para incentivar o desenvolvimento de tecnologias renováveis. Nesse sentido, pode-se observar que a estratégia chinesa possui dois elementos fundamentais, orientados para o objetivo de promover o país a categoria de nação inovativa, impulsionando, conseqüentemente, seu desenvolvimento. O primeiro consiste na sua capacidade de produzir tecnologia autóctone, conferindo-lhe maior poder e autonomia. O segundo, a conformação de firmas líderes, que através do controle de mais marcas, faria com que o país pudesse manipular e definir padrões técnicos do segmento em questão. Dessa forma, a articulação entre Pesquisa & Desenvolvimento e a política industrial, somada a grande capacidade de o país gerar demanda (destacam-se as compras governamentais), contribuem o sucesso desta estratégia.

Para a análise das políticas públicas de transição energética da China, foram consultadas fontes que fornecem informações sobre os objetivos, instrumentos e impacto dessas iniciativas. As fontes utilizadas para a elaboração do Anexo II foram:

1. *International Carbon Action Partnership (ICAP)*: A plataforma ICAP documenta políticas climáticas globais relacionadas aos mercados de carbono. Uma das políticas analisadas foi o *Emissions Trading System (ETS)*, que descreve a estrutura e os mecanismos do sistema de comércio de emissões na China;
2. *J. Byrne - Research and Policy Publications*: A política de *Onshore Wind Feed-in Tariff* foi analisada com base em estudos publicados nesse portal, que aborda as tarifas de compra para energia eólica terrestre. Essa política é fundamental para a expansão da energia eólica na China, garantindo incentivos financeiros para investidores e desenvolvedores do setor;
3. *China Daily*: As Emendas à Lei de Energia Renovável foram descritas pelo portal China Daily, que detalha mudanças legislativas relevantes, como novos mecanismos de apoio à geração renovável e integração dessas fontes ao sistema elétrico nacional. A cobertura fornece uma visão geral das modificações legais e seus impactos;
4. *China Energy Portal*: O documento *Key Tasks for Resolving Excess Capacity and Promoting a Clean Energy Transformation* está disponível no China Energy Portal,

detalhando as diretrizes do governo chinês para lidar com a capacidade excedente no setor energético, enquanto promove a transição para fontes limpas. A política aborda o fechamento de usinas a carvão e o incentivo ao desenvolvimento de energias renováveis;

5. Agência Internacional de Energia (IEA): A IEA desempenha um papel crucial como fonte de informações para as políticas públicas da China. Ela fornece análises detalhadas, avaliações de impacto e informações sobre o contexto regulatório, permitindo um entendimento aprofundado das estratégias do país.

6. Estudos técnicos e estratégias apresentados em congressos ou plataformas acadêmicas, como *Scopus*, *Web of Science*, dentre outros.

### **3.2.1 Principais objetivos de políticas públicas em termos de transição energética**

A transição energética da China, marcada por compromissos ambiciosos como alcançar a neutralidade de carbono até 2060 e o pico de emissões antes de 2030, é resultado de uma abordagem estratégica fundamentada em políticas públicas e na execução de planos quinquenais de desenvolvimento econômico e social. Esta seção analisa as principais estratégias implementadas pelo país para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis, fortalecer a liderança global em energias renováveis e promover a equidade energética, com base em documentos oficiais chineses, como os Planos Quinquenais, e estudos de referência, incluindo a análise de Li & Taeihagh (2020).

A partir de uma revisão documental detalhada, foram utilizados relatórios governamentais e de organizações internacionais, como o Banco Mundial e o IEA, além de publicações científicas que destacam as políticas e instrumentos adotados pela China. Esses documentos servem de base para identificar as principais medidas voltadas à promoção de tecnologias renováveis, à redução de emissões de CO<sub>2</sub> em tecnologias baseadas em carvão e ao controle da poluição do ar. Assim, esta análise explora como a China articula incentivos financeiros, regulamentações e inovação tecnológica para enfrentar os desafios da transição energética em um dos maiores mercados globais de energia.

#### **1. Neutralidade de Carbono e Redução de Emissões**

A China assumiu o compromisso de alcançar a neutralidade de carbono até 2060 e

atingir o pico de emissões antes de 2030. Para isso, busca reduzir significativamente sua dependência de combustíveis fósseis, especialmente o carvão, que historicamente domina sua matriz energética, contribuindo para uma economia mais limpa e sustentável.

## 2. Liderança Global em Energias Renováveis

Tornar-se líder mundial em tecnologias renováveis, como energia solar fotovoltaica e eólica, é um objetivo central. Isso envolve o fortalecimento da capacidade instalada, inovação tecnológica e desenvolvimento de um mercado doméstico para energias limpas, promovendo a independência tecnológica e aumentando sua competitividade global, explícito em seus últimos dois planos quinquenais - 13º e 14º Planos Quinquenais (CHINA, 2016; 2021).

## 3. Promoção do Desenvolvimento Sustentável e Equidade Energética

A China busca expandir o acesso à energia limpa em áreas remotas e rurais, utilizando programas como o "*Brightness*" e "*Golden Sun*". Esse objetivo não apenas promove o desenvolvimento local sustentável, mas também contribui para a inclusão social e a redução das desigualdades regionais.

### **3.2.2 Principais estratégias de políticas públicas voltadas para a descarbonização dos setores energéticos**

Li & Taeihagh (2020) realizam a opções pelas seguintes estratégias ao analisar as políticas implementadas para transição energética no país:

#### 1. Promoção de tecnologias de energia renovável

A China tem implementado políticas para aumentar a capacidade instalada de energias renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica. Entre as principais ações estão:

- Subsídios e tarifas *feed-in*: Garantem preços competitivos para os produtores de energia renovável, incentivando investimentos: Estabelecimento de metas anuais para a

capacidade renovável instalada nos Planos Quinquenais de Desenvolvimento Econômico e Social.

- Incentivos por meio de subsídios diretos: Apoio financeiro para empresas e consumidores na adoção de tecnologias renováveis.

## 2. Redução de emissões de CO<sub>2</sub> de tecnologias baseadas em carvão

A China implementou uma série de instrumentos para diminuir as emissões de carbono das usinas a carvão, que ainda representam uma parcela significativa da matriz energética do país. Entre as principais medidas estão:

- Esquemas de Comércio de Emissões de Carbono (CO<sub>2</sub> ETS): O país introduziu mercados regionais de carbono, culminando em um mercado nacional lançado em 2021, com o objetivo de incentivar empresas a reduzir suas emissões por meio de um sistema de *cap-and-trade*.
- Padrões de eficiência energética: Estabelecimento de limites de emissões para novas usinas e melhorias nas tecnologias existentes para reduzir a intensidade de carbono por unidade de energia gerada.

## 3. Controle da poluição do ar por tecnologias baseadas em carvão

Além do foco em reduzir as emissões de carbono, a China também adotou medidas para controlar a poluição atmosférica associada às usinas de carvão. Essas ações incluem:

- Regulamentações de emissões de GEEs: Padrões estritos para limitar a emissão de poluentes locais, com monitoramento e aplicação de multas em caso de descumprimento.
- Tecnologias de controle de poluição: Exigência de instalação de equipamentos como dessulfurizadores e sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) em usinas existentes.
- Campanhas de transição energética urbana: Foco em reduzir o uso de carvão em áreas metropolitanas e incentivar o uso de gás natural e energias renováveis

### 3.2.3 Análise em termos de tipologia de instrumentos

A governança da transição energética na China caracteriza-se por uma forte centralização estatal, sustentada por um aparato institucional robusto e pela mobilização intensiva de instrumentos de política pública. Na dimensão autoridade, observa-se a predominância de instrumentos coercitivos e diretivos, sobretudo por meio dos Planos Quinquenais e da Estratégia Nacional de Desenvolvimento de Energia. Tais instrumentos estabelecem metas obrigatórias de expansão para energias renováveis, eficiência energética e redução da intensidade de carbono, sendo operacionalizados por regulação direta e sanções estatais. A política de cotas de consumo de energia renovável, por exemplo, impõe obrigações às empresas de energia, com rígidos mecanismos de monitoramento e execução (IEA, 2023).

A dimensão tesouro revela uma estratégia agressiva de financiamento estatal voltado à aceleração tecnológica. O uso intensivo de subsídios, incentivos fiscais e crédito subsidiado por bancos públicos, como o *China Development Bank* e o *Export-Import Bank of China*, tem sido determinante para a liderança chinesa global em capacidade instalada de energia solar e eólica (IRENA, 2023). Tais instrumentos incluem desde fundos para inovação industrial até programas de “crédito verde” e emissão de títulos verdes. Embora eficazes na indução de escala e competitividade, tais medidas levantam preocupações quanto à eficiência alocativa e à sustentabilidade fiscal de longo prazo (IEA, 2023).

No campo da nodalidade, o governo chinês atua como núcleo de disseminação de informação e coordenação de campanhas públicas. Iniciativas centralizadas, conduzidas por órgãos como a Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma (NDRC), difundem narrativas sobre os benefícios da transição energética por meio de mídias estatais, materiais educativos e relatórios técnicos. No entanto, esse modelo de comunicação tende a ser unidirecional, com reduzida participação da sociedade civil e limitado espaço para a deliberação pública (IRENA, 2023).

Quanto à dimensão organização, a capacidade administrativa da China se destaca pela articulação entre níveis central e subnacionais, envolvendo instituições como a Administração Nacional de Energia (NEA) e o Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT). Esses órgãos coordenam grandes empreendimentos, como as bases renováveis em áreas desérticas e os sistemas de transmissão de ultra-alta tensão. Entretanto, a sobreposição de competências entre a NEA, a NDRC e o Ministério do Meio Ambiente (MEE) pode gerar fragmentação institucional e desafios de governança horizontal (IEA, 2023).

De forma geral, o modelo chinês se sustenta em instrumentos autoritários e financeiros, com grande capacidade de coordenação e implementação. Essa configuração tem possibilitado avanços notáveis em termos de escala e velocidade da transição energética. Contudo, sua baixa abertura participativa e a concentração decisória no nível central podem comprometer a resiliência do sistema frente à complexidade crescente da transição para a neutralidade de carbono até 2060.

### 3.2.4 Análise do *Policy Mix*

Ao analisar as principais estratégias de políticas públicas da China para a transição energética é possível avaliar o *Policy Mix* e sua aderência às dimensões-chave: abastecimento, desenvolvimento socioeconômico e acessibilidade. As estratégias analisadas abrangem promoção de energias renováveis, redução de emissões de CO<sub>2</sub> de tecnologias baseadas em carvão e controle da poluição do ar.

A transição energética na China é sustentada por um *Policy Mix*, que combina instrumentos regulatórios, financeiros e organizacionais. O planejamento centralizado, ancorado nos Planos Quinquenais, define metas para a expansão de renováveis e o desenvolvimento de tecnologias emergente (CHINA, 2016; 2021). Regulamentações como tarifas *feed-in* e leilões competitivos, associadas a subsídios gerenciados pelo Fundo de Desenvolvimento de Energia Renovável, impulsionam o mercado de energias limpas (IEA, 2021a).

A análise das dimensões da transição energética evidencia avanços e desafios. Em segurança de abastecimento, a diversificação da matriz e os investimentos em armazenamento fortalecem a resiliência, mas o carvão permanece estratégico para picos de demanda (IEA, 2021a). Em desenvolvimento socioeconômico, a criação de empregos e a liderança tecnológica global são destaques, embora desigualdades regionais em áreas dependentes do carvão demandem políticas de requalificação. Já em acessibilidade, a redução de custos das renováveis é significativa, mas tecnologias emergentes, como o hidrogênio, ainda enfrentam barreiras financeiras (REN21, 2021).

### 3.2.5 Análise das funções do TIS

A análise das funções do Sistema de Inovação Tecnológica (TIS) no caso chinês evidencia a eficácia de um modelo estatal altamente centralizado na promoção da transição energética e na consolidação da liderança global do país em tecnologias renováveis. A trajetória recente da China demonstra um esforço coordenado de articulação entre política industrial, inovação tecnológica e planejamento energético de longo prazo, o que se reflete no desempenho robusto das funções sistêmicas que compõem o TIS.

No que diz respeito ao desenvolvimento e difusão do conhecimento, a China ocupa uma posição de vanguarda, sustentada por uma infraestrutura sólida de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de baixo carbono. Programas nacionais como o *National Key R&D Program* e o *Made in China 2025* fomentam a colaboração entre universidades, institutos de pesquisa e empresas, com ênfase em setores estratégicos como energia solar, eólica, armazenamento e hidrogênio verde. Esse esforço tem se traduzido em avanços tecnológicos significativos e no aumento do número de patentes no campo das energias renováveis, consolidando o país como um dos principais produtores globais de tecnologias limpas (IEA, 2023; IRENA, 2023).

A experimentação empreendedora é fortemente estimulada pelo Estado, que oferece subsídios, incentivos fiscais e ambientes de teste controlados para tecnologias emergentes. A instalação de projetos-piloto em larga escala, como parques eólicos offshore e usinas de hidrogênio, permite a redução dos riscos típicos da inovação e a avaliação do desempenho técnico e econômico de novas soluções energéticas. Contudo, o controle estatal sobre os critérios de seleção e financiamento pode limitar a diversidade de experimentos e restringir a emergência de trajetórias tecnológicas alternativas (IEA, 2023).

A influência na direção da busca é a função mais fortemente desempenhada no caso chinês, refletindo o papel estratégico do governo central na definição de prioridades, metas e instrumentos. Os Planos Quinquenais e os documentos de planejamento energético, como o *14th Five-Year Plan for Renewable Energy Development*, exercem uma função orientadora, alinhando os esforços de governos locais, empresas estatais e atores privados em torno de objetivos comuns. Essa orientação *top-down* tem garantido coerência nas decisões de investimento e acelerado a expansão das energias renováveis, embora reduza a flexibilidade do sistema frente a mudanças não previstas (CHINA NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION, 2021).

A formação de mercados para tecnologias limpas é promovida por meio de mecanismos híbridos, que combinam tarifas reguladas (*feed-in tariffs*), leilões competitivos e metas

obrigatórias. Tais instrumentos permitiram a criação de mercados robustos para energia solar fotovoltaica, eólica e veículos elétricos, com elevada penetração em áreas urbanas e industriais. No entanto, a rápida expansão, associada à lógica de metas centralizadas, tem levado a distorções como sobrecapacidade em certas regiões e subutilização de infraestrutura elétrica (IRENA, 2023).

A legitimação das tecnologias de baixo carbono é promovida por meio de campanhas nacionais, compromissos climáticos internacionais e a inclusão da transição energética como prioridade na narrativa de desenvolvimento do país. A retórica oficial integra discursos sobre segurança energética, modernização econômica e combate às mudanças climáticas, reforçando a aceitação social das transformações em curso. O anúncio do compromisso de neutralidade de carbono até 2060, realizado pelo presidente Xi Jinping na ONU, exemplifica a construção de uma imagem internacional de liderança climática (CHINA, 2020).

A mobilização de recursos financeiros e humanos tem sido fundamental para a estratégia chinesa. Bancos estatais, como o *China Development Bank* e o *Export-Import Bank of China*, financiam projetos em larga escala, enquanto o governo investe na formação de profissionais especializados por meio de programas educacionais e técnicos. Esse modelo assegura capital e capacidades institucionais para implementação das políticas, embora também concentre decisões em um número restrito de atores (IEA, 2023).

Por fim, o desenvolvimento de externalidades positivas é promovido por meio da criação de *clusters* industriais, redes logísticas integradas e infraestrutura compartilhada, como linhas de transmissão de ultra-alta tensão. Essas ações geram economias de escala e reduzem custos sistêmicos. No entanto, a ênfase em soluções territorializadas pode limitar o impacto das externalidades em outras regiões menos favorecidas, exigindo políticas de equilíbrio territorial e coesão interregional (IRENA, 2023).

Em suma, o modelo chinês de transição energética destaca-se pela forte centralização, alta capacidade de mobilização estatal e clara orientação estratégica. As funções de direção da busca e legitimação operam como pilares do sistema, impulsionando políticas coordenadas e aceitação social. Contudo, o excesso de capacidade em certos segmentos e os riscos associados à baixa diversidade institucional sinalizam a necessidade de ajustes para garantir a sustentabilidade da transição no longo prazo.

### 3.3 POLÍTICAS E ESTRATÉGIAS – ÍNDIA

A transição energética de baixo carbono na Índia é um dos processos mais desafiadores em curso no cenário global. Sendo o terceiro maior emissor de gases de efeito estufa, o país enfrenta o desafio de equilibrar seu crescimento econômico acelerado com a necessidade de descarbonização. Com uma demanda crescente por energia impulsionada pela urbanização, expansão econômica e maiores necessidades de eletrificação, a transição energética se torna não apenas uma necessidade interna, mas também um exemplo de liderança global em sustentabilidade (BHATIA, 2023).

Janardhanan (2012) descreve que os desafios institucionais enfrentados pela Índia no contexto da transição energética são marcados por uma fragmentação significativa e pela complexidade de seu sistema de governança energética. A estrutura administrativa no setor é dividida entre diversos órgãos, como o Ministério de Petróleo e Gás Natural, o Ministério de Carvão, o Ministério de Energia Elétrica, o Ministério de Novas e Renováveis Fontes de Energia e o Departamento de Energia Atômica. Essa dispersão institucional resulta em dificuldades na coordenação e implementação de políticas públicas integradas para impulsionar a transição energética de forma eficiente e sustentável.

Além disso, os desafios institucionais na Índia também refletem as limitações em alinhar políticas de curto e longo prazo para a transição energética. A necessidade de atender às demandas imediatas de energia frequentemente entram em conflito com as metas de sustentabilidade e descarbonização, especialmente em um país com altas taxas de crescimento populacional e econômico. A fragmentação das responsabilidades entre diferentes órgãos cria redundâncias e conflitos de competências, dificultando a implementação de estratégias coordenadas. Além disso, políticas voltadas para a transição energética frequentemente não incluem mecanismos para abordar desigualdades regionais, o que amplifica as disparidades no acesso à energia limpa, especialmente em áreas rurais. Essa conjuntura destaca a necessidade de reformular as estruturas institucionais e adotar uma abordagem que equilibre crescimento econômico, equidade social e sustentabilidade ambiental (JANARDHANAN, 2012).

A Índia estabeleceu metas significativas, incluindo a expansão de 500 GW de capacidade de energia não fóssil até 2030 e a neutralidade de carbono até 2070. Essas metas são sustentadas por políticas de incentivo a tecnologias limpas, como leilões reversos e subsídios governamentais, que estimularam a rápida expansão da energia solar e eólica. Desde 2010, o país emergiu como líder mundial em capacidade instalada de renováveis, especialmente solar (BHATIA, 2023).

Entretanto, a dependência do carvão continua sendo um grande obstáculo. O setor de carvão é sustentado por usinas térmicas jovens, com média de 12 anos de operação, além de desempenhar um papel essencial na economia política do país. Esse papel inclui a geração de empregos formais e informais, a arrecadação de receitas fiscais e o subsídio cruzado ao sistema ferroviário indiano. Tais fatores criam bloqueios institucionais e políticos que dificultam uma transição rápida (BHATIA, 2023).

A integração de energias renováveis na rede elétrica é outro desafio crítico. Apesar de estudos indicarem viabilidade técnica e econômica, questões como mercados de energia fragmentados, previsões imprecisas de geração e falta de investimentos em tecnologias de armazenamento dificultam a adoção em larga escala. Além disso, o custo elevado de capital para projetos de renováveis torna o processo mais oneroso (BHATIA, 2023).

Do ponto de vista social, a justiça energética se apresenta como uma preocupação central. Grandes projetos de renováveis, como parques solares e eólicos, frequentemente levam à desapropriação de terras e marginalização de comunidades locais, especialmente grupos vulneráveis. Este fenômeno, conhecido como “*green grabbing*”, evidencia a necessidade de uma transição energética mais inclusiva e equitativa. Estudos mostram que os benefícios dessas iniciativas frequentemente se concentram em elites regionais e nacionais, enquanto os custos recaem sobre as populações locais mais pobres (BHATIA, 2023).

Para enfrentar esses desafios, a Índia começou a implementar políticas industriais verdes, como o programa de incentivos vinculados à produção (PLI), que visa fortalecer a fabricação doméstica de tecnologias limpas, incluindo células solares avançadas e baterias. Essa estratégia busca reduzir a dependência de importações e posicionar o país como líder global em inovação energética (BHATIA, 2023).

Adicionalmente, o conceito de “transição justa” está ganhando relevância. Reconhecendo os impactos socioeconômicos da descarbonização, as políticas estão voltadas para diversificar economias dependentes do carvão, criar empregos verdes e garantir que os benefícios da transição sejam amplamente distribuídos. Estima-se que a transição para energias renováveis possa gerar milhões de empregos, mas a substituição direta dos postos relacionados ao carvão ainda é limitada (BHATIA, 2023).

Embora marcada por avanços significativos, a transição energética da Índia ainda é uma jornada em construção. O país está equilibrando o incentivo às renováveis e a manutenção da infraestrutura existente. A superação de desafios relacionados à economia política, integração de tecnologias e justiça social será determinante para o sucesso dessa transição. Se bem-

sucedida, a Índia poderá se tornar um modelo global de desenvolvimento sustentável em um mundo de baixo carbono.

Para mapear as políticas públicas desenvolvidas e implementadas na Índia relacionadas à transição energética, foram consultadas fontes que forneceram informações sobre os objetivos, instrumentos e impacto dessas iniciativas e foram elencadas no Anexo III. São eles:

1. *Central Board of Irrigation and Power (CBIP)*: Instituição indiana responsável por compilar e divulgar políticas relacionadas à energia e infraestrutura. No contexto da pesquisa, a CBIP foi utilizada para obter informações sobre políticas estaduais, como a *Rajasthan Policy for Promoting Generation of Electricity from Wind*, que promove o uso de energia eólica por meio de incentivos fiscais e financeiros. As publicações da CBIP fornecem uma visão detalhada das diretrizes e regulações locais, sendo acessadas através de relatórios disponíveis em seu portal oficial.
2. Agência Internacional de Energia (IEA): A IEA documenta e analisa políticas energéticas globais, incluindo aquelas implementadas na Índia. Os relatórios da IEA fornecem uma perspectiva sobre as estratégias estaduais e nacionais, destacando os instrumentos regulatórios e financeiros empregados.
3. *Carbon Brief*: Uma plataforma especializada em análises sobre mudanças climáticas e energia, que oferece insights detalhados sobre o *National Electricity Plan* da Índia. Esse documento é fundamental para compreender o planejamento energético nacional, abordando a expansão das fontes renováveis e a gestão da dependência de carvão.
4. *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*: Como parte do Acordo de Paris, a Índia submeteu seu *Intended Nationally Determined Contribution (INDC)*, que define metas nacionais para mitigação das mudanças climáticas e expansão de energias renováveis. O INDC, acessado através do portal oficial da UNFCCC, apresenta compromissos como a redução da intensidade de carbono do PIB em 33-35% até 2030 e a obtenção de 40% da capacidade instalada de energia a partir de fontes não fósseis. Esses dados foram essenciais para compreender os objetivos estratégicos do país no âmbito global.
5. Estudos técnicos e estratégias apresentados em congressos ou plataformas acadêmicas, como *Scopus*, *Web of Science*, dentre outros.

### 3.3.1 Principais objetivos de políticas públicas relacionados à transição energética

A transição energética na Índia é guiada por uma série de objetivos de políticas públicas que visam enfrentar os desafios associados à dependência de combustíveis fósseis, promover o desenvolvimento sustentável e garantir a segurança energética do país. Esses objetivos refletem a necessidade de alinhar as metas de crescimento econômico com compromissos climáticos globais, como o Acordo de Paris, e abarcam aspectos ambientais, econômicos, sociais e tecnológicos.

Um dos principais objetivos é a descarbonização da matriz energética, com destaque para a meta de alcançar 500 GW de capacidade instalada de energia não fóssil até 2030 e a neutralidade de carbono até 2070. Além disso, a Índia pretende reduzir a intensidade de carbono do PIB em 45% até 2030, em comparação com os níveis de 2005. Essas metas visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que expandem a adoção de fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidrelétrica.

Outro pilar essencial das políticas públicas é a segurança energética. A Índia busca reduzir sua dependência de importações de combustíveis fósseis e tecnologias associadas, promovendo a fabricação doméstica de equipamentos, como painéis solares e baterias. Essa estratégia também inclui a diversificação da matriz energética, reduzindo riscos e aumentando a resiliência do sistema energético nacional.

O desenvolvimento socioeconômico é outro foco crucial. A transição energética é vista como uma oportunidade para gerar empregos verdes, especialmente nos setores de renováveis e tecnologias limpas. Além disso, as políticas incentivam o desenvolvimento de regiões economicamente desfavorecidas, particularmente aquelas dependentes do carvão, promovendo a diversificação econômica e criando alternativas sustentáveis.

A acessibilidade energética é um componente central das políticas públicas da Índia, especialmente em um contexto marcado pela prevalência da pobreza energética, onde milhões de pessoas ainda vivem sem acesso à eletricidade confiável. Para enfrentar esses desafios, o governo indiano tem implementado iniciativas que visam ampliar a eletrificação rural, utilizando sistemas descentralizados. Essas políticas têm como objetivo não apenas aumentar o acesso à energia, mas também garantir tarifas acessíveis por meio do incentivo ao uso de energias renováveis, como solar e eólica, contribuindo para a redução das desigualdades no acesso à energia (IEA, 2021).

No âmbito industrial, a Índia tem priorizado o fortalecimento do setor de tecnologias limpas. Através de políticas industriais verdes, como o programa de incentivos vinculados à

produção (PLI), o país busca estimular a fabricação local e se posicionar como líder global em inovação energética. Além disso, há um esforço para fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias avançadas, como hidrogênio verde e sistemas de armazenamento de energia.

Por fim, a modernização da infraestrutura energética é fundamental para viabilizar a transição. A Índia tem investido na modernização da rede elétrica para integrar fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, e no desenvolvimento de tecnologias limpas para setores complementares, como transporte e indústria.

Em síntese, os objetivos de políticas públicas da Índia na transição energética são amplos e interconectados, abordando desde metas climáticas até desenvolvimento socioeconômico e inovação tecnológica. Essas iniciativas refletem a ambição do país de liderar a descarbonização global enquanto atende às demandas internas de energia e desenvolvimento sustentável.

### **3.3.2 Estratégias de políticas públicas voltadas à descarbonização**

A Índia tem implementado estratégias para promover a transição energética com foco em três frentes principais: a promoção de tecnologias de energia renovável, a redução de emissões de CO<sub>2</sub> associadas a tecnologias baseadas no carvão e o controle da poluição do ar gerada por essas tecnologias. Essas iniciativas combinam esforços para expandir fontes limpas de energia com medidas que mitigam os impactos ambientais das fontes fósseis ainda predominantes na matriz energética.

A promoção de tecnologias de energia renovável é uma das prioridades da política energética indiana. Por meio de leilões competitivos, conhecidos como leilões reversos, o governo tem incentivado o desenvolvimento de projetos de energia solar e eólica a custos cada vez mais baixos, garantindo uma rápida expansão dessas tecnologias. Além disso, subsídios e incentivos fiscais têm desempenhado um papel crucial na atração de investimentos, tornando os projetos de renováveis mais acessíveis para desenvolvedores e investidores. Outra medida relevante é a criação de grandes parques solares, como o modelo pioneiro de Charanka, em Gujarat, onde o governo facilita a aquisição de terras e a integração das plantas à rede elétrica, reduzindo os riscos para os investidores.

A expansão das energias renováveis também está sendo sustentada pelo desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia. Sistemas como baterias de lítio e hidroelétricas reversíveis têm recebido incentivos para lidar com a intermitência das fontes

renováveis e garantir a estabilidade da rede elétrica. Paralelamente, a Índia investe na industrialização verde, promovendo a fabricação doméstica de equipamentos como painéis solares e baterias por meio do programa de incentivos vinculados à produção (PLI). Essa estratégia não apenas fortalece a segurança energética do país, mas também o posiciona como líder global em inovação tecnológica no setor (IEA, 2021b)

No entanto, considerando que o carvão ainda é uma fonte significativa de energia na Índia, o governo tem buscado reduzir as emissões de GEEs associadas a essas tecnologias. Entre as iniciativas destacam-se a modernização das usinas térmicas, que aumentam a eficiência e reduzem a intensidade de emissões. Adicionalmente, o governo tem incentivado a implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e o uso de carvão de maior qualidade para diminuir os impactos ambientais.

O controle da poluição do ar gerada por tecnologias baseadas no carvão é outro componente essencial das políticas públicas. Medidas como a lavagem do carvão, para remover impurezas antes da queima, e a instalação de sistemas de controle de emissões, têm sido amplamente promovidas. Essas tecnologias são complementadas por regulações ambientais mais rigorosas e pelo monitoramento das emissões de usinas térmicas, o que visa garantir o cumprimento das normas e reduzir a poluição local e regional (IEA, 2021b).

Em síntese, a Índia adota uma abordagem que busque ao mesmo tempo promover energias limpas enquanto gerencia os impactos ambientais do carvão, que ainda é fundamental para sua matriz energética. Essas estratégias integram avanços tecnológicos, incentivos econômicos e regulações ambientais para alcançar uma transição energética sustentável e alinhada aos compromissos climáticos globais.

### **3.3.3 Análise em termos de tipologia de instrumento**

A transição energética indiana apresenta uma combinação estratégica de instrumentos de políticas públicas voltados à ampliação da matriz energética renovável, em meio a um contexto de crescimento econômico acelerado e profundas desigualdades regionais. A atuação estatal é articulada por meio de políticas regulatórias, incentivos financeiros e coordenação institucional multiescalar, que, embora promissoras, enfrentam limitações estruturais.

No campo da autoridade, a Índia emprega mecanismos regulatórios com forte caráter diretivo. Metas obrigatórias de consumo mínimo de energia renovável por parte dos estados e

das distribuidoras de energia, instituídas por meio do programa *Renewable Purchase Obligation (RPO)*, exemplificam o uso da coerção legal como instrumento de transformação do mercado elétrico. Além disso, padrões mínimos de eficiência energética, como os definidos pelo Bureau of Energy Efficiency (BEE), complementam essa estrutura normativa. No entanto, a fragmentação entre as competências dos estados e do governo central, aliada à limitação institucional nos níveis subnacionais, compromete a eficácia da implementação, especialmente em estados com menor capacidade administrativa (IEA, 2023).

A dimensão do tesouro revela o esforço do governo indiano em mobilizar recursos financeiros para acelerar a transição energética. Programas como o *Jawaharlal Nehru National Solar Mission (JNNSM)* operam como instrumentos centrais para atrair investimentos privados, por meio de subsídios, incentivos fiscais e garantias de preços (*feed-in tariffs*). Essas medidas viabilizaram a rápida expansão da energia solar, tornando a Índia um dos maiores mercados solares do mundo. Entretanto, o espaço fiscal restrito, associado às necessidades sociais urgentes, impõe limites à continuidade desses subsídios em longo prazo e à abrangência das políticas de incentivo (IRENA, 2023).

Em termos de nodalidade, a atuação do Estado indiano na disseminação de informações e na mobilização social se expressa em campanhas como *Surya Mitra*, que promove a capacitação de técnicos em instalação de painéis solares, e em programas de difusão da energia solar em áreas rurais. Apesar de bem-sucedidas em alguns contextos, essas iniciativas ainda apresentam alcance limitado, sobretudo em regiões de baixa densidade populacional e com déficits de infraestrutura digital. A baixa capilaridade dos meios de comunicação governamentais também prejudica a construção de uma narrativa nacional robusta em torno da transição energética (IEA, 2023).

A organização institucional da política energética é coordenada pelo *Ministry of New and Renewable Energy (MNRE)*, que atua em articulação com agências reguladoras estaduais e empresas públicas como a SECI (*Solar Energy Corporation of India*). Essa estrutura permite o lançamento de leilões nacionais e programas de grande escala, como o *Kusum Scheme*, voltado à eletrificação rural com base em renováveis. Ainda assim, a descentralização político-administrativa da Índia resulta em sobreposição de competências e desigualdade na execução das políticas entre os estados, exigindo mecanismos de governança cooperativa mais robustos (MNRE, 2023).

De forma geral, a Índia avança por meio de um *Policy Mix* que combina instrumentos coercitivos, incentivos econômicos e estruturas organizacionais centralizadas para fomentar a transição energética. Apesar das conquistas expressivas em capacidade instalada renovável, os

desafios relacionados à coordenação intergovernamental, à estabilidade dos incentivos financeiros e à inclusão de comunidades periféricas permanecem centrais. A trajetória indiana evidencia, portanto, a tentativa de equilibrar crescimento econômico, segurança energética e justiça climática em um dos contextos socioeconômicos mais complexos do mundo.

### 3.3.4 Análise do *Policy Mix*

A transição energética na Índia é impulsionada por diretrizes estratégicas que alinham os esforços nacionais e estaduais em direção às metas de sustentabilidade. Instrumentos como tarifas *feed-in* e leilões competitivos têm incentivado o mercado de tecnologias limpas, enquanto subsídios e financiamentos, incluindo parcerias público-privadas, têm sido fundamentais para viabilizar projetos de grande escala. Contudo, a fragmentação institucional e os desafios na coordenação entre governos estaduais e o nível central limitam a eficácia dessas iniciativas (IEA, 2021b).

A análise das dimensões da transição energética revela avanços e desafios. Na segurança de abastecimento, a diversificação da matriz energética com renováveis fortalece a resiliência, mas a intermitência das fontes e a infraestrutura limitada de transmissão demandam maiores investimentos. No âmbito socioeconômico, a Índia prioriza a criação de empregos no setor de renováveis e o engajamento de comunidades locais em projetos descentralizados, mas desigualdades regionais, especialmente em áreas dependentes do carvão, apontam para a necessidade de políticas inclusivas, como requalificação profissional. Já na acessibilidade, a queda nos custos das tecnologias renováveis, impulsionada por leilões competitivos, tornou essas fontes mais viáveis economicamente, embora o financiamento de tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde, ainda enfrente barreiras financeiras significativas (IEA, 2021).

Apesar dos desafios relacionados à sustentabilidade financeira e à fragmentação institucional, o *Policy Mix* indiano reflete um compromisso com a transição energética, equilibrando metas climáticas com o desenvolvimento socioeconômico e a segurança energética. A ampliação de políticas inclusivas e a melhoria na integração entre níveis de governança são cruciais para sustentar o progresso alcançado.

### 3.3.5 Análise das funções do TIS

A análise das funções do TIS no caso da Índia evidencia um modelo de transição energética que combina ambição política e avanços tecnológicos com restrições institucionais e desigualdades estruturais. Em um contexto de crescimento econômico acelerado, pressão por inclusão social e desafios infraestruturais, as funções desempenhadas pelo TIS revelam tanto a capacidade adaptativa do Estado quanto os limites impostos por sua complexidade federativa.

A função relacionada ao desenvolvimento e difusão do conhecimento tem apresentado avanços, impulsionados por programas como o *Jawaharlal Nehru National Solar Mission (JNNSM)*, que promoveu P&D em energia solar fotovoltaica e estimulou parcerias com instituições internacionais de pesquisa. A criação de centros de excelência em energias renováveis e o fortalecimento da capacidade técnica de universidades e centros tecnológicos evidenciam a tentativa de construir uma base de conhecimento robusta. No entanto, a assimetria entre estados em termos de infraestrutura científica e acesso a financiamento para pesquisa limita a disseminação equitativa desses avanços (MNRE, 2023; IEA, 2023).

A função de experimentação empreendedora enfrenta obstáculos, especialmente em razão das dificuldades de acesso a financiamento de risco e da infraestrutura precária em áreas rurais. Embora existam iniciativas de demonstração tecnológica e apoio a startups por meio de incubadoras energéticas, como no caso do *International Solar Alliance Innovation Programme*, a escala dessas iniciativas ainda é insuficiente frente à dimensão territorial e às necessidades energéticas do país. A experimentação, portanto, permanece concentrada em polos urbanos e regiões com maior capacidade institucional (IRENA, 2023).

A influência na direção da busca é uma das funções mais bem desempenhadas pelo TIS indiano. O governo central, por meio de planos como o *National Action Plan on Climate Change (NAPCC)* e suas missões associadas, exerce um papel diretivo na definição de metas para a expansão da capacidade renovável, direcionando investimentos públicos e privados. Essa atuação estratégica tem impulsionado a adoção coordenada de tecnologias limpas e promovido a convergência dos esforços estatais com objetivos climáticos internacionais. Adicionalmente, as políticas nacionais têm servido como referência para ações em nível estadual, promovendo coerência normativa (IEA, 2023).

Quanto à formação de mercados, a Índia implementou instrumentos econômicos eficazes, como tarifas de alimentação (*feed-in tariffs*) e, mais recentemente, leilões competitivos para aquisição de energia renovável por meio da *Solar Energy Corporation of India (SECI)*. Esses mecanismos contribuíram para a significativa redução dos custos da energia

solar e eólica, tornando essas fontes cada vez mais competitivas frente às fontes fósseis. Entretanto, desafios persistem na integração das fontes renováveis à rede elétrica nacional e na garantia de contratos bancáveis em estados com menor capacidade fiscal (IRENA, 2023).

A legitimação das tecnologias de baixo carbono também se destaca como uma função estruturante. A ampla aceitação pública das renováveis é reforçada por campanhas de conscientização, como a *UJALA* (para substituição de lâmpadas por LEDs) e programas de eletrificação solar descentralizada em áreas rurais. Os compromissos internacionais assumidos pela Índia, incluindo as metas sob o Acordo de Paris e a liderança na *International Solar Alliance*, também conferem legitimidade política e simbólica às políticas de transição (MNRE, 2023).

A mobilização de recursos ocorre por meio de um misto de financiamento nacional e cooperação internacional. Os subsídios do governo central, aliados a aportes de fundos multilaterais como o *Green Climate Fund* e agências como o *ADB* e o *World Bank*, sustentam projetos de geração distribuída, infraestrutura de transmissão e eletrificação rural. Contudo, o acesso desigual aos mecanismos de financiamento e a dependência de empréstimos externos colocam em questão a sustentabilidade de longo prazo dessas iniciativas, especialmente diante de restrições orçamentárias e prioridades sociais concorrentes (IEA, 2023).

Por fim, a função de desenvolvimento de externalidades positivas ainda se encontra em estágio incipiente. Embora haja esforços para desenvolver cadeias de valor locais para energia solar e turbinas eólicas, incluindo programas de incentivo à manufatura nacional (*Make in India*), a consolidação de clusters tecnológicos e redes de fornecedores especializados ainda é limitada. A ausência de um ecossistema integrado de inovação dificulta a criação de sinergias sistêmicas e compromete o fortalecimento de capacidades produtivas internas (IRENA, 2023).

Em síntese, o modelo indiano demonstra forte capacidade de definição estratégica e engajamento social, com destaque para as funções de direção da busca e legitimação. No entanto, a persistência de barreiras estruturais, como desigualdades regionais, dificuldades na experimentação e restrições financeiras, sinaliza a necessidade de reforçar a coordenação federativa e os investimentos em capacidades institucionais para consolidar um sistema de inovação energético resiliente e inclusivo.

### 3.4 COMO O ARCABOUÇO TEÓRICO-ANALÍTICO PROPOSTO EXPLICA OS MAIORES OU MENORES AVANÇOS NAS POLÍTICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DE BAIXO CARBONO

A análise comparativa entre Alemanha, China e Índia, com base no arcabouço teórico-analítico proposto nesta tese, permite interpretar como diferentes arranjos institucionais, escolhas de instrumentos e configurações sociotécnicas moldam o ritmo e a profundidade da transição energética de baixo carbono em cada país. Ao articular as dimensões do *Policy Mix* e do *Technological Innovation Systems* (TIS), observa-se que os maiores avanços são alcançados quando há coerência entre metas de longo prazo, instrumentos eficazes e instituições capazes de ativar funções sistêmicas fundamentais para a inovação.

A Alemanha oferece um exemplo dessa coerência, ao estabelecer metas legalmente vinculantes de neutralidade climática até 2045 e uma redução de 65% das emissões até 2030, em relação aos níveis de 1990. Essas metas são sustentadas por um conjunto de instrumentos diversificados, como leilões para renováveis (*EEG Auctions*), tributação sobre o carbono no setor de transportes e aquecimento, e linhas de financiamento verde operadas pelo banco público *Kreditanstalt für Wiederaufbau* (KfW). A governança envolve instituições como o Ministério Federal da Economia e Proteção Climática, a Agência Federal de Redes (BNetzA) e os governos estaduais, com forte integração entre os níveis federais e locais. Essa estrutura permite uma atuação articulada e legítima, promovendo estabilidade regulatória e previsibilidade para investimentos de longo prazo (IEA, 2023).

Sua configuração dos instrumentos de política pública reflete coerência e estabilidade institucional, articulando-se com os objetivos de longo prazo da transição energética. O uso de instrumentos de tesouro é central, destacando-se os subsídios à geração renovável via tarifas *feed-in* no início dos anos 2000, posteriormente substituídos por leilões sob o EEG 2017. O financiamento de tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde, é operado por meio do banco público KfW, que mobiliza grandes volumes de capital para projetos alinhados às metas climáticas (IEA, 2023). Os instrumentos de autoridade também desempenham papel relevante, com destaque para o *Kohleausstiegsgesetz*, que estabelece cronograma para eliminação do carvão até 2038, e as metas vinculantes da *Klimaschutzgesetz*, que regulam limites setoriais de emissões. Quanto à organização, observa-se forte atuação do Ministério Federal da Economia e Proteção Climática (BMWK) e da Agência Federal de Redes (BNetzA), com divisão clara de competências e capacidade técnica consolidada. A nodalidade aparece como uma dimensão transversal, com intensa produção e disseminação de informações por órgãos públicos,

institutos independentes e plataformas de participação cidadã, contribuindo diretamente para a função de legitimação (F5). O equilíbrio entre os quatro tipos de instrumentos favorece a ativação coordenada de múltiplas funções do TIS, reforçando o papel da Alemanha como referência em transições energéticas com base em governança democrática e inovação incremental.

Contudo, apesar dos avanços estruturais, a trajetória alemã também evidencia tensões e limitações que revelam os desafios da manutenção de um ritmo constante de transição. A crise energética europeia deflagrada pela guerra na Ucrânia levou à reativação temporária de usinas a carvão como medida de segurança energética, contrariando parcialmente os compromissos climáticos de curto prazo. Além disso, obstáculos relacionados à burocracia, à resistência local à expansão da energia eólica *onshore* e aos custos crescentes da energia para o setor industrial têm provocado ajustes nas metas intermediárias e pressões políticas por maior flexibilização regulatória. Esses episódios indicam que, embora a Alemanha mantenha um arcabouço institucional sólido e metas ambiciosas, a transição energética não é linear nem imune a choques exógenos, sendo necessário reforçar a capacidade de resposta adaptativa das políticas e sua resiliência diante de contextos geopolíticos instáveis.

Ainda assim, o equilíbrio entre os quatro tipos de instrumentos (tesouro, autoridade, organização e modalidade) favorece a ativação coordenada de múltiplas funções do TIS, como a formação de mercados (F4), a mobilização de recursos (F6) e a legitimação social (F5). A Alemanha continua sendo uma referência internacional em transições energéticas orientadas por inovação incremental, descentralização e governança democrática, mesmo diante dos desafios conjunturais que testam a solidez de seu modelo.

Na China, a coerência é assegurada por um modelo de governança centralizada, no qual o Estado desempenha papel estratégico na definição de metas e alocação de recursos. O compromisso com a neutralidade de carbono até 2060 e o pico de emissões até 2030 é traduzido em metas obrigatórias nos Planos Quinquenais, reforçadas por instrumentos como cotas de consumo renovável por província, leilões centralizados e subsídios diretos. A mobilização de recursos é conduzida por empresas estatais como a *State Grid Corporation*, enquanto o desenvolvimento e a difusão do conhecimento são fomentados por programas de pesquisa e desenvolvimento coordenados por instituições como a Energy Research Institute (ERI). A atuação do *National Energy Administration* (NEA) assegura a integração entre os níveis nacional e provincial, o que permite rápidas decisões e implementação em larga escala, ainda que com menor participação social (IRENA, 2023).

Os avanços na transição energética são expressivos, sobretudo em termos de escala e velocidade, impulsionados por um modelo de governança centralizada que favorece a coordenação estatal e a implementação rápida de políticas. As metas são incorporadas nos Planos Quinquenais, orientando o direcionamento de investimentos públicos e privados. A mobilização de recursos (F6) é intensiva, apoiada por instrumentos como subsídios diretos, linhas de crédito concessionais e programas industriais massivos, o que transformou o país no maior produtor global de energia solar fotovoltaica, eólica e baterias (IRENA, 2023). A função de desenvolvimento e difusão do conhecimento (F1) é amplamente ativada por meio de programas como o *National Key R&D Program* e o *Made in China 2025*, que promovem sinergias entre institutos de pesquisa, universidades e empresas estatais para avançar em tecnologias estratégicas. O país também investe significativamente na construção de externalidades positivas (F7) e grandes bases de energia renovável em regiões desérticas, como Gansu e Xinjiang.

A distribuição dos instrumentos evidencia uma orientação fortemente centralizada, com predominância dos mecanismos de autoridade e tesouro. As metas obrigatórias, os padrões de eficiência energética e as cotas mínimas por província são exemplos clássicos de autoridade regulatória estatal. A mobilização de recursos (F6) está fortemente atrelada a investimentos estatais, crédito facilitado via bancos públicos e políticas industriais que priorizam a produção nacional de equipamentos renováveis, baterias e veículos elétricos. A nodalidade é menos explorada no sentido participativo: embora o Estado concentre grande volume de dados e informações técnicas, a circulação de informações estratégicas e o engajamento social permanecem limitados, reduzindo o potencial de legitimação espontânea das políticas (F5). A coerência vertical entre metas e execução é alta, mas a diversidade limitada de agentes e a baixa abertura à experimentação descentralizada (F2) dificultam a construção de soluções diversas e consensos amplos.

Apesar dos avanços notáveis em escala, velocidade e capacidade estatal de mobilização, o modelo chinês de transição energética apresenta fragilidades importantes quando observado sob a ótica de um sistema de inovação sociotécnica orientado por diversidade institucional, aprendizado social e legitimidade pública. A predominância de instrumentos de autoridade e tesouro, embora eficaz na coordenação vertical e na execução rápida, tende a concentrar o poder decisório em poucos atores estratégicos, restringindo o espaço para a experimentação descentralizada (F2) e limitando os canais de contestação e correção institucional. A função de legitimação (F5), conduzida majoritariamente por vias estatais e *top-down*, carece de processos deliberativos e de engajamento efetivo da sociedade civil, o que pode comprometer a

sustentabilidade política da transição diante de possíveis resistências sociais ou disputas distributivas. Além disso, a centralização do conhecimento (F1), embora eficaz do ponto de vista tecnológico, limita a pluralidade de saberes e a emergência de soluções locais inovadoras. Assim, a coerência do modelo chinês permanece vulnerável à ausência de mecanismos participativos e adaptativos que garantam resiliência institucional e inclusão democrática no longo prazo (IRENA, 2023; IEA, 2023).

A Índia, por sua vez, vem construindo gradualmente uma coerência institucional própria, adaptada às suas limitações estruturais e federativas. O país comprometeu-se com 500 GW de capacidade instalada não fóssil até 2030, incorporando essa meta em seus planos nacionais de energia e no NDC submetido à Convenção do Clima. A execução tem ocorrido por meio de instrumentos como leilões nacionais conduzidos pela *Solar Energy Corporation of India* (SECI), subsídios para agricultores no âmbito do programa *KUSUM Scheme* e mecanismos obrigatórios como as *Renewable Purchase Obligations* (RPOs). A governança é liderada pelo Ministério das Novas e Renováveis Energias (MNRE), em parceria com a SECI e a IREDA, e exige coordenação com os estados federados, que possuem autonomia para adaptar e implementar as políticas conforme suas capacidades.

Desde o lançamento do *Jawaharlal Nehru National Solar Mission*, a Índia vem ampliando significativamente sua capacidade instalada de energia solar. A formação de mercado (F4) é dinamizada por iniciativas como o *KUSUM Scheme*, que promove a energia solar descentralizada no meio rural, combinando acesso à eletricidade e apoio à agricultura. A legitimação (F5) é fortalecida por programas como o *Surya Mitra*, que oferece capacitação técnica a jovens em regiões com baixa renda, e por ações que integram comunidades locais em projetos de pequena escala (IRENA, 2022). Entretanto, a mobilização de recursos (F6) e a experimentação empreendedora (F2) enfrentam limitações severas, sobretudo em estados com baixa capacidade institucional e fiscal. A fragmentação entre os níveis federal e estadual compromete a coerência do *Policy Mix*, e a continuidade dos incentivos depende de arranjos político-institucionais instáveis. Apesar da existência de centros de excelência e de programas de inovação tecnológica, a disseminação do conhecimento (F1) ainda é desigual, e o financiamento de risco permanece restrito.

No que diz respeito à tipologia dos instrumentos utilizados, a Índia combina distintas ferramentas que refletem suas capacidades institucionais e prioridades de política pública. Os instrumentos de autoridade são amplamente mobilizados por meio de metas obrigatórias (RPOs), regulamentos estaduais, normas técnicas e leilões centralizados. Quanto ao uso de instrumentos de tesouro, observa-se a concessão de subsídios para irrigação solar no meio rural,

incentivos fiscais à fabricação nacional de equipamentos e linhas de crédito operadas pela IREDA. Os instrumentos de organização têm papel central na governança, mas a presença de múltiplas agências e a sobreposição de competências dificultam a consistência na implementação. A nodalidade é limitada, com lacunas na difusão técnica e na acessibilidade dos dados entre regiões.

Essa composição revela um *Policy Mix* denso, mas com baixa coerência horizontal e vertical, sobretudo pela fragmentação federativa e pelas limitações na implementação dos instrumentos de tesouro e organização. A atuação mais robusta em autoridade e em alguns mecanismos de financiamento garante avanços pontuais, porém insuficientes para acelerar uma transição em larga escala e de forma equitativa. A análise qualitativa demonstra, portanto, que o grau de alinhamento entre a escolha dos instrumentos e a capacidade institucional disponível é um fator determinante para o alcance e a estabilidade da política energética indiana.

Essa análise evidencia que os maiores avanços na transição energética ocorrem quando as políticas públicas são capazes de ativar, de forma coordenada, múltiplas funções do TIS por meio de um conjunto articulado de instrumentos. Contudo, a ativação eficaz dessas funções não depende apenas da presença formal de políticas ou da densidade do *Policy Mix*, mas da capacidade institucional de operacionalizar tais instrumentos com legitimidade, continuidade e adaptabilidade. A Alemanha exemplifica um modelo descentralizado, tecnicamente robusto e socialmente legitimado, sustentado por instituições estáveis e por um pacto sociopolítico relativamente consolidado em torno da descarbonização. Seu modelo reforça a ideia de que a inovação incremental, aliada à participação cidadã e à previsibilidade regulatória, constitui um diferencial para a construção de trajetórias sustentáveis de longo prazo, ainda que desafios persistam, como o ritmo da eliminação do carvão e os custos da eletrificação setorial.

A China, por sua vez, apresenta uma trajetória caracterizada por celeridade e escala, viabilizada por uma arquitetura estatal altamente centralizada, que assegura coerência vertical entre metas, instrumentos e execução. No entanto, essa centralização tende a priorizar a eficiência técnica e o domínio industrial em detrimento de mecanismos participativos e de diversidade institucional. A limitação da função de legitimação (F5), a baixa abertura à experimentação descentralizada (F2) e a fragilidade dos canais de *accountability* social podem, no médio e longo prazo, gerar tensões internas — especialmente à medida que os impactos sociais e territoriais da transição se aprofundarem. Assim, embora o modelo chinês seja eficaz em termos de metas de produção e expansão tecnológica, ele carece de mecanismos de correção responsiva às assimetrias sociais e ambientais geradas pelo próprio processo de transição.

Já a Índia se caracteriza por ser um caso de transição energética em contexto de restrições estruturais, profundas desigualdades regionais e capacidades institucionais assimétricas. Embora apresente avanços relevantes na formação de mercados (F4) e na inclusão social via energias descentralizadas, sua trajetória é marcada por descontinuidades, fragmentação federativa e instabilidade orçamentária. O processo de aprendizado institucional observado (expresso na adaptação de instrumentos e na articulação com atores subnacionais) é uma evidência importante da resiliência do sistema indiano, mas também revela os limites da atuação governamental frente a problemas históricos de governança, financiamento e coordenação. A ausência de coerência horizontal entre políticas e de *enforcement* efetivo em alguns estados compromete o potencial transformador de iniciativas bem desenhadas.

O arcabouço teórico-analítico aqui proposto permite compreender essas trajetórias de forma integrada, revelando que a transição energética de baixo carbono não se dá por acúmulo linear de tecnologias, mas por arranjos políticos, institucionais e sociais que estruturam (e ao mesmo tempo limitam) os caminhos possíveis da inovação em contextos específicos. A comparação evidencia que transições eficazes exigem não apenas instrumentos sofisticados, mas também instituições legitimadas, capacidades de coordenação, participação social e sensibilidade às desigualdades territoriais.

### 3.5 POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO DA ESCALA DE LIKERT NA AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Dentre as possibilidades metodológicas que podem ser exploradas em estudos futuros, destaca-se o uso da escala de Likert como ferramenta para mensurar, de forma padronizada, o impacto das políticas públicas sobre as funções do Sistema de Inovação Tecnológica (TIS) e sobre a tipologia de instrumentos utilizada. Trata-se de uma proposta ainda em fase exploratória, que exige aprimoramentos conceituais e operacionais, sobretudo no que se refere à definição de critérios objetivos e à validação empírica dos dados. O desenvolvimento dessa abordagem poderia ser enriquecido por meio da aplicação de questionários estruturados a especialistas e atores envolvidos com a formulação e implementação de políticas públicas, permitindo refinar a percepção sobre o desempenho das iniciativas avaliadas. Assim, a escala de Likert se configuraria como uma possível alternativa para análises comparativas e sistemáticas, oferecendo uma base mais sólida para recomendações de aprimoramento das estratégias de transição energética em contextos nacionais distintos.

A escala de Likert é uma ferramenta utilizada em pesquisas e avaliações para medir percepções, atitudes ou o desempenho de políticas e iniciativas. No contexto da análise das políticas públicas relacionadas às funções do TIS, ela seria utilizada para tentar mensurar o nível de contribuição das políticas para cada função essencial do sistema.

Uma abordagem metodológica que pode ser utilizada em estudos futuros é a sua aplicação para avaliar diferentes dimensões das políticas públicas em uma estrutura padronizada de análise. Sugere-se, por exemplo, a adoção de uma escala de 1 a 5, variando de "Discordo totalmente" a "Concordo totalmente". Essa ferramenta permitiria não apenas uma visualização quantitativa do desempenho das políticas, mas também a identificação de pontos fortes e lacunas na sua formulação e implementação. A escala poderia ser aplicada a critérios como clareza dos objetivos, impacto das regulamentações, efetividade de incentivos financeiros, entre outros aspectos relevantes, oferecendo insumos para análises comparativas e recomendações de aprimoramento das políticas avaliadas.

Além disso, ela seria útil para comparar políticas em diferentes contextos, como países ou setores, permitindo uma análise de quais estratégias funcionam melhor em determinado cenário. Assim, ela não apenas avalia o desempenho atual, mas também ofereceria uma base para planejamento estratégico e desenvolvimento de políticas futuras.

Para operacionalizar a avaliação, a escala atribuiria as referidas pontuações às políticas com base em sua aderência aos critérios estabelecidos. A escala seria aplicada para analisar

como as políticas contribuem para superar falhas sistêmicas e atingir os objetivos gerais de transição energética.

Para avaliar os instrumentos de políticas públicas relacionados à transição energética, seria utilizada uma escala que mensurasse a eficácia, abrangência e impacto das políticas em relação aos quatro tipos de instrumentos definidos por Hood (1983): Nodalidade, Autoridade, Tesouro e Organização.

A escala seria composta por cinco níveis, como sintetiza o Quadro 4: (1) Discordo totalmente, indicando que o aspecto avaliado não está presente ou é extremamente deficiente; (2) Discordo parcialmente, quando o aspecto está presente, mas apresenta limitações significativas; (3) Neutro, para aspectos moderadamente presentes com impacto limitado; (4) Concordo parcialmente, em casos de bom desenvolvimento, mas com algumas limitações; e (5) Concordo totalmente, quando o aspecto está presente de forma abrangente.

Quadro 4 - Descrição das pontuações da Escala de Likert - tipologia de instrumento.

<b>Pontuação</b>	<b>Descrição</b>
<b>1 - Discordo totalmente</b>	O aspecto avaliado não está presente ou é extremamente deficiente.
<b>2 - Discordo parcialmente</b>	O aspecto está presente, mas apresenta limitações significativas.
<b>3 - Neutro</b>	O aspecto está moderadamente presente, com impacto limitado.
<b>4 - Concordo parcialmente</b>	O aspecto está bem desenvolvido, mas ainda apresenta algumas limitações.
<b>5 - Concordo totalmente</b>	O aspecto está presente de forma abrangente, atingindo os objetivos esperados.

Fonte: Elaboração própria.

Para Nodalidade, seriam analisadas a clareza e disseminação de informações e o uso de sistemas de comunicação. Em Autoridade, seria avaliada a existência e aplicação de regulamentações. No caso de Tesouro, o foco seria na eficiência e adequação do financiamento público e privado. Para Organização, seria analisada a coordenação entre diferentes níveis de governança e a disponibilidade de recursos humanos.

A Tabela 5 exemplifica o método que seria aplicado para avaliar e comparar políticas públicas com base nos quatro instrumentos de política, para cada país analisado. Cada linha

representa uma política pública específica, enquanto as colunas indicam a pontuação a ser atribuída.

Ao final, o total em cada coluna permite identificar quais instrumentos foram mais utilizados ou eficazes no conjunto de políticas avaliadas. Isso facilitaria a análise comparativa, destacando padrões, lacunas ou áreas de melhoria na formulação e implementação das políticas.

Tabela 5 - Avaliação das Políticas Públicas por Tipologia de Instrumentos (Modelo).

	Nodalidade	Autoridade	Tesouro	Organização
Política 1				
Política 2				
Política 3				
Política 4				
Política 5				
<b>Total</b>				

Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar as políticas públicas em relação às funções do TIS, também seria utilizada uma escala composta por cinco níveis, conforme sintetizado no Quadro 5. Assim, a pontuação seria atribuída da seguinte forma: (1) Discordo totalmente, quando a política não aborda ou apresenta falhas graves no aspecto avaliado; (2) Discordo parcialmente, para políticas que abordam o aspecto de forma limitada ou insuficiente, sem resultados significativos; (3) Neutro, quando o aspecto está moderadamente presente, com impacto parcial ou limitado; (4) Concordo parcialmente, para políticas que apresentam ações satisfatórias, mas com algumas limitações; e (5) Concordo totalmente, quando a política aborda o aspecto de forma abrangente, eficaz e com resultados claros.

Quadro 5 - Escala de Likert para Avaliação de Políticas Públicas - Funções do TIS.

<b>Pontuação</b>	<b>Descrição</b>
<b>1 - Discordo totalmente</b>	A política não aborda o aspecto avaliado ou apresenta falhas graves que comprometem sua eficácia.
<b>2 - Discordo parcialmente</b>	A política aborda o aspecto de forma limitada ou insuficiente, sem resultados significativos.
<b>3 - Neutro</b>	O aspecto está moderadamente presente, com impacto parcial ou limitado.
<b>4 - Concordo parcialmente</b>	A política apresenta ações satisfatórias, mas ainda possui algumas limitações.
<b>5 - Concordo totalmente</b>	A política aborda o aspecto de forma abrangente, eficaz e com resultados claros.

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 exemplifica como seriam atribuídas as pontuações, análogas ao realizado na tipologia por instrumentos. Cada linha representaria uma política pública específica, enquanto as colunas indicam a pontuação a ser atribuída para cada função analisada.

Para (F1) Desenvolvimento e Difusão do Conhecimento, seriam considerados fatores como incentivo à pesquisa, fortalecimento de redes de conhecimento e acesso a informações científicas. Em (F2) Experimentação Empreendedora, os critérios incluiriam suporte financeiro a projetos-piloto, incentivo a startups e a flexibilidade regulatória para testar novas tecnologias. (F3) Influência na Direção da Busca avaliaria a clareza das metas de política pública, o alinhamento com demandas de mercado e a participação de *stakeholders*. (F4) Formação de Mercado analisaria mecanismos de incentivo financeiro, regulamentações para tecnologias emergentes e estímulo à adoção de novas tecnologias. Para (F5) Legitimação, seria considerada a aceitação social, campanhas de conscientização e apoio institucional às inovações. (F6) Mobilização de Recursos avaliaria o financiamento público e privado, programas de capacitação e acesso à infraestrutura tecnológica. Por fim, (F7) Desenvolvimento de Externalidades Positivas analisaria a criação de mercados especializados, o desenvolvimento de fornecedores locais e os benefícios indiretos às comunidades.

Tabela 6 - Avaliação das Políticas Públicas por Funções do TIS (Modelo).

	(F1)	(F2)	(F3)	(F4)	(F5)	(F6)	(F7)
Política 1							
Política 2							
Política 3							
Política 4							
Política 5							
Total							

Fonte: Elaboração própria.

A aplicação da metodologia ajudaria a fornecer a base para uma análise sistemática e comparativa das políticas públicas voltadas à transição energética nos países selecionados, apresentadas no Capítulo 3. A utilização da escala de Likert tanto para a tipologia dos instrumentos de política quanto para as funções do TIS permitiria comparar, a eficácia, abrangência e impacto das iniciativas em diferentes contextos nacionais. No Capítulo 3, essas metodologias seriam operacionalizadas num esforço de identificar padrões e lacunas em cada

país analisado, evidenciando as estratégias mais utilizadas em cada contexto na promoção de uma economia de baixo carbono e fornecendo subsídios para recomendações políticas futuras.

A escala de Likert, por sua vez, foi utilizada em um esforço metodológico para tentar destacar os pontos fortes e as lacunas da orientação das políticas adotadas. Essa combinação não apenas preencheria lacunas metodológicas na literatura, mas também ofereceria um modelo adaptável para futuras análises, podendo eventualmente ser aperfeiçoado e aplicado em países com outros tipos de dependência.

Além disso, a escala poderia ser aperfeiçoada, por meio da inclusão de níveis intermediários ou da criação de subindicadores, de modo a refinar a análise da complexidade das políticas públicas, especialmente em contextos em que os efeitos das ações governamentais são indiretos ou de longo prazo. Essa ferramenta poderia ainda ser adaptada para avaliações setoriais, regionais ou subnacionais, ampliando sua aplicabilidade e fornecendo uma base com maior nível de detalhes para análises comparativas. A integração da escala com a percepção dos principais atores, obtida por meio de entrevistas ou questionários, também representa uma possibilidade metodológica promissora para fortalecer o componente participativo das análises de governança da transição energética.

Outra frente promissora para o aprimoramento metodológico consiste na incorporação de análises dinâmicas e longitudinais, que permitam acompanhar a evolução das políticas públicas ao longo do tempo. A aplicação repetida da escala de Likert em diferentes momentos permitiria avaliar não apenas o desempenho estático de uma política, mas também sua trajetória de aprimoramento, adaptação ou estagnação. Isso é particularmente relevante em contextos de transição energética, onde os efeitos de determinadas intervenções como subsídios, regulamentações ou investimentos em P&D, podem se manifestar de forma cumulativa ou tardia, exigindo abordagens analíticas sensíveis à temporalidade das transformações sociotécnicas.

Uma limitação importante da aplicação da escala de Likert no contexto da análise de políticas públicas de transição energética refere-se à sua sensibilidade às complexidades institucionais e estruturais que variam entre os países analisados. Como demonstrado ao longo desta tese, os arranjos político-institucionais e as capacidades estatais da Alemanha, China e Índia influenciam significativamente tanto a escolha dos instrumentos quanto a ativação das funções do TIS. Diante disso, a padronização da avaliação por meio de uma escala numérica pode simplificar excessivamente dinâmicas que, na realidade, envolvem múltiplos níveis de governança, conflitos distributivos e trajetórias históricas distintas. Para superar esse risco de reducionismo, estudos futuros poderiam considerar o desenvolvimento de escalas adaptativas,

ajustadas de acordo com o contexto institucional de cada país ou setor, ampliando a capacidade analítica da ferramenta sem comprometer sua comparabilidade.

Além disso, destaca-se a importância de aperfeiçoar a escala por meio da inclusão de subindicadores qualitativos que capturem nuances críticas, como o grau de coordenação interinstitucional, o nível de contestação política e os efeitos colaterais não previstos das políticas públicas. Tais dimensões foram recorrentes nos casos analisados nesta pesquisa, particularmente na tensão entre centralização e descentralização de competências na Índia, nos mecanismos de legitimação social na Alemanha e na mobilização seletiva de recursos financeiros na China. Incorporar essas variáveis em subníveis avaliativos permitiria não apenas uma mensuração mais precisa das funções do TIS, mas também uma leitura mais robusta sobre como os instrumentos de política pública são efetivamente operacionalizados em diferentes contextos. Nesse sentido, a escala de Likert deve ser vista como uma ferramenta flexível e evolutiva, que precisa dialogar criticamente com os pressupostos teóricos da análise sociotécnica.

## CONCLUSÃO

A transição energética de baixo carbono tem se destacado na agenda de pesquisa acadêmica, dada a intensificação das mudanças climáticas e seus impactos socioeconômicos. Estudos recentes alertam para a necessidade de uma redução drástica nas emissões de GEEs até 2030, sob o risco de ultrapassarmos os limites críticos de aquecimento global. Esse cenário reforça a relevância de se investigar os caminhos possíveis para uma transição energética de baixo carbono, para que se possa superar a dependência histórica sobre os combustíveis fósseis.

A motivação para a realização desta tese se deu pela necessidade em compreender como países com diferentes realidades socioeconômicas e institucionais podem enfrentar essa transição de maneira eficaz, equilibrando descarbonização, segurança energética e desenvolvimento socioeconômico. Alemanha, China e Índia oferecem exemplos contrastantes, com estratégias que refletem seus contextos específicos: enquanto a Alemanha busca consolidar a *Energiewende* como modelo de descarbonização, a China busca ser um polo de inovação tecnológica no setor renovável (explícito em seus planos quinquenais), mesmo com uma alta dependência do carvão, e a Índia lida com os desafios de acessibilidade de governança, uma vez que se caracteriza por ser centralizada e descentralizada.

A conjuntura atual é marcada por uma transição que precisa ser acelerada, mas que exige uma abordagem coordenada e sistêmica. As transições sociotécnicas demandam não apenas inovações tecnológicas, mas também mudanças institucionais e um forte apoio das políticas públicas. Nesse sentido, este trabalho contribui ao propor um arcabouço analítico que integra os arcabouços de TIS e *Policy Mix*, em um esforço analítico de desenvolver uma ferramenta de avaliação das políticas implementadas com o objetivo de realizar uma transição energética de baixo carbono.

A seleção dos documentos utilizados incluiu políticas públicas, relatórios técnicos e estudos acadêmicos das principais instituições e órgãos governamentais envolvidos na transição energética. Eles foram analisados qualitativamente, com base na metodologia proposta, permitindo uma visão comparativa das abordagens adotadas pela Alemanha, China e Índia no contexto da transição energética, que direta ou indiretamente contribuem para a redução da dependência do carvão e consequente descarbonização da matriz energética. A pesquisa não apenas evidencia a complexidade dos desafios enfrentados por cada país, mas também demonstra a diversidade de políticas e instrumentos utilizados para tentar promover além da descarbonização, segurança energética e acessibilidade.

Além disso, a revisão bibliográfica realizada representa um pilar central da tese, consolidando as contribuições teóricas que serviram de base para a formulação do arcabouço analítico utilizado. Foram artigos que contextualizam as transições energéticas dentro de debates sobre sustentabilidade e inovação. A revisão permitiu não apenas a construção de critérios de análise, mas também a identificação de lacunas e oportunidades na literatura, reforçando a relevância desta pesquisa.

A análise das funções do TIS revelou que dimensões como a criação de mercados, a mobilização de recursos e a legitimação social são importantes para superar barreiras como “aprisionamentos” tecnológicos, dependências de trajetória e resistências institucionais. No entanto, os contextos políticos, econômicos e culturais dos países analisados enfatizaram que um *Policy Mix* eficaz deve ser sensível às especificidades locais, evidenciado pela diversidade de estratégias de política utilizadas pelos países. Enquanto alguns países, como a Alemanha, demonstraram avanços na integração de políticas setoriais, outros, como a Índia, ainda enfrentam dificuldades em alinhar metas de longo prazo com realidades de curto prazo.

A presente pesquisa propôs uma contribuição ao campo das análises de políticas públicas a partir da ampliação do arcabouço teórico de Li & Taeihagh (2020) para avaliar as políticas quanto a tipologia de instrumento, a partir da categorização de Hood (1983) e das funções do TIS de Bergek (2019). Essa abordagem integrada buscou avaliar, a eficácia, abrangência e impacto das políticas públicas de transição energética em diferentes contextos nacionais. O arcabouço ampliado possibilitou reflexões sobre a interação entre instrumentos de política e funções críticas do TIS.

Por meio do arcabouço analítico proposto, foi possível identificar estratégias adotadas para enfrentar os desafios da descarbonização e suas respectivas dependências de combustíveis fósseis. Os resultados mostram que a China, devido à sua centralização administrativa e amplo financiamento estatal, lidera em várias categorias, como Autoridade e Organização. Já a Alemanha demonstrou avanços importantes em Tesouro e Legitimação, destacando-se na articulação de políticas voltadas à formação de mercado e aceitação social. Por sua vez, a Índia apresentou um desempenho equilibrado, com destaque em acessibilidade energética e Legitimação, embora enfrente desafios institucionais que impactam sua eficiência administrativa. Na Índia, os instrumentos de Autoridade e Organização se destacam, evidenciando esforços em regulamentação e coordenação administrativa para a transição energética. Esses resultados indicam a necessidade de maior integração e fortalecimento institucional para atender às demandas energéticas com sustentabilidade.

A ausência de uma análise institucional ampla nos estudos sobre transição energética, embora seja uma área que mereça maior atenção, não deve ser vista como um impedimento insuperável para o avanço da pesquisa. Assim, há espaço para ampliar essa dimensão, integrando-a de forma mais explícita às análises de transição energética. Isso representa uma oportunidade de explorar como fatores como capacidade administrativa, coordenação interministerial e estruturas de governança influenciam os resultados das políticas públicas.

Embora esta tese tenha tratado de temas amplos e complexos relacionados à transição energética, o tema da pobreza energética foi abordado de forma limitada, representando um conteúdo que merece maior atenção em futuras investigações. A pobreza energética, que afeta diretamente a equidade e a acessibilidade do fornecimento de energia, é uma dimensão essencial do trilema energético e possui um campo ainda pouco explorado, sobretudo no contexto de países com alta dependência de combustíveis fósseis e desafios socioeconômicos, como a Índia. Estudos mais aprofundados poderiam ampliar a compreensão sobre as desigualdades no acesso à energia, conectando essa discussão com a elaboração de políticas públicas que enfrentem tanto as necessidades sociais quanto os objetivos climáticos.

Como parte da agenda de pesquisa futura, pretende-se ampliar as ferramentas metodológicas utilizadas nesta tese. Uma possível proposta é o desenvolvimento de um questionário estruturado voltado a atores relevantes no contexto da transição energética. Esse instrumento permitiria captar percepções qualitativas e quantitativas sobre a eficácia das políticas e a interação entre os diferentes instrumentos e contextos institucionais. A aplicação desse questionário poderia ser combinada à escala de Likert, como forma de sistematizar as respostas e gerar comparabilidade entre casos e dimensões avaliadas.

Por fim, a agenda futura deve enfatizar o papel do trilema energético como eixo central de análise, destacando a interdependência entre segurança energética, sustentabilidade ambiental e equidade social. A pobreza energética, em particular, oferece um campo promissor para estudos mais amplos, considerando tanto as disparidades regionais quanto os impactos das políticas públicas em populações vulneráveis. Ao explorar essas dimensões, futuros artigos poderão não apenas avançar a base teórica existente, mas também oferecer contribuições práticas para a formulação de políticas mais inclusivas e eficazes, alinhadas com os objetivos globais de sustentabilidade e desenvolvimento social.

O trilema energético é um dos desafios mais complexos na transição para uma economia de baixo carbono, principalmente quando analisado sob a perspectiva do grau de desenvolvimento dos países. As prioridades entre os três pilares do trilema variam significativamente dependendo do contexto socioeconômico e institucional. Países

desenvolvidos, como a Alemanha, tendem a priorizar a sustentabilidade ambiental e a formação de mercados para tecnologias renováveis, enquanto garantem segurança energética por meio de sistemas bem estabelecidos. Já nações emergentes, como China e Índia, enfrentam o desafio de equilibrar o rápido crescimento da demanda energética com objetivos de sustentabilidade e inclusão social, frequentemente priorizando segurança de abastecimento e acessibilidade devido às pressões econômicas e sociais.

As transições sociotécnicas exigem abordagens que levem em conta a interdependência entre tecnologias, instituições e demandas culturais, o que é especialmente importante para países em desenvolvimento, onde as desigualdades no acesso à energia acentuam a complexidade do trilema. Nessas regiões, a transição energética não pode ser apenas técnica, mas deve abordar questões de justiça social e equidade, promovendo soluções que garantam acesso universal à energia limpa sem comprometer a segurança energética. Assim, o papel do Estado é crucial para superar as barreiras estruturais que limitam o avanço em todos os pilares do trilema, especialmente em países com capacidade administrativa e financeira reduzidas.

Esta tese buscou contribuir para o avanço das análises de políticas públicas de transição energética, ao realizar tanto uma contribuição teórico-analítica, quanto metodológica. A pesquisa buscou destacar a importância de considerar as especificidades institucionais, econômicas e sociais dos países analisados, demonstrando que a transição energética exige soluções adaptadas às realidades locais, mas alinhadas aos objetivos globais de sustentabilidade. Ao identificar lacunas, limitações e oportunidades, esta tese buscou cumprir os objetivos propostos e buscar caminhos para futuras investigações que possam aprofundar a compreensão das interações entre instrumentos de política, funções de inovação tecnológica e contextos sociotécnicos, contribuindo para a construção de uma transição energética mais justa, inclusiva e eficiente.

## REFERÊNCIAS

ALPERN, B.; LEMOS DE SOUSA, M. J. **Documented international enquiry on solid sedimentary fossil fuels; coal:** definitions, classifications, reserves-resources, and energy potential. *International Journal of Coal Geology*, v. 50, n. 1-4, p. 3-41, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00112-X). Acesso em: 25 jan. 2025.

ALEXANDER, E. **Institutional Transformation and Planning:** From Institutionalization Theory to Institutional Design. *Planning Theory*, v. 4, n. 3, p. 209-223, nov. 2005. DOI: 10.1177/1473095205058494. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/240712317\\_Institutional\\_Transformation\\_and\\_Planning\\_From\\_Institutionalization\\_Theory\\_to\\_Institutional\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/240712317_Institutional_Transformation_and_Planning_From_Institutionalization_Theory_to_Institutional_Design). Acesso em: 19 jan 2025.

ÁLVAREZ PELEGRY, Eloy; ORTIZ MARTÍNEZ, Iñigo; MENÉNDEZ SÁNCHEZ, Jaime. **The German Energy Transition (Energiewende): Policy, Energy Transformation, and Industrial Development.** Cuadernos Orkestra. Bilbao: Energy Chair of Orkestra, 2016. Disponível em: [https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/Energiewende\\_English.pdf](https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/Energiewende_English.pdf). Acesso em: 27 jan. 2025.

ANDREWS-SPEED, P. **Applying institutional theory to the low-carbon energy transition.** *Energy Research & Social Science*, 2015. Disponível em: <https://www.andrewsspeed.com/wp-content/uploads/2016/01/AndrewsSpeed.Applying-Institutional-Theory.Oct2015.pdf>. Acesso em: 21 maio 2024.

ARAÚJO, K. **The emerging field of energy transitions:** Progress, challenges and opportunities. *Energy Research & Social Science*, v. 1, p. 112-121, 2014.

ARRHENIUS, S. **On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.** *Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 5*, v. 41, p. 237-276, Apr. 1896. Disponível em: [https://www.rsc.org/images/arrhenius1896\\_tcm18-173546.pdf](https://www.rsc.org/images/arrhenius1896_tcm18-173546.pdf). Acesso em: 17 jun. 2024.

BAKHUIS, Jerico; et al. **Frameworks for multi-system innovation analysis from a sociotechnical perspective**: A systematic literature review. *Technological Forecasting & Social Change*, 201 (2024) 123266. Disponível online desde 15 fevereiro 2024. DOI: 10.1016/j.techfore.2024.123266.

BALL, Jeffrey; et. al. **The new solar system**: China's evolving solar industry and its implications for competitive solar power in the Unites States and in the world. Stanford: Stanford- Taylor Center for Energy Policy and Finance, 2017. Disponível em: <<https://www-cdn.law.stanford.edu/wp-content/uploads/2017/03/2017-03-20-Stanford-China-Report.pdf>>. Acesso em: 01 nov 2024.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.

BERGEK, A. **Technological innovation systems**: a review of recent findings and suggestions for further research. *Handbook of Sustainable Innovation*, [s.l.], p. 200-218, 2019. Edward Elgar Publishing Ltd. Disponível em: <https://research.chalmers.se>. Acesso em: 1 abr. 2024.

BERGEK, A.; et al. **Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems**: a scheme of analysis. *Research Policy*, v. 37, n. 3, p. 407-429, 2008.

BERGEK, A. et al. **Technological innovation systems in contexts**: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 16, p. 51-64, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>. Acesso em: 03 de abril de 2024.

BHATIA, Parth. **India's state-led electricity transition: A review of techno-economic, socio-technical and political perspectives**. *Energy Research & Social Science*, v. 102, p. 1-21, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103184>. Acesso em: 18 dez. 2024.

BMWi – FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY. *The Renewable Energy Sources Act (EEG)*. Berlin, 2017. Disponível em: [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/renewable-energy-sources-act-2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/renewable-energy-sources-act-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=1) . Acesso em: 26 jan. 2025.

BRASIL. **Protocolo de Quioto**. Tradução do Ministério da Ciência e Tecnologia com apoio do Ministério das Relações Exteriores, [1997]. Disponível em: <[http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/Protocolo\\_Quioto.pdf](http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/Protocolo_Quioto.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BURKE, Paul J.; CSEREKLYEI, Z. **Understanding the energy-GDP elasticity: A sectoral approach**. *Energy Economics*, v. 58, p. 199-210, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.07.004>. Acesso em 18 jun 2024.

CAPELLA, Ana Cláudia Niedhardt. **Formulação de Políticas**. Brasília: Enap, 2018.

CHEN, C. et al. **Comparing the energy transitions in Germany and China: synergies and recommendations**. *Energy Reports*, v. 5, p. 1249-1260, 2019. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.087>. Acesso em: 17 set. 2024.

CHINA. **President Xi Jinping's statement at the 75th Session of the UN General Assembly**. New York: United Nations, 2020.

CHINA. **The 13th Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China (2016–2020)**. Pequim: National Development and Reform Commission (NDRC), 2016. Disponível em: <https://en.ndrc.gov.cn/policies/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

CHINA. **The 14th Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China (2021–2025)**. Pequim: National Development and Reform Commission (NDRC), 2021. Disponível em: <https://en.ndrc.gov.cn/policies/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

CLIMATE WATCH DATA. **Emissão de GEEs relacionadas ao setor de energia (entre 1990-2021)**. In: Historical GHGs emissions. Disponível em: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2021&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2021&start_year=1990). Acesso em: 19 jan. 2025.

CLIMATE WATCH DATA. **Emissões acumuladas de GEEs relacionadas ao setor de energia**. In: Historical GHGs emissions. Disponível em:

[https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2021&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2021&start_year=1990). Acesso em: 19 jan. 2025.

CLIMATE WATCH DATA. **Intensidade de emissões de GEEs por unidade de PIB relacionadas ao setor de energia (CO<sub>2</sub>e/milhão de dólares do PIB)**. In: Historical GHGs emissions. Disponível em: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end\\_year=2021&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2021&start_year=1990). Acesso em: 19 jan. 2025.

CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGÍA (WEC). **El Trilema Energético**: 2012. Separata del nº 38 de Cuadernos de Energía. Madrid: Club Español de la Energía, 2012. Disponível em: <http://www.worldenergy.org/publications>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CRESWELL, J. W. **Revisão de literatura**. In: CRESWELL, J. W. Projeto de pesquisa: métodos quantitativo, qualitativo e misto. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007. p. 43-63.

CRIPPA, M. et al. **GHG emissions of all world countries**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>. Acesso em: 20 nov 2024.

CTESP, Center for Study of Science, Technology and Policy. **How did China become the largest Solar PV manufacturing country?** Feb, 2015. Disponível em: [http://www.cstep.in/uploads/default/files/publications/stuff/CSTEP\\_Solar\\_PV\\_Working\\_Series\\_2015.pdf](http://www.cstep.in/uploads/default/files/publications/stuff/CSTEP_Solar_PV_Working_Series_2015.pdf).

D'AUNNO, T. A.; SUTTON, R. I.; PRICE, R. H. **Isomorphism and external support in conflicting institutional environments**: A study of drug abuse treatment units. *Academy of Management Journal*, v. 34, n. 3, p. 636–661, 1991.

DIMAGGIO, P. J.; POWELL, W. W. **The iron cage revisited**: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. In: POWELL, W. W.; DIMAGGIO, P. J. (Ed.). *The New Institutionalism in Organizational Analysis*. Chicago: University of Chicago Press, 1991. p. 63–82.

DOSI, G. **Technological paradigms and technological trajectories**: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982

EDMONDSON, Duncan; KERN, Florian; ROGGE, Karoline S. **The co-evolution of policy mixes and socio-technical systems**: Towards a conceptual framework of policy mix feedback in sustainability transitions. *Research Policy*, v. 48, n. 10, p. 103555, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.03.010>. Acesso em: 01 dez. 2024.

EDMONDSON, D. **The politics of policy-mix-making processes in sustainability transitions**: exploring the failure of the zero carbon homes policy mix in the UK. 2020. Tese (Doutorado em Ciência e Política de Tecnologia) – Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex, Brighton, 2020.

EDQUIST, C., editor. **Systems of innovation**: Technologies, institutions and organizations. Pinter Publishers: London, 1997.

EYRE, N.; et al. **Reaching a 1.5°C target**: socio-technical challenges for a rapid transition to low-carbon electricity systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, [s.l.], v. 376, n. 20160462, 2018. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0462>. Acesso em: 25 mar. 2024.

FREEMAN, C. **Technology policy and economic performance**: lessons from Japan. London: Frances Pinter, 1987.

GEELS, F. W. **Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes**: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, v. 31, n. 8-9, p. 1257–1274, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8). Acesso em: 19 jan 2025.

GEELS, F. W. **Transições tecnológicas como processos de reconfiguração evolutiva**: uma perspectiva multi-nível e um estudo de caso. *Research Policy*, v. 31, n. 8–9, p. 1257-1274, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302000628>. Acesso em: 09 de abril de 2024.

GEELS, F. W. **From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory.** *Research Policy*, [s.l.], v. 33, n. 6-7, p. 897-920, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733304000185>. Acesso em: 1 abr. 2024.

GEELS, F. W. et al. **The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions.** *Joule*, v. 1, n. 3, p. 463-479, 2017. ISSN 2542-4351. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435117300922>. Acesso em: 23 de março de 2024. DOI: 10.1016/j.joule.2017.09.018.

GEELS, F. W.; SCHOT, J. **Typology of sociotechnical transition pathways.** *Research Policy*, v. 36, n. 3, p. 399–417, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>. Acesso em: 25 jan. 2025.

GEELS, F. W.; KERN, F.; CLARK, W. C. **Sustainability transitions in consumption-production systems.** *PNAS*, [s.l.], v. 120, n. 47, 2023a. Disponível em: <https://www.pnas.org>. Acesso em: 28 mar. 2024.

GEELS, F. W.; KERN, F.; CLARK, W. C. **System transitions research and sustainable development: Challenges, progress, and prospects.** *PNAS*, [s.l.], v. 120, n. 47, 2023b. Disponível em: <https://www.pnas.org>. Acesso em: 28 mar. 2024.

GERMANY. **Law on Phasing-Out Coal-Powered Energy by 2038 Enters into Force.** Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2020. Disponível em: <https://www.loc.gov/item/global-legal-monitor/2020-08-31/germany-law-on-phasing-out-coal-powered-energy-by-2038-enters-into-force/>. Acesso em: 20 jan 2025.

GERMANY. **Energy Efficiency Strategy 2050.** Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020. Disponível em: <https://www.bmwi.de>. Acesso em: 20 jan 2025.

GRUBB, M. et al. **Delivering a low-carbon electricity system: technologies, economics and policy.** Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

GUTIERREZ, Maria Bernadete Sarmiento. **Governança e inovação para um sistema energético sustentável**: como podemos melhorar? Boletim de Análise Político-Institucional, n. 6, nov. 2014. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5937/1/BAPI\\_n06\\_p49-54\\_NP\\_Governanca-inovacao-sistema\\_Diest\\_2014-nov.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5937/1/BAPI_n06_p49-54_NP_Governanca-inovacao-sistema_Diest_2014-nov.pdf). Acesso em: 25 jan. 2025.

HALL, Peter A. **The Political Power of Economic Ideas**: Keynesianism across Nations. In: STEINMO, S.; THELEN, K.; LONGSTRETH, F. (Orgs.). *Structuring Politics: Historical Institutionalism in Comparative Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. p. 56-91.

HALL, P. A.; TAYLOR, R. C. R. **Political science and the three new institutionalisms**. *Political Studies*, v. 44, n. 5, p. 936–957, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.1996.tb00343.x>. Acesso em: 18 jan 2025.

HALL, P. A.; SOSKICE, D. **Varieties of capitalism**: The institutional foundations of comparative advantage. Oxford: Oxford University Press, 2001.

HALLACK, M.; et al. **O Tempo do Mundo da Segurança, Integração e Transição Energética Justa**. Revista Tempo do Mundo, Rio de Janeiro: Ipea, n. 32, p. 6-13, ago. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

HAO, Y. & HAN K.. **China Country Report**. In: Kimura, S. & Han, P. (eds.). *Energy Outlook and Energy Saving Potential in East Asia 2016*. ERIA Research Project Report 2015. Jakarta: ERIA, 2016.

HARTLEY, J. Case study research. In: CASSELL, C.; SYMON, G. **Essential guide to qualitative methods in organizational research**. London: Sage, 2004, cap. 26.

HEKKERT, M. P.; et al. **Functions of innovation systems**: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, n. 4, p. 413-432, 2007.

HILLMAN, K. *et al.* **Fostering sustainable technologies**: a framework for analysing the governance on innovation systems. *Science and Public Policy*, v. 38, n. 5, p. 403–416, 2011.

Disponível em: <https://doi.org/10.3152/030234211X12960315267499>. Acesso em: 04 nov. 2024.

HOOD, Christopher. **The tools of government**. London: Macmillan, 1983.

HOOD, Christopher & MARGETTS, Helen Z. **The tools of government in the digital age**. 2. ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2007.

HOPKINS, Matthew & LI Yin. **The Rise of the Chinese photovoltaic industry**: Firms, Governments, and Global Competition. Draft chapter for China as a innovation nation: Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281455206>>.

HOWLETT, Michael; RAMESH, M. **Studying public policy: policy cycles and subsystems**. Oxford: Oxford University Press, 2003.

HUANG, Ren; WANG, Peng; ZHANG, Sufang. **Experiences and lessons for China's energy transition**: From the firewood era to the low carbon era. *Energy for Sustainable Development*, v. 78, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101368>. Acesso em: 12 jan. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **An energy sector roadmap to carbon neutrality in China**. Paris: IEA, 2021a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>. Acesso em: 27 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **India Energy Outlook 2021**. Paris: IEA, 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021>. Acesso em: 27 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 25 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Coal in the Global Energy Transition**. Paris: IEA, 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/coal-in-net-zero-transitions/executive-summary>. Acesso em: 20 jan 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 04.12.2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Accelerating Just Transitions for the Coal Sector**. Paris: IEA, 2024b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/accelerating-just-transitions-for-the-coal-sector>. Acesso em: 09 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); International Renewable Energy Agency (IRENA); UN Climate Change High-Level Champions (UNCC HLC). **Breakthrough Agenda Report 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>. Acesso em: 17 jun. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**. Volume 1. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2023a. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>. Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024>. Acesso em: 23 jan. 2025.

International Renewable Energy Agency (IRENA). **Brazil: Renewable Energy Statistics 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2023b. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical\\_Profiles/South%20America/Brazil\\_South%20America\\_RE\\_SP.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/South%20America/Brazil_South%20America_RE_SP.pdf). Acesso em: 21 maio 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments**. Geneva, Switzerland: IPCC, 1992. Disponível em:

[https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_90-92\\_assessments\\_far.shtml](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_90-92_assessments_far.shtml). Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 1995:** The IPCC Second Assessment Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 1995. Disponível em: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_second\\_assessment\\_1995.shtml](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_second_assessment_1995.shtml). Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001:** Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/english/index.htm>. Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007:** Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014:** Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023:** Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **About the IPCC.** Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

JACOBS, M.; MAZZUCATO, M. **Rethinking Capitalism:** Economics and Policy for Sustainable Economic Growth. Chichester: Wiley-Blackwell, 2016.

JANARDHANAN, N. **Energy Transition: Policies Enabling Energy Transition in India.** Institute for Global Environmental Strategies, 2012. Disponível em: <http://www.jstor.com/stable/resrep00778>. Acesso em: 27 jan. 2025.

KERN, F.; HOWLETT, M. **Implementing transition management as policy reforms**: A case study of the Dutch energy sector. *Policy Sciences*, v. 42, n. 4, p. 391-408, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11077-009-9099-x>. Acesso em: 05 dez. 2024.

KHAN, I. et al. **A study of the trilemma of energy balance, clean energy transitions, and economic expansion in the midst of environmental sustainability**: New insights from three trilemma leadership. *Energy*, v. 248, p. 123619, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123619>. Acesso em: 17 jun. 2024.

KHATOON, T. et al. **A global south perspective on the interplay between innovation policy mix and technological innovation systems dynamics**: The case of Dhaka City's Road passenger transport system. *Journal of Transport Geography*, v. 118, 2024. ISSN 0966-6923. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103932>. Acesso em: 22 out. 2024.

KIVIMAA, P.; KERN, F. **Creative destruction or mere niche support?** Innovation policy mixes for sustainability transitions. *Research Policy*, v. 45, p. 205–217, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.09.008>. Acesso em: 17 nov 2024.

KIVIMAA, Paula; KANGAS, Helena-Liisa; LAZAREVIC, Dusan. **Client-oriented evaluation of 'creative destruction' in policy mixes**: Finnish policies on building energy efficiency transition. *Energy Research & Social Science*, v. 33, p. 115-127, 2017. DOI: 10.1016/j.erss.2017.09.002. Acesso em: 26 nov 2024.

KÖHLER, J. et al. **An agenda for sustainability transitions research**: state of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 31, p. 1–32, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.004>. Acesso em: 17 nov. 2024.

KUZEMKO, et al. **Governing for sustainable energy system change**: Politics, contexts and contingency. *Energy Research & Social Science*, v. 12, p. 96–105, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.022>. Acesso em: 28 nov. 2024.

LI, Lili; TAEIHAGH, Araz. **An in-depth analysis of the evolution of the policy mix for the sustainable energy transition in China from 1981 to 2020**. *Applied Energy*, [S. l.], v. 263,

2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114611>. Acesso em: 04 nov. 2024.

LIKERT, Rensis. **A technique for the measurement of attitudes**. *Archives of Psychology*, v. 22, n. 140, p. 5-55, 1932.

LOCKWOOD, Matthew. **The UK's Levy Control Framework for renewable electricity support: Effects and significance**. *Energy Policy*, v. 97, p. 193–201, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.026>. Acesso em: 05 nov. 2024.

LOCKWOOD, Matthew. **Policy feedback and institutional context in energy transitions**. *Policy Sciences*, v. 55, p. 487-507, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11077-022-09467-1#citeas>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LOCKWOOD, M. et al. **Historical institutionalism and the politics of sustainable energy transitions: A research agenda**. *Environment and Planning C: Politics and Space*, v. 35, n. 2, p. 312–333, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0263774X16660561>. Acesso em: 2 dez. 2024.

MARCUSSEN, Martin. **Ideas and Elites: The Social Construction of Economic and Monetary Union**. Aalborg: Aalborg University Press, 2000.

MARKARD, J. **The next phase of the energy transition and its implications for research and policy**. *Nature Energy*, v. 3, n. 8, p. 628–633, 2018.

MARKARD, J.; TRUFFER, B. **Technological innovation systems and the multi-level perspective: towards an integrated framework**. *Research Policy*, v. 37, n. 4, p. 596-615, 2008.

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. **Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects**. *Research Policy*, v. 41, n. 6, p. 955–967, 2012.

MCCORMICK, John. **Rumo ao Paraíso. A História do Movimento Ambientalista**. Rio de Janeiro: Relume-Dumerá, 1992.

MCLEOD, Mary. **Every day and 'Other' Spaces**. In: LEACH, Neil (Ed.). *Rethinking Architecture: A Reader in Cultural Theory*. Londres: Routledge, 1997. p. 182-192.

MEADOWCROFT, J. **Environmental political economy, technological transitions and the state**. *New Political Economy*, v. 10, n. 4, p. 479–498, 2005. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13563460500344419>. Acesso em: 2 dez. 2024.

MEADOWCROFT, J. **Who is in charge here?** Governance for sustainable development in a complex world. *Journal of Environmental Policy and Planning*, v. 9, n. 3–4, p. 299–314, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15239080701631544>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MEADOWCROFT, J. **What about politics?** Sustainable development, transition management, and long-term energy transitions. *Policy Sciences*, Dordrecht, v. 42, n. 4, p. 323–340, 2009. DOI: 10.1007/s11077-009-9097-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11077-009-9097-z>. Acesso em: 21 out. 2024.

MELO, Tatiana Massaroli; et al. **Competitividade e gap tecnológico** – uma análise comparativa entre Brasil e países europeus selecionados. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas (SP), v. 16, n. 1, p. 129-156, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://www.example.com>. Acesso em: 21 maio 2024.

MEYER, John W.; ROWAN, Brian. **Institutionalized organizations**: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology*, v. 83, n. 2, p. 340–363, 1977. DOI: 10.1086/226550. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/226550>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MEYER, John W; et al. **Institutional and technical sources of organizational structure**: Explaining the structure of educational organizations. *Sociology of Education*, v. 56, n. 4, p. 212–241, 1983. Disponível em: <https://searchworks.stanford.edu/view/847917>. Acesso em: 05 nov. 2024.

MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY. **Annual Report 2022–2023**. New Delhi: Government of India, 2023. Disponível em: <https://mnre.gov.in/en/annual-reports-2022-23/>. Acesso em: 09 abr. 2025.

NEEDHAM, Barrie; LOUW, Erik. **Institutional Economics and Policies for Changing Land Markets**: The Case of Industrial Estates in the Netherlands. *Journal of Economic Geography*, v. 6, n. 5, p. 663-673, 2006.

NELSON, R. R. **Institutions supporting technical change in the United States**. *Research Policy*, v. 17, n. 3, p. 175-195, 1988.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **In search of useful theory of innovation**. *Research Policy*, v. 6, n. 1, p. 36-76, 1977.

NORDHAUS, W. **Integrated Economic and Climate Modeling**. In: *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*. [s.l.]: Elsevier, 2013. p. 1069-1131. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044459568300016X>. Acesso em: 20 mai. 2024.

NORTH, Douglass C. **Institutions, Institutional Change and Economic Performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

PAYNE, Anthony. **The Global Politics of Unequal Development**. Nova York: Palgrave Macmillan, 2013.

PEREZ, C. **Capitalism Technology and a Green Global Golden Age**: The Role of History in Helping to Shape the Future. *The Political Quarterly*, v. 86, n. 1, p. 191-213, jan./mar. 2015.

PINTO JUNIOR, H. Q.; et.al. **Economia da Energia: Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). **Emissions Gap Report 2022**: The Closing Window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi, 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>. Acesso em: 05 de abril de 2024.

REICHARDT, Kristin; et al. **Analyzing interdependencies between policy mixes and technological innovation systems**: The case of offshore wind in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, [s.l.], v. 106, p. 11-21, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.01.029>. Acesso em: 17 set 2024.

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2021. Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf). Acesso em: 27 jan. 2025.

RIP, A.; KEMP, R. **Technological change**. *Human Choice and Climate Change*, v. 2, n. 2, p. 327-399, 1998.

RIPPLE, W. J. et al. **World Scientists' Warning of a Climate Emergency**. *BioScience*, v. 70, n. 1, p. 8-12, 2020. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/70/1/8/5610806>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ROGGE, K. S.; REICHARDT, K. **Towards a more comprehensive policy mix conceptualization for environmental technological change**: a literature synthesis (No. S 3/2013). Working Paper Sustainability and Innovation, Karlsruhe, 2013. Disponível em: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2743225](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2743225). Acesso em: 18 set 2024.

ROGGE, K.; REICHARDT, K. **Policy mixes for sustainability transitions: An extFinalizado concept and framework for analysis**. *Research Policy*, v. 45, n. 8, p. 1620-1635, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.004>. Acesso em: 20 nov 2024.

ROGGE, K.; STADLER, K. **Applying policy mix thinking to social innovation: from experimentation to socio-technical change**. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 52, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100723>. Acesso em: 19 nov. 2024.

ROTMANS, J.; KEMP, R.; VAN ASSELT, M. **More evolution than revolution: transition management in public policy**. *Foresight*, v. 3, n. 1, p. 15-31, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/14636680110803003>. Acesso em: 21 out. 2024.

SACHS, Jeffrey D. **The Age of Sustainable Development**. New York: Columbia University Press, 2012.

SALARI, M.; JAVID, R. J.; NOGHANIBEHAMBARI, H. **The nexus between CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in the U.S.** *Economic Analysis and Policy*, v. 69, p. 182-194, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.12.007>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SCHOT, J.; GEELS, F. W. **Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy.** *Technology Analysis & Strategic Management*, v. 20, n. 5, p. 537-554, 2008.

SCOTT, Richard W. **The Adolescence of Institutional Theory.** *Administrative Science Quarterly*, v. 32, n. 4, p. 493-511, 1987.

SMIL, Vaclav. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospects.** Santa Barbara: Praeger, 2010.

SMITH, Wendy K.; LEWIS, Marianne W. **Toward a theory of paradox: A dynamic equilibrium model of organizing.** *Academy of Management Review*, v. 36, n. 2, p. 381-403, 2011.

SMITH, Adrian; STIRLING, Andy & BERKHOUT, Frans. **The governance of sustainable socio-technical transitions.** *Research Policy*, v. 34, n. 10, p. 1491–1510, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.07.005>. Acesso em: 01 dez. 2024.

SMITH, A.; VOß, J. P. & GRIN, J. **Innovation studies and sustainability transitions: the allure of the multi-level perspective and its challenges.** *Research Policy*, v. 39, n. 4, p. 435-448, 2010.

SOBHA, Parvathy. **Decarbonizing Indian Electricity Grid.** Luleå Technical University, Luleå: Sweden, 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/365359688\\_Decarbonizing\\_Indian\\_Electricity\\_Grid](https://www.researchgate.net/publication/365359688_Decarbonizing_Indian_Electricity_Grid). Acesso em: 19 jan. 2025.

SOLÉ, Jordi. **Climate and Energy Crises from the Perspective of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Trade-Offs between Systemic Transition and Societal Collapse?** *Sustainability*, v. 15, n. 2231, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15032231>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOVACOOOL, B. K. et al. **Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries.** *Energy*, v. 36, n. 10, p. 5846–5853, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.040>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SOVACOOOL, B. K. et al. **Sociotechnical agendas: Reviewing future directions for energy and climate research.** *Energy Research & Social Science*, v. 70, p. 101617, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101617>. Acesso em: 17 jun. 2024.

STATE FORESTRY ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. **China leading in green energy growth.** Out. 2017. Disponível em: [http://english.forestry.gov.cn/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1650:china-leading-in-green-energy-growth&catid=27&Itemid=165](http://english.forestry.gov.cn/index.php?option=com_content&view=article&id=1650:china-leading-in-green-energy-growth&catid=27&Itemid=165)>. Acesso em: 02 dez 2024.

STEINMO, Sven. **Historical Institutionalism.** In: DELLA PORTA, Donatella; KEATING, Michael (Ed.). *Approaches and Methodologies in Social Sciences: A Pluralist Perspective.* Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 118-138.

STEINMO, Sven; THELEN, Kathleen. **Historical institutionalism in comparative politics.** In: STEINMO, Sven; THELEN, Kathleen; LONGSTRETH, Frank (Ed.). *Structuring politics: Historical institutionalism in comparative analysis.* Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 1-32.

STREECK, Wolfgang; THELEN, Kathleen (Ed.). **Beyond Continuity: Institutional Change in Advanced Political Economies.** Oxford: Oxford University Press, 2005.

TAVARES, Felipe Botelho. **Política Energética em um Contexto de Transição: A Construção de um Regime de Baixo Carbono.** 2019. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em

Economia da Indústria e Tecnologia, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

TSEBELIS, George. **Veto Players: How Political Institutions Work**. Princeton: Princeton University Press, 2002.

THEOBALD, David M. et al. **Earth transformed**: detailed mapping of global human modification from 1990 to 2017. *Earth System Science Data*, v. 12, n. 4, p. 1953-1972, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1953-2020>. Acesso em: 16 jun. 2024.

TRIVEDI, S. et al. **Energy Transition, the Next Hotspot of Energy Research**: A Study Using Topic Modeling. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 71, p. 5829, 2024. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/378615586\\_Energy\\_Transition\\_the\\_Next\\_Hotspot\\_of\\_Energy\\_Research\\_A\\_Study\\_Using\\_Topic\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/378615586_Energy_Transition_the_Next_Hotspot_of_Energy_Research_A_Study_Using_Topic_Modeling). Acesso em: 04 dez. 2024.

UNITED NATIONS (UN). **The future we want**. Rio de Janeiro: Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, 2012. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/733FutureWeWant.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2025.

UNITED NATIONS (UN). **Open Working Group Proposal for Sustainable Development Goals**. Nova York: United Nations, 2014. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/focussdgs.html>. Acesso em: 9 jan. 2025.

UNITED NATIONS (UN). **Sustainable development goals**. Nova York: UN, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. Acesso em: 9 jan. 2025.

UNITED NATIONS (UN). **Report on the structured expert dialogue on the 2013–2015 review**. FCCC, v. 08863, 2015a. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/sb/eng/inf01.pdf>. Acesso em: 19 nov 2024.

UNITED NATIONS (UN). **Paris Agreement**. Paris: United Nations, 2015b. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2024.

UNITED NATIONS (UN). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 25 jan. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM (UNEP). **About us**. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/who-we-are/about-us>. Acesso em: 20 dez 2024.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Synthesis report on GST elements: Views on the elements for the consideration of outputs component of the first global stocktake**. Bonn, Germany: UNFCCC Secretariat, 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/news/new-synthesis-report-previews-parties-blueprint-for-decision-on-global-stocktake-at-cop28>. Acesso em: 01 jun. 2024.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (US EIA). **International Energy Statistics: Rankings – World** (dados obtidos na seção “*coal reserves*”). Disponível em: <https://www.eia.gov/international/rankings/world?pa=264&u=0&f=A&v=none&y=01%2F01%2F2023&ev=false>. Acesso em: 25 jan. 2025.

VIOLA, E.J. **As complexas negociações internacionais para atenuar as mudanças climáticas**. In: TRIGUEIRO, A. (Org.). *Meio ambiente no século 21: 21 especialistas falam da questão ambiental nas suas áreas de conhecimento*. 2. ed. Rio de Janeiro: Sextante, 2003. p. **183-197**.

WALRAVE, B.; RAVEN, R. **Modelling the dynamics of technological innovation systems**. *Research Policy*, v. 45, p. 1833–1844, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.05.011>. Acesso em: 04 nov. 2024.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our Common Future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). **World Energy Trilemma Index 2022**. Londres: WEC, 2022. Disponível em:

[https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World\\_Energy\\_Trilemma\\_Index\\_2022.pdf?v=1669839605](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf?v=1669839605). Acesso em: 25 jan. 2025.

YU, Hyun Jin Julie. **Public policies for the development of solar photovoltaic energy and the impacts on dynamics of technology systems and markets**. Economies and finances. PSL Research University, 2016.

ZHANG, Sufang; HE, Yongxiu. **Analysis on the development and policy of solar PV power in China**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 21. 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Sufang\\_Zhang3/publication/271889779\\_Analysis\\_on\\_the\\_development\\_and\\_policy\\_of\\_solar\\_PV\\_power\\_in\\_China/links/59edc71ba6fdccbbefd200a0/Analysis-on-the-development-and-policy-of-solar-PV-power-in-China.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sufang_Zhang3/publication/271889779_Analysis_on_the_development_and_policy_of_solar_PV_power_in_China/links/59edc71ba6fdccbbefd200a0/Analysis-on-the-development-and-policy-of-solar-PV-power-in-China.pdf)>.

ZUCKER, Lynne G. **Organizations as institutions**. In: BACHARACH, S. B. (Ed.). *Research in the Sociology of Organizations*. Greenwich: JAI Press, 1983. v. 2, p. 1-47.

## ANEXOS

## ANEXO I - PLANOS E POLÍTICAS NA ALEMANHA

	<b>Política</b>	<b>Instrumento de Política</b>	<b>Status</b>
1976	Energy Saving Act (EnEG)	Planejamento estratégico, instrumentos regulatórios	Superado
1985	Federal States (Länder) Support for Renewable Energy	Transferência de recursos para governos subnacionais, subsídios e incentivos, apoio a políticas públicas, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I).	Em vigor
1989	250 MW Wind Programme	Subsídios e incentivos financeiros	Finalizado
1990	ERP-Environment and Energy Saving Programme	Empréstimos	Superado
1991	Electricity Feed-In Law ("Stromeinspeisungsgesetz")	Instrumentos regulatórios, incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios.	Superado
1993	Full Cost Rates (Kostendeckende Vergütung)	Impostos sobre energia e outros tributos, tarifas feed-in ou prêmios.	Finalizado
1995	100 Million Programme	Incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e incentivos, assistência ou apoio na implementação, fornecimento de informações.	Finalizado
1995	Ordinance on the Fee Schedule for Architects and Engineers	Impostos sobre energia e outros tributos, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
1996	Green Power	Instrumentos regulatórios, regras de aquisição, monitoramento, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
1996	Fourth Energy Research Programme	Programa de pesquisa	Superado
1997	Federal Building Codes for Renewable Energy Production	Códigos e padrões, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor

1999	Market Incentive Programme (Marktanreizprogramm)	Implementação e difusão de tecnologia, incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e incentivos, empréstimos.	Em vigor
1999	100 000 Roofs Solar Power Programme	Empréstimos, incentivos fiscais ou financeiros.	Superado
1999	Measures in Industry and Energy Generation	Incentivos fiscais ou financeiros, instrumentos regulatórios.	Em vigor
1999	Eco-Tax Reform - First Stage	Impostos sobre energia e outros tributos.	Em vigor
1999	Preferential Loan Programmes offered by the Reconstruction Loan Corporation (KfW)	Empréstimos	Em vigor
1999	Electricity Tax	Impostos sobre energia e outros tributos.	Em vigor
2000	Renewable Energy Sources Act (EEG)	Tarifas feed-in ou prêmios, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I), meta de energia renovável, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	Em vigor
2000	Renewable Energy Act	Acesso à rede e prioridade para renováveis, tarifas feed-in ou prêmios, informação e educação, apoio a políticas públicas.	Em vigor
2000	Combined Heat and Power (CHP) Extra Law (Gesetz zum Schutz der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz)	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios.	Superado
2000	Emissions Trading Scheme	Instrumentos baseados no mercado, mecanismo de crédito e compensação de redução de emissões de GEE, permissões de emissões de GEE.	Finalizado
2001	Bio-Energy Ordinance under the Renewable Energy Act	Instrumentos regulatórios, padrões de produtos.	Em vigor
2001	Investing in the Future Programme (Zukunfts - Investitions-Programm, ZIP)	Technology deployment and diffusion, Research & Development and Deployment (RD&D)	Finalizado
2001	Legislation Drafted for Cogeneration	Implementação e difusão de tecnologia, pesquisa,	Superado

		desenvolvimento e implementação (P&D&I).	
2002	Renewables Technology Export Initiative	Pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I), apoio a políticas públicas.	Em vigor
2002	Law to Amend the Mineral Oil Tax Law and Renewable Energy Law	Instrumentos regulatórios, incentivos fiscais ou financeiros, alívio fiscal, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2002	Combined Heat and Power Act (KWKG)	Subsídios e incentivos financeiros.	Superado
2004	National Allocation Plan 2005-2007	Instrumentos baseados no mercado, instrumentos regulatórios, permissões de emissões de GEE.	Finalizado
2004	Biofuels Blending Regulations	Códigos e padrões	Superado
2004	Cooperation with Brazil on Ethanol Powered Cars	Instrumentos econômicos, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I).	Em vigor
2004	The federal government's fuel strategy	Planejamento estratégico	Finalizado
2004	Emissions Trading Law	Instrumentos baseados no mercado, mecanismo de crédito e compensação de redução de emissões de GEE, permissões de emissões de GEE.	Em vigor
2004	Solarthermie 2000Plus	Pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I), subsídios e incentivos, incentivos fiscais ou financeiros.	Finalizado
2005	KfW-Programme Producing Solar Power	Empréstimos	Superado
2005	Energy Industry Act (EnWG)	Fornecimento de informações, rótulo de certificação, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2005	Emissions Trading Registry	Permissões de emissões de GEE, criação institucional.	Finalizado
2006	Funding for Solar Power Development Center	Acordos negociados (setor público-privado), pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I).	Em vigor

2006	Energy Taxes: Coal, Biodiesel, Natural Gas	Alívio fiscal, instrumentos regulatórios, impostos sobre energia e outros tributos, impostos sobre CO2.	Em vigor
2006	Coalition Agreement: Target to Double Energy Productivity by 2020	Incentivos fiscais ou financeiros, apoio a políticas públicas, planejamento estratégico.	Em vigor
2006	Tax exemption for biofuels (in relation to Directive 2003/30/EC)	Tax relief	Finalizado
2007	E-Energy – ICT-based energy system of the future	Financiamento de P&D&I, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I), projeto de demonstração.	Em vigor
2007	Integrated Climate and Energy Programme (IEKP)	Alívio fiscal, padrão de desempenho, padrão comparativo, planejamento estratégico, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I), meta, meta política e não vinculativa de redução de GEE.	Finalizado
2008	National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technology	Financiamento de P&D&I, pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I).	Em vigor
2008	Stimulus Programme for Mini CHP Plants	Incentivos fiscais ou financeiros.	Em vigor
2008	Renewable Energies Heat Act	Incentivos fiscais ou financeiros, esquemas de obrigação.	Em vigor
2009	Law on the Conservation, Modernisation and Development of Combined Heat and Power (CHP)	Incentivos fiscais ou financeiros, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2009	Amendment of the Renewable Energy Sources Act -EEG-	Tarifas feed-in ou prêmios, apoio a políticas públicas.	Superado
2009	KfW Renewable Energies Programme (KfW-Programm Erneuerbare Energien)	Empréstimos, subsídios e incentivos.	Em vigor
2009	Power Grid Expansion Act (EnLAG)	Investimentos em infraestrutura.	Em vigor
2010	National Energy Action Plan (NREAP)	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta de energia	Finalizado

		renovável, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	
2010	Energy and Climate Fund Act (EKFG)	Incentivos fiscais ou financeiros, criação institucional.	Em vigor
2011	Sixth Energy Research Programme (6. Energieforschungsprogramm - Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung)	Pesquisa, Desenvolvimento e Implementação (P&D&I).	Em vigor
2011	KfW Programme Offshore Wind Energy	Empréstimos, subsídios e incentivos.	Em vigor
2011	Grid Expansion Acceleration Act (NABEG)	Investimentos em infraestrutura, apoio na implementação.	Em vigor
2012	CHP Agreements with Industry (Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Steigerung der Energieeffizienz)	Abordagens voluntárias, acordos negociados (setor público-privado).	Em vigor
2012	Amendment of the Renewable Energy Sources Act -EEG-	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios, apoio a políticas públicas.	Superado
2012	Carbon Capture and Storage Act (KSpG)	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2014	Amendment of the Renewable Energy Sources Act -EEG-	Impostos sobre energia e outros tributos, tarifas feed-in ou prêmios, planejamento estratégico, instrumentos regulatórios, meta de energia renovável, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	Em vigor
2016	Subsidy for Solar PV with Storage Installations (Programm zur Förderung von PV-Batteriespeichern)	Subsídios e incentivos, empréstimos.	Finalizado
2016	Act on the Digitisation of the Energy Transition	Planejamento estratégico, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2016	Act on the Further Development of the Electricity Market	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2016	Law for the conservation, modernisation and expansion of cogeneration	Incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e incentivos, instrumentos	Em vigor

		regulatórios, códigos e padrões.	
2016	Energy Tax Relief for Highly Efficient Plants for the Combined Generation of Power and Heat	Alívio fiscal.	Em vigor
2016	Revision of the Combined Heat and Power Act (CHP Act)	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2017	Amendment of the Renewable Energy Sources Act (EEG)	Esquemas de licitação, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2017	The Landlord-to-Tenant Electricity Act 2017	Eliminação de barreiras, remoção de incentivos divididos (problema entre proprietário e inquilino).	Em vigor
2017	Offshore Wind Energy Act (WindSeeG)	Instrumentos baseados no mercado, planejamento estratégico, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2018	Omnibus Energy Act	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios, planejamento estratégico, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2018	Electricity Grid Action Plan	Planejamento estratégico, auditoria.	Em vigor
2019	Fuel Emissions Trading Act (BEHG)	Instrumentos econômicos, instrumentos baseados no mercado, permissões de emissões de GEE.	Em vigor
2019	Integrated National Energy and Climate Plan	Meta, meta de redução de GEE, meta de energia renovável, meta de eficiência energética.	Em vigor
2020	National Hydrogen Strategy	Investimento direto, investimentos em infraestrutura, financiamento de P&D&I, apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, Pesquisa, Desenvolvimento e Implementação (P&D&I), programa de pesquisa, implementação e difusão de tecnologia, desenvolvimento de tecnologia.	Em vigor
2020	Amendment of the Renewable Energy Sources Act "EEG 2021"	Instrumentos econômicos, tarifas feed-in ou prêmios, esquemas de licitação, meta de energia	Em vigor

		renovável, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	
2020	German coal exit law (Kohleausstiegsgesetz)	Incentivos fiscais ou financeiros, esquemas de licitação, instrumentos regulatórios, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2021	Offshore Wind Energy Act (Amendment) - Increase of Expansion Target	Meta de energia renovável.	Em vigor
2021	Development and Resilience Plan (DARP)	Incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e incentivos.	Em vigor
2022	Package for the future - Expansion of renewable energies	Incentivos fiscais ou financeiros, meta, meta de energia renovável, eliminação de barreiras, instrumentos regulatórios, Pesquisa, Desenvolvimento e Implementação (P&D&I).	Em vigor
2023	Third Ordinance on the Implementation of the Wind Energy at Sea Act	Instrumentos regulatórios, remoção de barreiras.	Em vigor
2023	Law amending the Regional Planning Act and other regulations	Instrumentos regulatórios, planejamento estratégico.	Em vigor
2023	Photovoltaic Strategy	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta, meta de energia renovável, estratégia climática política e não vinculativa.	Em vigor
2023	Law for the immediate improvement of the framework conditions for renewable energies in urban planning law	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2023	Law on proof of origin for gas, hydrogen, heat or cold from renewable energies and on changing other energy regulations	Instrumentos regulatórios, renovação de barreiras.	Em vigor
2023	Heat Planning and the Decarbonisation of Heating Networks Act	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta, meta de energia renovável, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	Em vigor

## ANEXO II - PLANOS E POLÍTICAS NA CHINA

Ano	Política	Instrumento de Política	Status
1989	Minimum Energy Performance Standards (MEPS)	Códigos e padrões, outros requisitos obrigatórios, padrões de produtos, padrões de eficiência de combustível e emissões de veículos, certificação de qualidade.	Em vigor
1996	Brightness Programme	Planejamento estratégico.	Finalizado
1997	Energy Conservation Law (Legislative)	Apoio a políticas públicas, padrões setoriais, monitoramento, Pesquisa, Desenvolvimento e Implementação (P&D&I).	Superado
2001	Standard for Air Pollutants from Coal-burning, Oil-burning, and Gas-fired Boilers	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2001	Reduced VAT for renewable energy	Alívio fiscal.	Em vigor
2003	Preferential Tax Policies for Renewable Energy	Alívio fiscal.	Em vigor
2003	Wind Power Concession Programme	Tarifas feed-in ou prêmios.	Finalizado
2004	Differential Energy Pricing	Incentivos fiscais ou financeiros.	Em vigor
2006	Conversion of exhaust heat and pressure	Investimentos em infraestrutura, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2006	Strategic Plan for Industrial Efficiency	Planejamento estratégico, Pesquisa, Desenvolvimento e Implementação (P&D&I), desenvolvimento de tecnologia.	Em vigor
2006	Renewable Electricity Surcharge	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2006	Renewable Energy Act (Legislative)	Meta de energia renovável, monitoramento, criação institucional, incentivos fiscais ou financeiros, outros requisitos obrigatórios, acesso à rede e prioridade para renováveis, alívio fiscal, meta de energia renovável formal e legalmente vinculativa.	Superado
2006	Renewable Energy Law	Instrumentos econômicos, incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios, alívio fiscal, planejamento estratégico.	Em vigor
2006	Support for Biogas Projects	Planejamento estratégico.	Em vigor
2006	Medium- and Long-Term Plan for Nuclear Power Development	Planejamento estratégico.	Finalizado

2006	Expansion of Local Cogeneration (CHP)	Investimentos em infraestrutura	Em vigor
2007	Shandong Province energy fund	Implementação e difusão de tecnologia, investimento direto.	Em vigor
2007	Hainan Province Plan for the Construction of Wind Farms	Investimentos diretos.	Em vigor
2007	Medium and Long Term Development Plan for Renewable Energy	Planejamento estratégico.	Em vigor
2007	Special Fund for the Industrialization of Wind Power Equipment	Criação institucional, subsídios e incentivos.	Em vigor
2007	Retirement of Inefficient Plants	Outros requisitos obrigatórios, códigos e padrões, padrões setoriais.	Em vigor
2008	Energy Conservation Law	Apoio a políticas públicas, criação institucional, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2008	Notice on Relevant Issues concerning the Taxation Policies for Nuclear Power Industry	Alívio fiscal.	Em vigor
2008	Shandong Province Village Renewable Energy Regulations	Outros requisitos obrigatórios, subsídios e incentivos.	Em vigor
2009	Onshore wind feed-in Tariff	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2009	Renewable Energy Law amendments	Acesso à rede e prioridade para renováveis, investimento direto, investimentos em infraestrutura, alívio fiscal, criação institucional, implementação e difusão de tecnologia.	Em vigor
2009	Golden Sun Programme	Subsídios e incentivos.	Superado
2009	Offshore Wind developmnet plan	Planejamento estratégico, investimento direto, financiamento de P&D&I.	Em vigor
2010	Biomass electricity Feed-in tariff	Planejamento estratégico, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2010	Import duty removal on wind and hydro technological equipments	Alívio fiscal.	Em vigor
2010	Demand-Side Management Implementation Measures	Informação e educação, outros requisitos obrigatórios, apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, instrumentos regulatórios.	Em vigor
2010	Building Integrate Solar PV Programme	Tarifas feed-in ou prêmios, subsídios e incentivos.	Em vigor
2011	Solar PV feed-in tariff	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2011	The Twelfth Five-Year Plan for Renewable Energy of Beijing	Planejamento estratégico.	Em vigor
2012	Fuel excise tax	Impostos sobre energia e outros tributos.	Em vigor

2012	The Emission Standard for Air Pollutants from Thermal Power Plants	Padrões setoriais.	Em vigor
2012	12th Five Year Plan for National Strategic Emerging Industries	Planejamento estratégico, desenvolvimento de tecnologia, meta de energia renovável.	Finalizado
2012	Solar Industry 12th Five Year Development Planning	Planejamento estratégico, padrões setoriais.	Finalizado
2012	The "Golden Sun" demonstration project	Projeto de demonstração, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2012	Interim Measures on Renewable energy development fund Imposition and Management	Financiamento de P&D&I, monitoramento.	Em vigor
2012	Interim Measure of Distributed Solar Power Generation On-grid Service Agreement	Apoio a políticas públicas, instrumentos regulatórios, medição líquida (net metering), acesso à rede e prioridade para renováveis, investimentos em infraestrutura.	Em vigor
2012	Wind Power Technology Development 12th Five Year Special Planning	Criação institucional, meta de energia renovável.	Finalizado
2012	Renewable Energy Electricity feed-in tariff	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2012	The Notice on New Energy Demonstration City and Industrial Park	Transferência de recursos para governos subnacionais, projeto de demonstração.	Em vigor
2012	Law on Protection of Oil and Natural Gas Pipelines	Investimentos em infraestrutura, padrões setoriais.	Em vigor
2012	The Renewable Energy Tariff Surcharge Grant Funds Management Approach	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2012	The Twelfth Five-Year Plan for Renewable Energy	Planejamento estratégico, metas de energias renováveis.	Finalizado
2012	Notice on the Establishment of Demonstration Areas for Large-Scale distributed solar PV Power Generation	Planejamento estratégico, projeto de demonstração.	Em vigor
2012	Notice on feed-in tariff for co-firing generators burning coal and household waste	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2013	The State Development and Reform Commission's notice on promotion of PV industry by exert the price leverage effect	Subsídios e incentivos.	Em vigor
2013	Notice on the improvement of the grid connection and assimilation of wind electric power generation	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios.	Finalizado

2013	Renewable electricity generation bonus	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2013	Interim procedures of the management of distributed power grid	Criação institucional, subsídios e incentivos.	Em vigor
2013	Code of practice of the PV manufacturing	Códigos e padrões, auditoria, monitoramento.	Em vigor
2013	Feed-in tariff support for solar PV	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2013	Distributed photovoltaic power generation service guide of Southern Power Grid Company Limited (Interim)	Investimentos em infraestrutura, criação institucional, códigos e padrões.	Em vigor
2013	Notice on the policy of PV electricity VAT	Alívio fiscal.	Em vigor
2014	Notice of the State Development and Reform Commission on offshore wind power electricity price policy	Tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2014	Energy Development Strategy Action Plan	Meta, meta de eficiência energética, meta política e não vinculativa de eficiência energética, meta de energia renovável, meta política e não vinculativa de energia renovável.	Finalizado
2014	National certification and Implementation Supervision Commission, Energy Bureau on strengthening the photovoltaic products testing and certification work	Códigos e padrões.	Em vigor
2014	Action Plan for Upgrading of Coal Power Energy Conservation and Emission Reduction Released	Padrões setoriais, meta.	Finalizado
2014	Interim Measures for the new power access network supervision	Outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2014	Notice on issues concerning State Grid Corporation to buy distributed PV power generation projects' electricity products invoice etc.	Alívio fiscal.	Em vigor
2014	Notice of VAT policy of large-scale hydropower enterprise	Alívio fiscal.	Em vigor

2015	Interim management measures on renewable energy development funds	Instrumentos econômicos, incentivos fiscais ou financeiros, subsídios e incentivos.	Em vigor
2016	13th Renewable Energy Development Five Year Plan	Planejamento estratégico, metas de energia renovável.	Finalizado
2016	13th Solar Energy Development Five Year Plan	Planejamento estratégico, metas de energia renovável.	Finalizado
2016	Comprehensive Work Plan for Energy Conservation and Emissions Reduction During the 13th Five-Year Plan Period	Padrões de construção, padrões setoriais, metas de eficiência energética.	Finalizado
2016	Energy Supply and Consumption Revolution Strategy	Meta, meta de eficiência energética.	Finalizado
2016	13th Electricity Development Five Year Plan	Planejamento estratégico, metas de energias renováveis.	Finalizado
2016	Energy Technology Innovation Action Plan 2016-2030	Apoio de política, planejamento estratégico.	Em vigor
2016	13th Ocean Energy Development Five Year Plan	Planejamento Estratégico, Pesquisa, Desenvolvimento e Implantação (PD&I), implantação e difusão de tecnologia, desenvolvimento de tecnologia, meta de energia renovável	Finalizado
2016	Notice on solar PV deployment management and introduction of competitive bidding	Instrumentos econômicos, instrumentos baseados no mercado.	Em vigor
2016	Feed-in tariff for CSP	Incentivos fiscais ou financeiros, tarifas feed-in ou prêmios.	Em vigor
2016	13th Geothermal Energy Development Five Year Plan	Planejamento Estratégico, Meta de Energia Renovável.	Finalizado
2016	13th Wind Energy Development Five Year Plan (2016-2020)	Pesquisa, desenvolvimento e implementação (P&D&I).	Finalizado
2016	13th Energy Technology Innovation Five Year Plan	Pesquisa, Desenvolvimento & Implementação (P&D&I).	Em vigor
2017	Emissions Trading System	Permissões de emissões de GEE, mecanismo de crédito e compensação de redução de emissões de GEE, impostos sobre CO <sub>2</sub> .	Em vigor
2017	Renewable Energy Green Certificate and Trading Mechanism	Certificados verdes.	Em vigor
2017	Clean Winter Heating Plan in Northern China (2017 - 2021)	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, metas.	Finalizado

2018	Action Plan for the Development of Smart Photovoltaic Industry	Planejamento estratégico, padrões setoriais.	Em vigor
2018	Notice on Provisional Management Measures for Distributed Wind Power Project Development and Construction	Outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2019	Renewable portfolio standard benchmark	Metas de energia renovável.	Em vigor
2019	Trial measures for the regional integration of central government State Owned Enterprises in the coal fired power sector	Códigos e padrões, padrões setoriais.	Em vigor
2020	Key points of the work to resolve the excess capacity of coal power, coal mining and steel	Padrões setoriais, monitoramento, esquemas de obrigação.	Em vigor
2020	Carbon Trading Scheme	Permissões de emissões de GEE.	Em vigor
2020	Circular on 2023 risk and early warning for coal power planning and construction	Códigos e padrões, padrões setoriais, monitoramento.	Em vigor
2021	NEA Renewable Energy Target	Metas.	Superado
2021	White Paper on Energy Development "Energy in China's New Era"	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, eliminação de barreiras, acesso à rede e prioridade para renováveis.	Em vigor
2021	Notice on Printing and Distributing the "Guiding Opinions on Promoting the High-quality Development of Central Enterprises and Doing a Good Job in Carbon Neutralization"	Meta, meta de redução de GEE, meta de energia renovável.	Em vigor
2021	Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality	Instrumentos regulatórios, outros requisitos obrigatórios.	Em vigor
2021	Coal power phase-down plans	Metas.	Em vigor
2022	Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry (2021-2035)	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta.	Em vigor
2022	14th Five-Year Plan for New Energy Storage Development Implementation Plan	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico.	Em vigor

2022	Medium and Long-Term Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry (2021-2035)	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta, meta de energia renovável.	Em vigor
2022	14 FYP Modern Energy system Planning	Apoio a políticas públicas, planejamento estratégico, meta, meta de redução de GEE, meta de energia renovável.	Em vigor
2023	Measures for the Energy Conservation Examination of Fixed-Asset Investment Project	Instrumentos regulatórios.	Em vigor
2023	Electricity Demand Side Management Measures	Instrumentos regulatórios.	Em vigor

### ANEXO III - PLANOS E POLÍTICAS NA ÍNDIA

Ano	Política	Instrumento de Política
1981	Air Prevention and Control of Pollution Act	Policy support, Codes and standards
2001	Energy Conservation Act	Policy support, Institutional creation, Strategic planning, Regulatory Instruments, Obligation schemes
2002	Government Assistance for Wind Power Development	Loans, Tax relief
2002	Kerala Renewable Energy Policy	Feed-in tariffs or premiums, Tax relief
2003	Electricity Act	Strategic planning
2003	Government Assistance for Renewable Energy Projects (Wind, Solar, Biofuel, Hydro)	Grants and subsidies, Loans, Tax relief
2004	Ajasthan Policy for Promoting Generation Through Non-Conventional Energy Sources	Fiscal or financial incentives, Tax relief, Regulatory Instruments
2005	National Electricity Policy	Direct investment, Tendering schemes, Strategic planning, Other mandatory requirements, Research & Development and Deployment (RD&D)
2006	Tariff Policy	Feed-in tariffs or premiums, Other mandatory requirements
2006	Integrated Energy Policy	Strategic planning, Other mandatory requirements, Feed-in tariffs or premiums

2007	Pre-Payment Electricity Metering	Monitoring, Net metering
2007	National Programme on Energy Efficiency and Technology Up Gradation of SMEs (BEE-SME)	Information provision, Regulatory Instruments, Demonstration project
2008	Generation based incentives for wind power	Feed-in tariffs or premiums
2008	Solar Power Generation Based Incentive	Feed-in tariffs or premiums
2009	Gujarat Solar Power Policy	Net metering, Feed-in tariffs or premiums, Grants and subsidies, User charges, Green certificates
2009	National Mission for Enhanced Energy efficiency (NMEEE)	Direct investment, Fiscal or financial incentives, Market-based instruments, Strategic planning, Regulatory Instruments
2009	RE Tariff regulations	Feed-in tariffs or premiums
2009	Karnataka Renewable Energy Policy	User charges, Green certificates
2010	Clean Environment Cess	Energy and other taxes
2010	National Clean Energy Fund	Direct investment, RD&D funding, Grants and subsidies, Research & Development and Deployment (RD&D), Technology development
2010	National Solar Mission (Phase I and II)	Other mandatory requirements, Tax relief, Grants and subsidies, Research programme, Grid access and priority for renewables, Direct investment, Demonstration project, Target, Renewable energy target, Loans, Policy support, Research & Development and Deployment (RD&D), Political & non-binding renewable energy target
2010	Clean Energy Cess Rules	Institutional creation, Energy and other taxes
2011	Renewable energy certificates system	Green certificates, Other mandatory requirements
2011	Madhya Pradesh Small Hydro Power Policy	Tax relief
2011	Strategic Plan for New and Renewable Energy	Strategic planning
2011	Solar cities development programme	Funds to sub-national governments, Technology deployment and diffusion, Direct investment
2011	Rajasthan Solar Policy	Tax relief, Green certificates, Institutional creation, Strategic planning

2011	Madhya Pradesh Biomass-Based Electricity (Power) Project Implementation Policy	Tax relief, Strategic planning
2011	Perform, Achieve, Trade (PAT) Scheme	White certificates, Auditing, Monitoring, Obligation schemes
2012	Rajasthan Policy for Promoting Generation of Electricity from Wind	Fiscal or financial incentives
2012	Madhya Pradesh Wind Power Project Policy	Tax relief, Green certificates, Strategic planning
2012	National Electricity Plan	Climate strategy, Renewable energy target
2013	Twelfth Five Year Plan (2012–2017): Faster, More Inclusive and Sustainable Growth	Strategic planning, Target, GHG reduction target, Political & non-binding GHG reduction target, Renewable energy target, Political & non-binding renewable energy target
2013	Uttar Pradesh Solar Energy Policy	Direct investment, Infrastructure investments, Fiscal or financial incentives, Energy and other taxes, Grants and subsidies, Policy support, Strategic planning
2013	Biogas Power (off-grid) Programme	Institutional creation, Strategic planning
2014	Punjab Policy on Net-Metering for Grid Interactive Rooft-top Solar Photovoltaic Power Plants	Net metering, User charges
2014	DeenDayal Upadhyaya Gram Jyoti Yojana (DDUGJY) - rural electrification programme	Grants and subsidies
2014	Accelerated depreciation tax benefit	Tax relief
2014	Karnataka Solar Policy	User charges, Green certificates, Renewable energy target, Political & non-binding renewable energy target
2014	Uttar Pradesh renewable energy feed-in tariff	Feed-in tariffs or premiums
2014	National Biogas and Manure Management Programme	Grants and subsidies

2015	IntFinalizado Nationally Determined Contribution - INDC	Renewable energy target, Political & non-binding renewable energy target
2015	Rajasthan net- metering policy	User charges, Regulatory Instruments
2015	Andhra Pradesh Solar Power Policy	Fiscal or financial incentives, Feed-in tariffs or premiums, Policy support, Institutional creation
2015	Renewable Energy Target to 2022	Renewable energy target, Political & non-binding renewable energy target
2015	Zero Defect Zero Effect (ZED)	Grants and subsidies, Product standards, Endorsement label
2015	National Smart Grid Mission	Grid access and priority for renewables, Grants and subsidies, Professional training and qualification, Policy support
2015	Maharashtra Renewable Energy Policy	Tax relief, Strategic planning
2015	Facility for Low Carbon Technology Development (FLCTD)	Grants and subsidies, Research & Development and Deployment (RD&D)
2015	Gujarat Solar Power Policy	Net metering, Grants and subsidies, User charges, Green certificates, Strategic planning
2015	Tamil Nadu Incentive for Domestic Solar Rooftops	Grants and subsidies, User charges
2015	Maharashtra Comprehensive Policy for Grid- connected Power Projects based on New and Renewable (Nonconventional) Energy Sources	Strategic planning
2015	Andhra Pradesh Wind Power Policy	Tax relief, Institutional creation, Strategic planning
2015	Uttar Pradesh net- metering regulations for rooftop solar PV	Fiscal or financial incentives, Feed-in tariffs or premiums, User charges
2015	National Wind Mission	Renewable energy target
2015	National Policy on Biofuels	Strategic planning, Product standards, Monitoring
2015	National Renewable Energy Law	Strategic planning
2016	Gujarat Wind Power Policy	Green certificates, Strategic planning
2016	Uttar Pradesh Mini- Grid Policy	Grants and subsidies

2016	Gujarat Waste to Energy Policy	Direct investment, Fiscal or financial incentives, Tax relief, Strategic planning
2016	Ujwal Bharat	Infrastructure investments
2016	Grid Connected Solar Power Rooftop Program	Barrier removal, Fiscal or financial incentives, Grid access and priority for renewables
2016	Gujarat Small Hydro Policy	Fiscal or financial incentives, Strategic planning
2017	The Uttar Pradesh Solar Power Policy	Grants and subsidies, Strategic planning
2017	Auction of Solar Corporation (SECI)	Feed-in tariffs or premiums
2017	Three Year Action Agenda	Policy support, Strategic planning
2017	Onshore wind energy auction	Tendering schemes, Fiscal or financial incentives
2017	Pradhan Mantri Sahaj Bijili Har Ghar Yojana (Household electrification programme)	Grants and subsidies
2018	National Electricity Plan	Strategic planning, Renewable energy target, Political & non-binding renewable energy target, Research & Development and Deployment (RD&D)
2018	Long Term growth trajectory of Renewable Purchase Obligations (RPOs)	Obligation schemes, Fiscal or financial incentives
2018	Financial Assistance for Biomass-Based Cogeneration In Sugar Mills And Other Industries	Grants and subsidies
2018	National Wind-Solar Hybrid Policy	Infrastructure investments, Tendering schemes, Strategic planning
2019	Rajasthan Solar Energy Policy	Net metering, Fiscal or financial incentives, Feed-in tariffs or premiums, Grants and subsidies, Tax relief
2019	Energy Storage System Roadmap 2019-2032	Policy support, Strategic planning
2019	Rajasthan Wind and Hybrid Energy Policy	Fiscal or financial incentives, Feed-in tariffs or premiums
2019	Kisan Urja Suraksha evam Utthaan Mahabhiyan (KUSUM)	Target, Renewable energy target, Direct investment, Fiscal or financial incentives
2019	Proposed Methodology for Estimation of	Sectoral standards

	Electricity Generated from Biomass in Biomass Co-fired Thermal Power Plants	
2019	Renewable Energy Target for 2030	Target, Renewable energy target
2020	Railways on MISSION MODE of becoming a "Green Railway" by 2030 (Net Zero Carbon Emission)	GHG reduction target, Green certificates, Strategic planning, Infrastructure investments
2020	Rebates on coal extraction	Economic instruments, Fiscal or financial incentives, Market-based instruments
2020	Removal of mandatory requirement of coal washing	Sectoral standards, Regulatory Instruments
2021	COVID recovery package	Fiscal or financial incentives
2021	Renewable Energy Target for (Mission 500 GW) 2030	Target, Renewable energy target
2022	National Electricity Plan	Policy support, Strategic planning
2022	Long Term growth trajectory of Renewable Purchase Obligations (RPOs)	Obligation schemes, Fiscal or financial incentives
2022	Energy Storage Obligation	Regulatory Instruments, Obligation schemes
2023	Viability Gap Funding for development of Battery Energy Storage Systems (BESS)	Direct investment