



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS

Luana Silva de Souza

Energia renovável em ascensão: O impacto dos investimentos chineses no Brasil

Florianópolis
2025

Luana Silva de Souza

Energia renovável em ascensão: O impacto dos investimentos chineses no Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Relações Internacionais do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Relações Internacionais.

Orientador(a): Prof. Dr. Klaus Guimarães Dalgaard

Florianópolis

2025

Souza, Luana Silva

Energia renovável em ascensão: O impacto dos investimentos chineses no Brasil / Luana Silva Souza ; orientador, Klaus Guimarães Dalgaard, 2025.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Socioeconômico, Graduação em Relações Internacionais, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Relações Internacionais. 2. Energia renovável; China; Transição Energética. I. Dalgaard, Klaus Guimarães. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Relações Internacionais. III. Título.

Luana Silva de Souza

Energia renovável em ascensão: O impacto dos investimentos chineses no Brasil

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Relações Internacionais.

Florianópolis, 08 de dezembro de 2025.

Banca examinadora

Prof. Klaus Guimarães Dalgaard, Dr.
Orientador(a)

Prof.(a) Clarissa Franzoi Dri, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Ricardo Castelan, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025.

Dedico este trabalho à minha família e amigos, que com amor e presença transformaram cada desafio em caminho possível.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de muito esforço, e cada conquista aqui refletida também pertence às pessoas que me apoiaram ao longo dessa trajetória. Primeiramente, agradeço aos meus pais, Eliane e Clodoir, que sempre me deram tudo que estava ao alcance — e muitas vezes, até mais do que isso. Vocês me ensinaram tudo o que sei e fizeram de mim quem sou hoje, moldando meus valores, sonhos e, acima de tudo, a minha vontade de sempre buscar o melhor. Sem o apoio incondicional de vocês, nada disso seria possível.

Às minhas irmãs, Laura e Lais, minhas eternas amigas. Cada momento compartilhado, cada conversa e cada gesto de carinho são tesouros que levo comigo, vocês são parte essencial de quem eu sou. Aos meus tios, Elisângela e Adriano, que me acolheram enquanto estava longe de casa, deixo meu mais profundo agradecimento. Vocês estiveram ao meu lado em todas as fases dessa caminhada, oferecendo apoio e conforto. O suporte e o carinho de vocês foram fundamentais para eu chegar até aqui, e jamais esquecerei tudo que fizeram por mim.

Ao Gabriel, meu companheiro, que esteve ao meu lado em cada etapa dessa jornada, meu agradecimento especial. Obrigada por cada palavra de incentivo, por todo apoio e por sempre me lembrar de seguir em frente. Tua presença nessa caminhada foi fundamental, compartilhando conquistas, desafios e sonhos. Sou muito grata por tudo o que passamos juntos.

Meus agradecimentos aos meus amigos do Aprendizes-1— Andreia, Augusto, Diego e Eduarda — que foram minhas companhias inseparáveis em cada festa, aula e evento. Vocês tornaram essa jornada mais leve, divertida e inesquecível, e levo comigo cada momento que compartilhamos. À Juliana e ao Mike, que mesmo seguindo outros caminhos nunca deixaram de estar presentes, meu carinho e gratidão por manterem viva nossa amizade, pelas risadas e pelas histórias que sempre levaremos conosco. E à Gabriele e à Nathaly, que o estágio trouxe para minha vida, agradeço por tornarem esse período mais leve e por me lembrarem da importância de valorizar cada pequena conquista. A todos vocês, desejo levar essa amizade por toda a vida.

Por fim, agradeço aos professores e a toda a comunidade da UFSC, que dedicam seus esforços para transformar vidas por meio da educação. Sou profundamente grata pelas oportunidades, aprendizados e por cada experiência que contribuiu para o meu crescimento pessoal e acadêmico durante esta jornada.

RESUMO

Este estudo tem por objetivo analisar o impacto dos investimentos chineses em energias renováveis no Brasil, considerando suas dimensões econômicas, ambientais e geopolíticas. A pesquisa parte do reconhecimento de que a transição energética se tornou uma pauta central nas agendas internacionais, impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, a América Latina apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de fontes renováveis, especialmente a energia hidráulica, eólica e solar, e tem se destacado como uma das regiões mais atrativas para investimentos estrangeiros, sobretudo os provenientes da China. Adotando uma abordagem qualitativa e exploratória, baseada em revisão de literatura, o estudo investiga como os investimentos chineses têm contribuído para o fortalecimento da infraestrutura energética, a transferência de tecnologias e o avanço de políticas sustentáveis. Os resultados apontam que a atuação chinesa tem sido essencial para a ampliação da capacidade produtiva e para a diversificação da matriz energética latino-americana, além de favorecer o acesso a tecnologias limpas e promover o crescimento econômico regional. Entretanto, identificam-se também desafios importantes, como a dependência financeira e tecnológica dos países latino-americanos em relação à China e a necessidade de políticas públicas mais consistentes para garantir a sustentabilidade de longo prazo. Conclui-se que os investimentos chineses representam uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento sustentável regional, desde que acompanhados de regulação adequada, fortalecimento institucional e estratégias que assegurem maior autonomia energética e tecnológica aos países da América Latina.

Palavras-chave: China. Transição Energética. Energias Renováveis. Brasil. Investimentos.

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of Chinese investments in renewable energy in Brazil, considering their economic, environmental, and geopolitical dimensions. The research is based on the understanding that the energy transition has become a central issue on international agendas, driven by the need to reduce dependence on fossil fuels and mitigate the effects of climate change. In this context, Latin America presents great potential for the development of renewable sources—especially hydraulic, wind, and solar energy—and has stood out as one of the most attractive regions for foreign investments, particularly those from China. Adopting a qualitative and exploratory approach based on a literature review, the study investigates how Chinese investments have contributed to strengthening energy infrastructure, transferring technology, and advancing sustainable policies. The results indicate that Chinese involvement has been essential for expanding production capacity and diversifying Latin America's energy matrix, as well as promoting access to clean technologies and fostering regional economic growth. However, important challenges are also identified, such as the financial and technological dependence of Latin American countries on China and the need for more consistent public policies to ensure long-term sustainability. It is concluded that Chinese investments represent a strategic opportunity for regional sustainable development, provided they are accompanied by appropriate regulation, institutional strengthening, and strategies that guarantee greater energy and technological autonomy for Latin American countries.

Keywords: China. Energy Transition. Renewable Energy. Brazil. Investments.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
CMO	Custo Marginal de Operação
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETI	Índice de Transição Energética
GCOI	Grupo de Controle das Operações Integradas
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usinas Hidrelétrica
ZEEs	Zonas Econômicas Especiais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
2 ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO BRASILEIRA.....	14
2.1 ENERGIA HIDRÁULICA	14
2.2 ENERGIA EÓLICA	23
2.3 ENERGIA SOLAR	29
3 O PARADIGMA CHINÊS: ENTRE O CRESCIMENTO ECONÔMICO E A SUSTENTABILIDADE	35
4 CHINA E ENERGIAS RENOVÁVEIS: O CASO DA AMÉRICA LATINA	48
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	59

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a transição energética tem se tornado um dos temas centrais das agendas internacionais, impulsionada pela crescente preocupação com as mudanças climáticas, a escassez de recursos naturais e a necessidade de diversificação das matrizes energéticas. Nesse contexto, as energias renováveis surgem como alternativas estratégicas e sustentáveis para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais.

Assim, a América Latina, com seu vasto potencial em fontes como a solar, eólica e hidráulica, assume papel de destaque nesse cenário, sendo considerada uma das regiões mais promissoras para investimentos e desenvolvimento de tecnologias limpas.

Paralelamente, observa-se a intensificação da presença da China no setor energético latino-americano, tanto por meio de investimentos diretos quanto pela transferência de tecnologias e pela implementação de grandes projetos de infraestrutura. Essa relação Sino-Latino-americana reflete uma nova configuração geo-econômica global, em que o país asiático busca consolidar sua liderança mundial em energias renováveis e ampliar sua influência sobre economias emergentes.

Assim, a questão norteadora que orienta este estudo é: como os investimentos chineses em energias renováveis têm orientado dinâmicas de desenvolvimento sustentável e redefinido a matriz energética brasileira?

Como hipóteses, parte-se da premissa de que os investimentos chineses têm impulsionado a expansão das energias renováveis na América Latina como um todo, promovendo avanços tecnológicos e infraestrutura energética mais sustentável. Contudo, também se levanta a possibilidade de que tais investimentos possam reforçar dependências econômicas e tecnológicas, bem como gerar assimetrias nas relações bilaterais, o que exige uma análise crítica sobre os reais benefícios e desafios dessa cooperação.

Desse modo, a justificativa social do presente estudo está na relevância das energias renováveis como instrumento para o desenvolvimento sustentável, geração de empregos e redução das desigualdades socioeconômicas. Ao compreender o papel da China nesse processo, torna-se possível identificar oportunidades de fortalecimento das políticas energéticas nacionais e de promoção de um crescimento mais equilibrado e inclusivo na região latino-americana.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa contribui para o debate sobre as dinâmicas internacionais da transição energética e sobre o papel das potências emergentes na redefinição das relações econômicas globais. Ao analisar a interface entre economia, meio ambiente e política externa, este estudo amplia o diálogo interdisciplinar e fornece subsídios para futuras investigações no campo das relações internacionais e dos estudos energéticos.

Sob a perspectiva científica, a importância desta pesquisa reside na sistematização e análise crítica de dados e estudos recentes sobre os investimentos chineses em energias renováveis. Isso possibilita identificar padrões, estratégias e resultados concretos da presença chinesa na América Latina, contribuindo para o avanço do conhecimento e para o aperfeiçoamento das abordagens teóricas sobre cooperação Sul-Sul e sustentabilidade global.

Para tanto, metodologicamente, a presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa, fundamentada em revisão de literatura de caráter exploratório e descritivo. Foram consultadas publicações acadêmicas, relatórios de organizações internacionais, documentos oficiais e artigos especializados que abordam a temática das energias renováveis, os investimentos chineses e as políticas energéticas na América Latina.

Logo, o objetivo geral é analisar os investimentos chineses em energias renováveis na América Latina, em especial no Brasil. Como objetivos específicos, propõe-se: (1) contextualizar o desenvolvimento e a relevância das energias renováveis brasileiras, com ênfase nas modalidades hidráulica, eólica e solar; (2) examinar o paradigma chinês de desenvolvimento sustentável, analisando sua trajetória entre o avanço econômico e a busca por uma matriz energética limpa; e (3) investigar a atuação da China no setor de energias renováveis latino-americano, avaliando os impactos econômicos, ambientais e tecnológicos decorrentes dessa cooperação.

2 ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO BRASILEIRA

2.1 ENERGIA HIDRÁULICA

O modelo institucional do setor elétrico brasileiro passou por transformações significativas a partir da década de 1990, com duas reformas principais que redefiniram a estrutura e o funcionamento do sistema. A primeira ocorreu com a promulgação da Lei nº 9.427, de dezembro de 1996, que criou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e introduziu o regime de concessão via concorrência ou leilão para a exploração dos potenciais hidráulicos.

Essa medida iniciou o processo de privatização das companhias operadoras e determinou que o critério para a concessão fosse o maior valor ofertado pela outorga, assegurando maior transparência e competitividade ao setor (ANEEL, 2008). Já a segunda grande mudança foi implementada em 2004, com o lançamento do Novo Modelo do Setor Elétrico, cujo objetivo foi garantir a segurança do suprimento, a modicidade tarifária e a inclusão social, restabelecendo o papel do Estado no planejamento e na coordenação do setor (MME/EPE, 2007).

Uma das principais alterações promovidas pelo novo modelo foi a substituição do critério de outorga: passou a vencer os leilões o investidor que oferecesse o menor preço para a venda de energia gerada, buscando reduzir custos ao consumidor. Também foram instituídos dois ambientes de contratação — o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), voltado às distribuidoras, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), que abrange geradoras, comercializadoras, importadores, exportadores e consumidores livres.

A criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) foi outro marco, substituindo o Grupo de Controle das Operações Integradas (GCOI), antes subordinado à Eletrobrás. O ONS tornou-se responsável pela coordenação da operação das usinas e das redes de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizando ferramentas como o programa computacional Newave para definir cenários de oferta e preços de curto prazo, com base em dados de consumo e geração (ANEEL, 2008).

A integração do sistema elétrico nacional sob coordenação do ONS possibilitou trocas de energia entre regiões com diferentes regimes hidrológicos, tornando-se essencial em um país com forte dependência das hidrelétricas. Esse intercâmbio energético permite equilibrar o abastecimento entre regiões com períodos de seca e de chuva distintos, otimizando o uso dos reservatórios e

preservando o “estoque de energia” em forma de água. Além disso, o ONS avalia constantemente as variáveis de custo e disponibilidade para determinar o despacho das usinas, priorizando as hidrelétricas — de menor custo e maior disponibilidade — e acionando as termelétricas em situações de pico de demanda ou para garantir a segurança do sistema (MME/EPE, 2012).

O Mercado Atacadista de Energia (MAE), criado na década de 1990, foi substituído em 2004 pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), responsável pela liquidação financeira das operações de curto prazo e pela realização dos leilões de energia sob supervisão da ANEEL. Nesse mesmo ano, o Ministério de Minas e Energia (MME) criou a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com a missão de realizar estudos e planejamentos estratégicos para a expansão do sistema elétrico. O novo modelo manteve o mercado livre, que em 2008 correspondia a cerca de 30% da energia comercializada no país, e preservou as bases regulatórias da distribuição e transmissão, assegurando maior estabilidade e segurança ao sistema (ANEEL, 2008).

A comercialização de energia no Brasil ocorre tanto no ACR quanto no ACL. No ambiente regulado, as distribuidoras adquirem energia por meio de leilões realizados pela ANEEL e pela CCEE, sob coordenação do MME, com preços-teto definidos conforme a fonte de geração. Esses leilões, classificados em modalidades A-1, A-3 e A-5, indicam o prazo entre a data do leilão e o início da entrega de energia, permitindo previsibilidade ao mercado e modicidade tarifária. Já no ambiente livre, produtores independentes negociam diretamente com consumidores com demanda acima de 0,5 MW, mediadas por comercializadoras. As diferenças entre o volume contratado e o efetivamente entregue são ajustadas no mercado de curto prazo, com preços definidos pelo Newave (ANEEL, 2008).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) constitui a principal estrutura de geração e transmissão de energia elétrica no país, conectando as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Norte. O SIN permite o intercâmbio energético entre bacias hidrográficas com diferentes características, garantindo estabilidade e eficiência. Contudo, regiões como a Amazônia ainda possuem sistemas isolados, devido à complexidade geográfica que dificulta a construção de linhas de transmissão de longa distância (MME/EPE, 2012).

A rede básica de transmissão, composta por linhas de 230 kV a 750 kV, tem como função integrar as usinas aos centros de carga, promover a interligação entre regiões e assegurar a confiabilidade da rede elétrica nacional.

A distribuição de energia, por sua vez, é realizada por 63 concessionárias que atendem mais de 61 milhões de unidades consumidoras em todo o país. Essas empresas, públicas ou privadas, operam sob contratos de concessão regulados pela ANEEL, que fiscaliza tarifas, qualidade dos serviços e cumprimento de metas de eficiência energética e pesquisa e desenvolvimento (P&D). Entre 1998 e 2007, o setor destinou cerca de R\$ 1,3 bilhão a programas de P&D, evidenciando o compromisso com inovação e sustentabilidade (ANEEL, 2008).

Em relação à geração, dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL indicam que, em 2008, o Brasil possuía 1.768 usinas em operação, totalizando 104.816 MW de capacidade instalada, majoritariamente proveniente de usinas hidrelétricas. O país ainda apresentava 130 empreendimentos em construção e 469 outorgados, com previsão de acréscimo de 33,8 mil MW nos anos seguintes (ANEEL, 2008). As autorizações e fiscalizações de todas as etapas — desde o estudo de inventário até a operação — são de responsabilidade da ANEEL. As hidrelétricas exigem processos mais complexos, incluindo licenciamento ambiental e leilões públicos, como nos casos das usinas de Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira (MME/EPE, 2007).

O cenário nacional da geração hidrelétrica evidencia o papel estratégico do Brasil na matriz energética mundial. Entre 1974 e 2004, a potência instalada em hidrelétricas brasileiras aumentou em mais de 55 mil MW, consolidando o país como líder em energia limpa e renovável (IEA, 2005). Entretanto, desafios ambientais têm se intensificado, especialmente devido à localização de grande parte do potencial hidrelétrico em biomas sensíveis como Amazônia e Cerrado. O licenciamento ambiental tornou-se mais rigoroso e demorado, exigindo maior qualidade técnica e responsabilidade socioambiental nos projetos (MME/EPE, 2007).

Ainda assim, a expansão da geração hidráulica continua sendo essencial para o equilíbrio energético e para o desenvolvimento sustentável do país. O Plano Decenal de Expansão de Energia (MME/EPE, 2012) prevê um crescimento médio anual de 3.074 MW no SIN até 2021, com destaque para a ampliação na região Norte, cuja participação na capacidade instalada deve crescer de 10% para 24%. A integração energética com países vizinhos, como Peru, Bolívia e Argentina, também

é considerada estratégica, visando ao aproveitamento conjunto de potenciais hidrelétricos e ao fortalecimento da segurança energética regional.

A matriz energética mundial ainda é amplamente dominada por fontes não renováveis, como o carvão e os combustíveis fósseis, que representam os principais insumos para a geração de eletricidade (IAE, 2018). Essas fontes, além de finitas, são altamente poluentes, contribuindo significativamente para o aquecimento global e para a degradação ambiental. O aumento da conscientização ecológica e a busca por alternativas sustentáveis têm gerado debates globais sobre a necessidade de transição energética. Nesse contexto, o Brasil destaca-se por integrar um grupo seleto de países cuja matriz elétrica é predominantemente renovável, o que o coloca em posição de vantagem frente aos desafios ambientais do século XXI (Empresa de pesquisa energética, 2020).

Ademais, em 2020, a geração de energia elétrica no Brasil foi majoritariamente proveniente de fontes renováveis, sendo as hidrelétricas responsáveis por 63,8% da matriz. Outras fontes renováveis também tiveram participação relevante, como a energia eólica (9,3%), a biomassa e o biogás (8,9%) e a energia solar (1,4%) (Energia limpa, 2020). Essa predominância reflete a abundância de recursos hídricos disponíveis no território nacional e o investimento histórico em infraestrutura hidrelétrica, que, apesar dos impactos ambientais e sociais, continua sendo o pilar do sistema elétrico brasileiro.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) classifica as hidrelétricas brasileiras em três categorias principais: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Usinas Hidrelétricas (UHE). As CGHs possuem potência instalada igual ou inferior a 5.000 kW, enquanto as PCHs têm capacidade entre 5.000 kW e 30.000 kW e reservatórios de até 13 km², desde que não destinados à regularização do fluxo de água. Já as UHEs possuem potência superior a 30.000 kW, podendo chegar a centenas de megawatts, dependendo da concessão e do porte do empreendimento (ANEEL, 2020). Essa categorização permite uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e facilita a implementação de projetos de diferentes escalas.

Durante as décadas de 1970 e 1980, o parque elétrico brasileiro apresentava uma situação confortável de oferta de energia, o que levou algumas concessionárias a desativarem pequenas usinas, consideradas economicamente inviáveis frente às grandes hidrelétricas. Contudo, com o aumento expressivo da demanda nas

décadas seguintes, as PCHs voltaram a ganhar protagonismo, sendo vistas como alternativas estratégicas para diversificar a geração e garantir o equilíbrio do sistema elétrico nacional (Simone, 2013).

A geração de energia nas usinas hidrelétricas ocorre por meio da conversão da energia potencial da água em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Essa transformação é realizada em estruturas complexas compostas por reservatórios, barragens, canais adutores, casas de força, vertedouros e sistemas de distribuição (CCEE, 2020). A água armazenada no reservatório é conduzida por condutos forçados até a turbina, onde o movimento rotacional do eixo acoplado ao gerador transforma a energia hidráulica em eletricidade. Em seguida, essa energia é transmitida por linhas de alta tensão até os centros consumidores (Cemig, 2020).

A configuração estrutural das hidrelétricas varia conforme as condições geográficas e hidrológicas do local. A topografia determina a altura da queda d'água, enquanto a hidrologia define a vazão do rio, fatores que influenciam diretamente na potência e no tipo de turbina a ser utilizado (Brasil, 2007a). A potência gerada é proporcional ao produto da densidade da água, da aceleração da gravidade, da queda bruta e da vazão de projeto, além do rendimento global da instalação (Doland, 1954; Schreiber, 1978). Assim, o desempenho de uma hidrelétrica depende do equilíbrio entre essas variáveis e da eficiência dos equipamentos mecânicos e elétricos.

As turbinas hidráulicas são o coração das usinas hidrelétricas, responsáveis por converter a energia da água em movimento rotacional. Elas evoluíram significativamente desde o século XIX, com destaque para os tipos Pelton, Kaplan e Francis, amplamente utilizados em diferentes condições de queda e vazão (Barros, 2020; Schreiber, 1978). As turbinas do tipo Francis, desenvolvidas em 1848 pelo engenheiro James B. Francis, tornaram-se as mais comuns devido à sua eficiência e adaptabilidade. Elas operam com fluxo de entrada radial e saída axial, garantindo alta performance tanto em usinas de baixa quanto de alta queda (Ramos; Silva, 2009; Simone, 2013).

A versatilidade das turbinas Francis permite seu uso em projetos de pequeno e grande porte, como nas usinas de Paraúna e Itaipu. Enquanto a primeira possui turbinas com potência de 1 MW, a segunda opera com unidades de 715 MW, ambas utilizando o mesmo princípio de funcionamento, mas em escalas diferentes

(Carvalho, 1982; Itaipu, 2020). Essa flexibilidade explica sua ampla adoção em empreendimentos hidrelétricos ao redor do mundo.

Com o aumento da demanda energética e a diversificação dos projetos hidrelétricos, os rotores das turbinas Francis passaram por aperfeiçoamentos para manter o alto rendimento em diferentes condições operacionais. As modificações incluíram o aumento do diâmetro de saída para suportar maiores vazões e o aprofundamento das pás, adaptando-se a usinas com quedas mais baixas (Simone, 2013; Wang et al., 2012). Essa evolução tecnológica contribuiu para a eficiência hidráulica e para a estabilidade operacional das máquinas.

As turbinas Francis são classificadas conforme sua rotação específica, o que influencia no formato e na dimensão dos rotores. As versões lentas apresentam diâmetro de entrada maior que o de saída, enquanto as rápidas exibem o inverso, adequando-se às características hidráulicas de cada usina (Encinas, 1976; Schreiber, 1978; Macintyre, 1983). Essa variedade de configurações demonstra a capacidade de adaptação dessas turbinas às diferentes realidades geográficas e energéticas do país, consolidando-as como elementos fundamentais da matriz elétrica brasileira.

A energia hidráulica é uma das principais fontes renováveis de geração elétrica no mundo, caracterizando-se pelo aproveitamento da força da água em movimento para a produção de eletricidade. Esse tipo de energia baseia-se na transformação da energia potencial gravitacional da água em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica (ANEEL, 2023). Trata-se de um processo limpo, eficiente e amplamente utilizado em diversos países.

Historicamente, o uso da energia hidráulica antecede a era industrial. Moinhos de água eram utilizados para moer grãos e movimentar ferramentas desde a Idade Média. Com a Revolução Industrial, a aplicação dessa força natural evoluiu para a geração de energia elétrica, consolidando-se como um pilar do desenvolvimento econômico e tecnológico (Silva; souza, 2020).

O princípio básico do funcionamento de uma usina hidrelétrica consiste no aproveitamento da energia potencial da água represada. Ao ser liberada, a água passa por turbinas hidráulicas que acionam geradores, convertendo energia mecânica em elétrica (EPE, 2022). Esse sistema é eficiente e capaz de atender grandes demandas energéticas.

No Brasil, a energia hidráulica ocupa papel central na matriz elétrica nacional. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2024), cerca de 65% da eletricidade gerada no país provém de usinas hidrelétricas, evidenciando sua relevância estratégica para o abastecimento energético nacional.

Além de ser uma fonte renovável, a energia hidráulica contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), as hidrelétricas evitam a emissão de aproximadamente 3 bilhões de toneladas de CO₂ por ano em todo o planeta, contribuindo diretamente para o enfrentamento das mudanças climáticas.

Entretanto, a construção de grandes barragens provoca impactos socioambientais consideráveis. A formação de reservatórios pode levar ao alagamento de vastas áreas, deslocamento de populações ribeirinhas e perda de biodiversidade local (Carvalho; Lima, 2021). Esses fatores têm incentivado o desenvolvimento de tecnologias menos invasivas, como as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs).

As PCHs, com capacidade instalada de até 30 MW, representam uma alternativa sustentável às grandes usinas. Elas demandam menor área alagada e reduzem os impactos ambientais, tornando-se uma opção interessante para comunidades de médio porte (Braga; Fonseca, 2022). Essa tendência vem crescendo no Brasil e em outros países com potencial hídrico.

Outro avanço importante na área é a geração distribuída, que permite a descentralização da produção de energia elétrica. Essa modalidade possibilita que municípios e empresas aproveitem recursos hídricos locais para gerar sua própria energia, promovendo autonomia e eficiência (Santos; Oliveira, 2021).

O aspecto econômico da energia hidráulica também é relevante. Apesar do alto custo inicial para construção das usinas, o custo de operação e manutenção é relativamente baixo. Isso garante competitividade no longo prazo e estabilidade tarifária para o consumidor (EPE, 2022).

No contexto global, países como China, Canadá, Noruega e Brasil estão entre os maiores produtores de energia hidráulica. Juntos, respondem por mais de 50% da geração mundial proveniente dessa fonte, segundo a International Hydropower Association (IHA, 2024).

A eficiência das usinas hidrelétricas é outro ponto de destaque. Estudos indicam que a conversão energética das hidrelétricas pode ultrapassar 90%, valor

superior ao de outras fontes renováveis, como solar e eólica (ANEEL, 2023). Isso explica sua importância para garantir o suprimento energético em larga escala.

Apesar das vantagens, as hidrelétricas enfrentam desafios, especialmente em relação à variabilidade hídrica. O aquecimento global tem alterado os regimes de chuvas e reduzido a previsibilidade do volume de água nos rios, o que afeta diretamente a geração elétrica (Almeida; cordeiro, 2022).

Para mitigar esses efeitos, pesquisas vêm sendo direcionadas ao desenvolvimento de sistemas híbridos, que combinam energia hidráulica com outras fontes renováveis, como solar e eólica. Essa integração busca garantir estabilidade e diversificação da matriz energética (IEA, 2023).

Além do aspecto técnico, a energia hidráulica também possui um papel social importante. A instalação de usinas em regiões interioranas gera empregos, melhora a infraestrutura local e contribui para o desenvolvimento regional (Silva; costa, 2021).

Por outro lado, é essencial que as políticas públicas garantam a compensação ambiental e social adequada para as comunidades afetadas pelos empreendimentos. O cumprimento da legislação ambiental e a participação popular nos processos de licenciamento são fundamentais (Ibama, 2023).

A sustentabilidade das hidrelétricas depende, portanto, do equilíbrio entre produção energética e conservação ambiental. Isso envolve o uso de tecnologias modernas de monitoramento da fauna e flora, além da recuperação de áreas degradadas (Carvalho; lima, 2021).

Os impactos sobre os ecossistemas aquáticos também merecem destaque. A construção de barragens pode modificar o curso natural dos rios, afetando a migração de peixes e o transporte de sedimentos (EPE, 2022). Projetos de corredores ecológicos e escadas para peixes vêm sendo implementados para minimizar esses efeitos.

Além das hidrelétricas convencionais, existe o aproveitamento da energia das marés e das ondas, conhecidas como hidrelétricas oceânicas. Essas tecnologias emergentes têm potencial de gerar energia limpa em larga escala, especialmente em países com extensas faixas litorâneas (IEA, 2023).

O Brasil possui um potencial ainda pouco explorado nesse campo. Estudos indicam que a costa brasileira poderia gerar até 20 GW de energia a partir das

marés e correntes marítimas, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica (EPE, 2022).

O futuro da energia hidráulica também está relacionado à digitalização e automação. O uso de sensores inteligentes e sistemas de controle remoto vem aumentando a eficiência operacional das usinas e reduzindo custos de manutenção (Braga; fonseca, 2022).

O reaproveitamento de antigas usinas desativadas, a modernização de estruturas antigas pode aumentar a capacidade de geração sem a necessidade de novos impactos ambientais (Santos; oliveira, 2021).

A educação ambiental também tem papel fundamental nesse processo. A conscientização da população sobre o uso racional da água e a importância das fontes renováveis fortalece a aceitação social dos projetos hidrelétricos (Carvalho; lima, 2021).

Em termos estratégicos, a energia hidráulica representa segurança energética e soberania nacional. Por ser uma fonte interna e renovável, reduz a dependência de combustíveis fósseis e de importações de energia (MME, 2024).

A participação do setor privado e o incentivo à pesquisa e inovação tecnológica são essenciais para o fortalecimento do setor. Políticas de financiamento e incentivos fiscais podem impulsionar o desenvolvimento de novos projetos sustentáveis (ANEEL, 2023).

Além disso, a integração regional da América do Sul tem favorecido o intercâmbio de energia entre países vizinhos. Projetos como o Sistema Interligado Nacional (SIN) permitem trocas de eletricidade entre regiões com diferentes regimes hídricos (EPE, 2022).

A resiliência do setor hidrelétrico dependerá da capacidade de adaptação às mudanças climáticas e da gestão inteligente dos recursos hídricos. Isso exige planejamento estratégico e cooperação entre órgãos governamentais e empresas concessionárias (Almeida; Cordeiro, 2022).

A energia hidráulica continua sendo uma das principais soluções para o fornecimento de eletricidade limpa e estável. Com o avanço das tecnologias e a implementação de práticas sustentáveis, essa fonte tende a manter sua importância na transição energética global (IHA, 2024).

2.2 ENERGIA EÓLICA

As discussões sobre energia, especialmente no campo da economia, intensificaram-se após a crise do petróleo de 1973, quando o tema passou a ser tratado com maior urgência em razão da vulnerabilidade dos países dependentes de combustíveis fósseis. No entanto, desde o século XIX já havia reflexões relevantes sobre o esgotamento dos recursos naturais. Um dos pioneiros nesse debate foi William Jevons, que em sua obra *The Coal Question* (1866) demonstrou preocupação com a exaustão do carvão mineral e suas implicações econômicas.

Posteriormente, Hotelling (1931) elaborou um modelo teórico fundamental para a economia dos recursos esgotáveis, conhecido como a “Regra de Hotelling”. Essa regra estabelece que o preço de um recurso não renovável tende a crescer à taxa de juros, pois, caso cresça mais lentamente, seria mais vantajoso investir em aplicações financeiras; e, caso cresça mais rapidamente, a exploração do recurso se tornaria mais rentável. Assim, a taxa de extração se ajusta até que o aumento de preço se iguale à taxa de juros, estabelecendo o equilíbrio econômico do mercado (William, 2004).

A economia da energia, portanto, consolidou-se como um campo multidisciplinar que aplica princípios da teoria econômica para solucionar questões relacionadas à oferta, demanda, políticas energéticas e impactos ambientais. Worthy (2011) destaca que este ramo busca compreender a interação entre os mercados de energia e outras dimensões, como o meio ambiente e as finanças, permitindo a formulação de políticas que promovam eficiência e sustentabilidade.

No contexto brasileiro, a matriz energética é predominantemente hidrelétrica, devido à ampla disponibilidade de recursos hídricos. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2010), a capacidade instalada do país era de aproximadamente 109.245,6 MW, sendo 72,5% provenientes de fontes hídricas, seguidas pelas térmicas e por pequenas participações de fontes alternativas, como a eólica e a biomassa. A tendência, contudo, é de redução gradual da dependência hídrica e crescimento das energias renováveis, especialmente da eólica (IPEA, 2011).

O avanço da energia eólica no Brasil é resultado direto de políticas de incentivo e da ampliação dos leilões promovidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Em 2010, havia 45 usinas eólicas em operação, com capacidade de 794,3

MW, e a previsão era de expansão para mais de 2.000 MW com a construção de novas usinas (IPEA, 2011). Apesar desse progresso, a participação da energia solar ainda era quase insignificante na matriz elétrica brasileira, representando menos de 0,1%, devido ao elevado custo de implantação e ao estágio incipiente de desenvolvimento tecnológico (Cavaliere, 2005). No entanto, ao se considerarem os custos ambientais das fontes convencionais, as fontes renováveis se mostram mais vantajosas, reforçando a importância de políticas públicas voltadas para sua expansão (IPEA, 2011).

Em relação ao consumo energético, observa-se crescimento contínuo no país, impulsionado pelo aumento da renda e pela expansão de setores intensivos em energia. O consumo industrial e de transportes responde pela maior parte da demanda, com o transporte rodoviário representando 92% do consumo do setor (MME, 2007). Já no setor residencial, o aumento do consumo está associado à eletrificação rural e ao maior acesso das famílias a equipamentos eletrodomésticos, fenômeno acompanhado por políticas de eficiência energética e redução de desperdícios (IPEA, 2011).

Do ponto de vista regulatório, o mercado energético brasileiro passou por profundas transformações desde a década de 1990. A Lei nº 9.074/1995 instituiu a figura do consumidor livre de energia elétrica, permitindo maior flexibilidade na contratação.

Posteriormente, a Lei nº 9.648/1998 consolidou a negociação livre entre concessionários e autorizados, promovendo a desverticalização do setor e a criação de instituições fundamentais, como a ANEEL, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE). Entre 2003 e 2004, o novo modelo do setor elétrico, definido pelas Leis nº 10.847 e nº 10.848, criou a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que estruturaram os ambientes de contratação regulada e livre (CELESC, 2012).

No tocante à formação de preços, o mercado de energia elétrica brasileiro utiliza modelos de otimização estocástica, como o Newave e o Decomp, responsáveis por calcular o Custo Marginal de Operação (CMO), que define o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). Esse preço é ajustado semanalmente de acordo com a demanda, o nível dos reservatórios e as restrições do sistema,

refletindo a complexa interação entre custos presentes e futuros de geração (ANEEL, 2012; Barroso, 2010).

Historicamente, a energia eólica teve origem na Antiguidade, com registros de uso na Pérsia por volta de 200 a.C. para moagem e bombeamento de água (CEPEL, 2008). No século XIX, o engenheiro Charles Brush construiu o primeiro catavento para geração elétrica, com capacidade de 12 kW (Shepherd, 1994). Durante a Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento de aerogeradores de grande porte ganhou força, especialmente nos Estados Unidos e na Alemanha, impulsionado pela necessidade de economia de combustíveis fósseis (Putnam, 1948; Hütter, 1973). Nas décadas seguintes, o avanço tecnológico das turbinas eólicas e o apoio de políticas públicas consolidaram a energia dos ventos como uma das principais alternativas renováveis (CEPEL, 2008; Salino, 2011).

Atualmente, as pesquisas se concentram no aprimoramento de materiais e na eficiência aerodinâmica das turbinas. Estudos como os de Brøndsted et al. (2005) e Johansen et al. (2008) exploram o uso de materiais compósitos e modificações estruturais que aumentam a durabilidade e o desempenho das pás. No Brasil, instituições como a Universidade de Brasília (UnB) têm desenvolvido metodologias para avaliar a eficiência de pequenas turbomáquinas (Júnior, 2005), enquanto centros internacionais como a Universidade Técnica da Dinamarca e o Instituto de Pesquisas em Energia Eólica de Delft aprimoram modelos aerodinâmicos e sistemas de controle (Sørensen, 2011; Rooij et al., 2001).

O Brasil se destacou como pioneiro na América Latina ao instalar o primeiro aerogerador no início da década de 1990, marcando o início da exploração da energia eólica em território nacional. O primeiro parque eólico brasileiro foi construído no arquipélago de Fernando de Noronha, resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), contando com financiamento do instituto dinamarquês Folkecenter, especializado em pesquisas sobre energias renováveis (Simas, 2012).

Apesar desse avanço inicial, até o ano de 2001 houve pouco progresso na consolidação da energia eólica como alternativa significativa de geração elétrica, devido, em grande parte, à ausência de políticas públicas de incentivo e ao elevado custo tecnológico dos equipamentos utilizados naquele período (Simas, 2012).

A publicação do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro em 2001 representou um marco fundamental para o setor, pois possibilitou a estimativa do potencial eólico

tecnicamente aproveitável no país. A partir desse estudo, novos investimentos, políticas e interesses começaram a ser direcionados para o desenvolvimento dessa fonte de energia, ampliando as possibilidades de diversificação da matriz elétrica brasileira (Simas, 2012).

Esse movimento foi fortemente impulsionado pela crise energética ocorrida entre 2001 e 2002, quando o racionamento de energia resultou da redução drástica nos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Diante dessa situação, emergiu a necessidade de diversificar as fontes de geração, e a energia eólica passou a ser considerada uma alternativa estratégica e sustentável. Nesse contexto, foi criado, pela Resolução nº 24 de 5 de julho de 2001, o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), com o intuito de estimular a implantação de novos parques eólicos no país (Brasil, 2001).

O PROEÓLICA foi o primeiro programa nacional de incentivo à geração eólica, tendo como meta contratar 1.050 MW de projetos integrados ao Sistema Interligado Nacional até o final de 2003. Além de estimular a expansão dessa fonte de energia, o programa também buscava promover a complementaridade sazonal entre as fontes hidrelétrica e eólica, de modo a garantir maior segurança energética e contribuir para o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país (Brasil, 2001; Simas, 2012).

No entanto, apesar da alta demanda por concessões e do interesse do setor privado, o programa não alcançou todos os seus objetivos, principalmente em razão do curto prazo de execução dos projetos, estabelecido em apenas dois anos (Simas, 2012).

Parte dos projetos inicialmente previstos no PROEÓLICA foi posteriormente incorporada ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído pela Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002 e regulamentado pelo Decreto nº 5.025 de 30 de março de 2004. O PROINFA representou um marco importante na consolidação das energias renováveis no Brasil, pois contribuiu para a ampliação da geração eólica, o fortalecimento da cadeia produtiva e a redução da dependência de fontes convencionais, como a hidrelétrica e a termelétrica (Simas, 2012).

A partir de 2011, o cenário da energia eólica no país passou por um período de significativa expansão, marcado por grande volume de capacidade contratada e expressiva redução nos custos de produção. Esse ano foi considerado decisivo para

o setor, em virtude do aumento das contratações, da diversificação de empresas atuantes, da queda dos preços e da ampliação dos debates sobre a tecnologia e seus impactos no sistema elétrico nacional (Simas, 2012).

O fortalecimento da presença da energia eólica nos planos de médio prazo, a realização de leilões contínuos e o ingresso do Brasil entre os dez principais mercados mundiais de energia eólica consolidaram o papel estratégico dessa fonte na matriz energética nacional (Simas, 2012).

Assim, a energia eólica é vista como uma das mais promissoras alternativas para o desenvolvimento sustentável, sendo capaz de aliar baixo impacto ambiental, eficiência energética e geração de empregos. A manutenção de preços competitivos e a ampliação da participação dessa fonte no mercado brasileiro, contudo, dependem diretamente da consolidação da indústria nacional e da continuidade de políticas públicas voltadas ao setor (SIMAS, 2012).

No cenário regional, o Estado do Ceará se destaca como uma das áreas de maior potencial eólico do país. Localizado na região Nordeste, o estado limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com Pernambuco, a leste com o Rio Grande do Norte e a Paraíba, e a oeste com o Piauí. O Ceará possui uma área de 148.825,6 km², o que representa 9,57% da área total da região Nordeste e 1,74% do território nacional, sendo o quarto maior estado nordestino e o 17º em extensão territorial (IPECE, 2014).

A divisão político-administrativa do Ceará compreende 184 municípios, distribuídos conforme diferentes regionalizações. De acordo com a Secretaria do Planejamento e Gestão (SEPLAG), o estado está organizado em oito macrorregiões de planejamento, duas regiões metropolitanas e dezoito microrregiões administrativas. Já o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) adota uma regionalização baseada em sete mesorregiões e trinta e três microrregiões geográficas, considerando aspectos físicos, geográficos e produtivos (IPECE, 2014).

No que diz respeito às fontes primárias de energia, o Ceará não dispõe de reservas expressivas de petróleo, gás natural, carvão mineral ou grandes recursos hídricos, tampouco de centros de transformação, como refinarias e plantas de gás natural. Mesmo assim, o estado apresenta grande potencial nas fontes renováveis, especialmente na solar e na eólica (Guimarães Neto; vieira, 2009).

Segundo os autores, o Ceará é considerado uma das melhores regiões do mundo para o aproveitamento dos ventos alísios, não apenas devido à sua

localização geográfica favorável, mas também em virtude da crescente demanda energética impulsionada pelo desenvolvimento econômico regional (Macêdo júnior et al., 2010).

O primeiro parque eólico do estado foi inaugurado em 2000, no bairro Mucuripe, em Fortaleza, fruto de uma parceria entre a Companhia Energética do Ceará (COELCE), a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), o Governo da Alemanha e a Secretaria de Infraestrutura do Ceará (SEINFRA). Posteriormente, foram construídos os parques eólicos de Taíba e Prainha, totalizando uma capacidade de geração média de 17,4 MW, ainda pequena diante do consumo estadual, estimado em cerca de 1.200 MW (Grangeiro, 2012).

Com o objetivo de ampliar sua produção energética, o governo estadual, por meio da COELCE, realizou estudos para a implantação de novas usinas eólicas nos municípios de Paracuru e Camocim, cada uma com potência prevista de 30 MW (Grangeiro, 2012). O avanço do setor se intensificou a partir de 2009, quando o governo federal instituiu leilões periódicos para contratação de energias alternativas, entre elas a eólica, com base na oferta do menor preço tarifário. Com essa política, o Ceará passou a contar com mais de 21 projetos contratados, totalizando cerca de 541 MW de potência média até o final daquele ano (Grangeiro, 2012; ADECE, 2014).

Apesar do progresso, ainda existem desafios significativos para o pleno desenvolvimento da energia eólica no estado. Entre os principais obstáculos estão a falta de políticas claras para o licenciamento ambiental, a ausência de regulamentações específicas, os elevados custos de conexão com o sistema elétrico e a instabilidade regulatória, que gera insegurança jurídica para os investidores (Guimarães Neto; Vieira, 2009).

Diante desse contexto, torna-se evidente a necessidade de se estabelecer um procedimento uniforme e transparente para o licenciamento ambiental dos empreendimentos eólicos, garantindo segurança econômica, social e ambiental tanto para os investidores quanto para a coletividade. A publicação da Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014, representou um avanço importante ao propor a padronização dos processos de licenciamento ambiental para parques eólicos em todo o país (Brasil, 2014). Espera-se que sua aplicação efetiva, especialmente no Ceará, contribua para o equilíbrio entre o crescimento econômico

e a preservação ambiental, consolidando o estado como referência nacional na produção de energia limpa e sustentável.

2.3 ENERGIA SOLAR

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954, marcando um importante avanço no aproveitamento da energia solar. Com apenas dois centímetros quadrados de área, ela atingia uma eficiência de 6%, gerando 5 mW de potência elétrica. Cinquenta anos depois, em 2004, a indústria já produzia cerca de um bilhão de células solares, com eficiência aproximada de 16%, ultrapassando pela primeira vez a marca de 1 GW de potência elétrica instalada anualmente (Vallêra, 2006).

O fenômeno físico que permite a conversão direta da luz solar em eletricidade, conhecido como efeito fotovoltaico, foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel, que identificou uma variação de potencial elétrico em placas metálicas, de platina ou prata, imersas em uma solução eletrolítica e expostas à luz (Mekhilef et al., 2012).

Posteriormente, em 1877, os inventores norte-americanos W. G. Adams e R. E. Day utilizaram o selênio, um material com propriedades fotocondutoras, para desenvolver o primeiro dispositivo sólido capaz de gerar eletricidade a partir da exposição à luz (Vieira, 2013). Segundo Brito et al. (2006), esse dispositivo consistia em um filme de selênio depositado sobre uma base de ferro, recoberto por uma camada semitransparente de ouro, que servia como contato frontal. Apesar da baixa eficiência — em torno de 0,5% —, esse tipo de célula foi utilizado no final do século XIX pelo engenheiro alemão Werner Siemens como fotômetro em máquinas fotográficas.

A consolidação da energia solar fotovoltaica, entretanto, só ocorreu com os avanços científicos do início do século XX. As descobertas de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico, em 1905, somadas ao desenvolvimento da mecânica quântica, da teoria das bandas de energia e da física dos semicondutores, permitiram compreender os fundamentos teóricos necessários para o aprimoramento das células solares (BRITO et al., 2006). Além disso, o surgimento do transistor de silício e o domínio das técnicas de purificação e dopagem foram essenciais para transformar a energia solar em uma alternativa real para a geração elétrica.

De acordo com Da Silva Júnior (2008), a exploração intensa das reservas de combustíveis fósseis e os impactos ambientais decorrentes de seu uso criaram um cenário preocupante para o futuro energético global. Nesse contexto, a busca por fontes renováveis e limpas, como a energia solar, tornou-se uma necessidade estratégica para garantir a sustentabilidade do planeta. Barbosa (2015) complementa que o desenvolvimento das energias renováveis enfrenta obstáculos significativos, como a ausência de políticas públicas adequadas, barreiras regulatórias e altos custos iniciais de implantação.

Esses desafios, segundo Barbosa (2015), assumem diferentes naturezas — técnicas, econômicas, educacionais e culturais — e variam conforme as condições de cada país. Ainda assim, a exploração da energia solar se mostra tecnicamente e economicamente viável, especialmente em regiões com altos índices de irradiação solar. Pereira (2006) afirma que, embora o custo da energia solar tenha sido um dos principais entraves à sua popularização, os avanços tecnológicos permitiram uma queda expressiva nos preços, estimando-se, à época, uma redução de até seis vezes no valor do quilowatt-hora produzido por essa fonte até 2015.

Apesar dos progressos, a energia solar ainda enfrenta dois grandes desafios: a intermitência, por depender do ciclo diurno e das variações de insolação causadas por nuvens, e o baixo rendimento energético por unidade de área (Pereira, 2006). Esses fatores reforçam a necessidade de pesquisas contínuas em tecnologias de armazenamento e aumento da eficiência das células fotovoltaicas.

O relato histórico da primeira célula solar moderna teve início em março de 1953, quando o químico Calvin Fuller, dos Bell Laboratories, em Murray Hill, Nova Jersey (EUA), desenvolveu um processo de difusão que introduzia impurezas em cristais de silício, controlando suas propriedades elétricas, técnica conhecida como dopagem (Pereira, 2006). Fuller produziu uma barra de silício dopada com gálio, o que a tornou condutora e caracterizou-a como silício do “tipo p”, devido à predominância de cargas positivas.

Seguindo as orientações de Fuller, o físico Gerald Pearson mergulhou a barra de silício dopada em um banho de lítio, criando na superfície uma camada com excesso de elétrons, caracterizada como silício do “tipo n”. No ponto de contato entre essas duas regiões, formou-se uma junção p-n, geradora de um campo elétrico permanente (Vallêra, 2006). Ao realizar testes elétricos, Pearson observou

que a amostra produzia corrente quando exposta à luz, o que evidenciou o funcionamento do primeiro dispositivo de conversão fotovoltaica em silício.

O episódio ficou marcado como o nascimento da célula solar de silício, base tecnológica de praticamente todas as células fotovoltaicas modernas. De acordo com Vallêra et al. (2006), Pearson ficou surpreso com o resultado e chamou o colega Morton Prince para verificar as medições, registrando o feito em seu caderno de laboratório. Esse experimento foi um divisor de águas na história da energia solar, abrindo caminho para a criação de uma nova indústria energética sustentável.

A partir dessa descoberta, os Bell Laboratories lançaram em 1954 a primeira célula solar comercialmente viável, capaz de converter a luz solar em eletricidade com eficiência de 6%. Embora cara e limitada em potência, essa inovação foi o ponto de partida para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica como a conhecemos hoje (Vallêra, 2006).

A primeira geração de tecnologias fotovoltaicas é composta por células de silício cristalino, conhecidas como junção única, e representa o marco inicial da produção moderna de energia solar (Gonçalves, 2014). Essas células apresentam alta eficiência de conversão energética, embora o processo de purificação do silício envolva custos elevados, o que limita a competitividade econômica dessa tecnologia. Mesmo com essa limitação, trata-se da tecnologia mais consolidada no mercado global, respondendo por cerca de 85% a 90% da produção anual, com estimativas de manter entre 50% e 60% de participação até 2020 (IEA, 2010).

Os principais desafios para o avanço das tecnologias de primeira geração concentram-se no aumento da eficiência e redução de custos, por meio do aprimoramento do design das células, diminuição do uso de materiais e maior autonomia na produção (IEA, 2010). O silício, principal matéria-prima dessas células, é extraído de fontes abundantes como areia e quartzo, além de ser não tóxico e ambientalmente seguro, o que torna essa geração uma alternativa tecnológica madura e consolidada (Lossio, 2015).

Entre as variações dessa geração, destacam-se o silício monocristalino, o policristalino e o tipo string ribbon. A principal diferença entre eles está na estrutura dos cristais: o silício monocristalino possui uma estrutura ordenada e uniforme, enquanto o policristalino apresenta cristais desordenados (Epia & greenpeace, 2011). Essa diferença estrutural impacta diretamente o rendimento das células.

O silício monocristalino oferece as maiores eficiências comerciais, variando entre 16% e 24%, enquanto o silício policristalino apresenta resultados ligeiramente inferiores, entre 14% e 17% (IEA, 2013). Segundo Pacheco (2014), embora o policristalino tenha custos de produção menores, sua eficiência energética também é reduzida, tornando-o mais adequado a aplicações de médio custo e larga escala.

O silício tipo string ribbon apresenta eficiência média de 18% e é caracterizado pelo crescimento controlado dos lingotes e pelo uso de lasers para o corte vertical dos wafers, eliminando etapas como o serramento e o ataque químico, o que reduz significativamente os custos de produção (EPIA & Greenpeace, 2011).

A segunda geração de tecnologias fotovoltaicas, conhecida como película fina (thin films), surgiu com o objetivo de diminuir o consumo de silício e explorar novos materiais semicondutores com desempenho semelhante (Gonçalves, 2014). Embora apresente eficiência menor em comparação às células cristalinas, sua produção é mais barata e o processo de fabricação mais simples (Pacheco, 2014).

Essas células são compostas por uma camada ultrafina de material fotossensível aplicada sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico, o que as torna mais leves e ideais para integração arquitetônica em fachadas e telhados (EPIA & Greenpeace, 2011; Proença et al., 2007).

A segunda geração inclui três tipos principais: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e compostos de cobre, índio, selênio e gálio (CIS/CIGS) (IEA, 2010). O silício amorfo foi o primeiro tipo de película fina desenvolvido, apresentando estrutura não cristalina, com defeitos estruturais que são minimizados por meio da hidrogenação (Gonçalves, 2014).

Esse tipo de célula tem alta capacidade de absorção de radiação, sendo cerca de 40 vezes mais eficiente na absorção de luz do que as estruturas de silício cristalino, além de apresentar melhor desempenho sob radiação difusa e em condições meteorológicas adversas (Gonçalves, 2014). Comercialmente, suas eficiências giram em torno de 7%, podendo atingir até 13% em ambiente laboratorial (IEA, 2013; Castro, 2011).

Por causa do baixo custo de produção, as células de silício amorfo são amplamente utilizadas em dispositivos de pequeno porte, como calculadoras e relógios solares (EPIA & Greenpeace, 2011).

Outra tecnologia importante dessa geração é o telureto de cádmio (CdTe), um semicondutor resultante da combinação de cádmio e telúrio. A empresa First Solar,

dos Estados Unidos, foi pioneira na fabricação em larga escala dessa tecnologia, que é considerada a película fina mais barata, devido ao seu baixo consumo energético no processo produtivo (Firstsolar, 2013).

As células de CdTe apresentam excelente resposta à radiação solar e menores perdas de eficiência com variações de temperatura, atingindo rendimentos médios de 12% (Firstsolar, 2013). Os semicondutores CIS e CIGS, compostos por cobre, índio, selênio e gálio, também se destacam por sua alta eficiência laboratorial, podendo alcançar até 20%, embora o processo de fabricação seja complexo e de alto custo (IEA, 2013).

De acordo com a IEA (2013), a eficiência comercial das células CIS/CIGS varia entre 12% e 14%, mas as preocupações ambientais relacionadas à toxicidade de alguns elementos e à disponibilidade limitada de recursos minerais representam desafios à sua expansão no mercado global.

A terceira geração de tecnologias fotovoltaicas busca combinar o baixo custo de produção das películas finas com as altas eficiências das células cristalinas (Pacheco, 2014). Essa categoria abrange diversas inovações, incluindo células híbridas, multijunções e materiais emergentes, que exploram novos princípios de absorção de luz e condução elétrica.

As células híbridas resultam da combinação entre silício cristalino e filmes finos, enquanto as tecnologias de múltiplas junções permitem o aproveitamento de diferentes faixas do espectro solar, aumentando a eficiência global (Pacheco, 2014). De acordo com Bittencourt (2014), essa geração representa uma aposta na construção sustentável, com o desenvolvimento de tintas, telhas, vidros e azulejos fotovoltaicos, capazes de gerar eletricidade de forma integrada às edificações.

As células solares orgânicas (OPV), pertencentes a essa categoria, apresentam eficiências laboratoriais entre 8% e 12%, embora as comerciais ainda variem de 4% a 5% (EPIA & Greenpeace, 2011). Apesar da baixa eficiência, são leves, flexíveis e de baixo custo, o que favorece sua aplicação em produtos inovadores e portáteis.

Essas células podem ser totalmente orgânicas ou híbridas, conhecidas como dye-sensitized (DS), que utilizam pigmentos sensíveis à luz para converter energia solar em elétrica. Conforme Toyama et al. (2015), os painéis fotovoltaicos orgânicos são tão finos quanto papel e flexíveis como plástico, revestidos por uma tinta orgânica que reage à luz solar para gerar eletricidade.

O diferencial dessas tecnologias está na redução do peso, espessura e custo, quando comparadas às tradicionais de silício (Toyama et al., 2015). Além disso, são ideais para aplicações urbanas, pois podem ser instaladas em superfícies curvas e móveis. Outra tecnologia avançada da terceira geração é o arseneto de gálio (GaAs), um semicondutor do tipo III-V, com estrutura semelhante à do silício e uso frequente de substrato de germânio. Esse material apresenta altíssima eficiência e é amplamente empregado em satélites e sistemas espaciais (Proença et al., 2007).

O arseneto de gálio pode atingir eficiências laboratoriais superiores a 40%, especialmente quando combinado com elementos como alumínio, índio, fósforo e antimônio, formando multijunções altamente eficientes (Proença et al., 2007).

Os concentradores fotovoltaicos (CPV) também fazem parte dessa geração e se destacam pelo uso de dispositivos ópticos, como lentes e espelhos, que focalizam a radiação solar em pequenas áreas de células de alta eficiência. As células utilizadas nos CPVs podem ser de silício, com eficiência entre 20% e 25%, ou compostos III-V, com eficiência entre 25% e 30% (Bonito, 2011). Essas tecnologias exigem sistemas de rastreamento solar (tracking), que mantêm as lentes alinhadas à luz durante o dia. Assim, existem três tipos principais de CPV, classificados de acordo com a taxa de concentração da radiação solar, medida em “suns”, que representa o número de vezes que a luz é concentrada sobre a célula (Bittencourt, 2014).

3 O PARADIGMA CHINÊS: ENTRE O CRESCIMENTO ECONÔMICO E A SUSTENTABILIDADE

A República Popular da China, com capital em Pequim, é o maior país da Ásia Oriental e detém a maior população do planeta, com mais de 1,36 bilhão de habitantes, o que representa cerca de um quinto da população mundial. Estruturada como uma república socialista governada pelo Partido Comunista Chinês (PCC), a China administra vinte e três províncias, cinco regiões autônomas — Xinjiang, Mongólia Interior, Tibete, Ningxia e Guangxi —, quatro municípios — Pequim, Tianjin, Xangai e Chongqing —, além de duas Regiões Administrativas Especiais com ampla autonomia: Hong Kong e Macau. Atualmente, o país é reconhecido como um dos polos econômicos mais importantes da Ásia e do mundo (Spence, 2011).

Desde a fundação da República Popular da China, em 1949, o país adotou o comunismo e implementou um modelo de economia centralmente planejada, que, nas quase três décadas seguintes, apresentou pouco crescimento econômico. Essa realidade mudou radicalmente em 1978, com as reformas econômicas lideradas por Deng Xiaoping, que abriram o país ao mercado e impulsionaram um rápido processo de industrialização e crescimento (Spence, 2011).

Com o avanço industrial e econômico, a China passou a ter um papel central nas discussões sobre sustentabilidade global, sobretudo devido ao seu impacto ambiental e à utilização intensiva de recursos naturais. Segundo a Netherlands Environmental Assessment Agency (NEAA, 2007), o país se tornou o maior emissor mundial de dióxido de carbono (CO₂) oriundo da queima de combustíveis fósseis, ultrapassando os Estados Unidos em 2007. Essa condição trouxe atenção internacional, uma vez que as emissões chinesas de gases de efeito estufa têm contribuído significativamente para o aquecimento global, ampliando os desafios ambientais globais.

Os problemas ambientais enfrentados pela China derivam, em grande parte, de seu modelo de crescimento acelerado, baseado na queima de carvão e em práticas industriais intensivas. Entre os principais impactos estão a poluição atmosférica, responsável por episódios de chuva ácida; a escassez e poluição de recursos hídricos; a degradação e erosão do solo; o desmatamento e a desertificação; e a perda de biodiversidade. De acordo com a CIA World Factbook

(2014), o país perdeu cerca de um quinto de suas terras agrícolas desde 1949, em razão da exploração econômica descontrolada e da erosão.

O crescimento econômico chinês, impulsionado desde a década de 1980, gerou uma demanda energética sem precedentes, tornando o país o maior consumidor mundial de energia. O setor industrial é responsável por cerca de 70% do consumo total, abrangendo atividades como geração elétrica, siderurgia, metalurgia, construção civil e produção química (NEAA, 2007). Essa expansão exigiu a criação de políticas para atrair investimentos estrangeiros, promover reformas estruturais e descentralizar o setor energético.

A matriz energética chinesa ainda é predominantemente baseada em combustíveis fósseis. Em 2010, cerca de 79% da eletricidade gerada no país vinha de usinas a carvão, o que representava uma das maiores taxas mundiais (IEA, 2010). Apesar disso, a China tem buscado diversificar suas fontes energéticas, investindo em energia nuclear e, principalmente, em fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica e solar.

De acordo com o Power Reactor Information System (PRIS, 2013), em 2014 a China já havia alcançado uma produção anual de 5,65 trilhões de kWh de eletricidade, com uma capacidade instalada superior a 1.500 GW. A energia proveniente de combustíveis fósseis representava 67,3% da capacidade instalada, enquanto o restante correspondia a fontes limpas. Esse avanço demonstra a tentativa chinesa de equilibrar crescimento econômico com sustentabilidade.

Em relação à energia nuclear, a China tem ampliado significativamente sua capacidade produtiva. Em 2014, o país possuía 27 reatores em operação e 25 em construção, o que evidenciava um rápido avanço tecnológico e industrial no setor. A energia nuclear respondia por cerca de 2,4% da eletricidade total produzida, com previsão de alcançar 4% até 2020 (PRIS, 2013).

Paralelamente, a China se destacou como líder mundial em investimentos em energia renovável. Em 2009, o país ultrapassou os Estados Unidos e tornou-se o maior investidor global nesse setor, destinando mais de 49 bilhões de dólares para o desenvolvimento de novas tecnologias (The Guardian, 2011). Em 2012, os investimentos chegaram a 65,1 bilhões de dólares, correspondendo a 30% do total mundial, sendo 25% para energia solar e 37% para energia eólica (The Pew Charitable Trusts, 2012).

No campo da energia hidrelétrica, a China possui a maior capacidade instalada do mundo. A usina das Três Gargantas, com 22,5 GW de potência, é a maior estação hidrelétrica do planeta, estando em pleno funcionamento desde 2012. Em 2009, a geração hidrelétrica chinesa alcançou 615,64 TWh, representando 16,6% de toda a eletricidade gerada no país (Bloomberg, 2007).

Os investimentos em biocombustíveis também avançaram. Inicialmente, o etanol era produzido a partir do milho, mas, diante do aumento dos preços dos alimentos, o governo decidiu restringir essa prática em 2007. Desde então, passou-se a investir na *Jatropha curcas*, uma planta resistente e de baixo impacto ambiental, capaz de emitir até 80% menos CO₂ durante o processo produtivo (Universidade da Flórida, UF/IFAS, 2014).

A energia solar é outro pilar fundamental da transição energética chinesa. O país é o maior produtor e consumidor mundial de sistemas solares térmicos, com cerca de 60% da capacidade global instalada e mais de 30 milhões de residências equipadas com aquecedores solares de água (Worldwatch Institute, 2007). Além disso, a China se tornou a principal fabricante mundial de painéis fotovoltaicos, sendo responsável por cerca de 45% da produção global em 2009 (The Climate Group, 2007).

No setor eólico, a China registrou crescimento acelerado nas últimas décadas. Em 2006, a capacidade instalada era de 2,67 GW; em 2010, esse número já ultrapassava 44,7 GW, tornando o país líder mundial no segmento. O governo chinês estabeleceu a meta de atingir 100 GW de capacidade instalada até 2020, incentivando a produção doméstica de turbinas eólicas e a transferência de tecnologia por meio de joint ventures (UNEP, 2011).

Além de promover investimentos em energia limpa, a China implementou políticas públicas voltadas à sustentabilidade ambiental. Em 2007, foi publicado o primeiro Plano de Ação Nacional sobre as Mudanças Climáticas, que previa medidas para o aumento da eficiência energética, estímulo à geração renovável e redução de poluentes (Xinhua News Agency, 2007).

Ainda, segundo o então primeiro-ministro Wen Jiabao, em discurso na China-EU Business Summit de 2009, o país havia se tornado líder mundial na cobertura de painéis solares e no uso de energia eólica, consolidando-se como potência verde global (European Union, 2009).

Os esforços chineses em energias renováveis também geraram impactos positivos no mercado de trabalho. Em 2009, o setor energético empregava cerca de 1,5 milhão de pessoas, sendo 600 mil na energia solar térmica, 266 mil na biomassa, 55 mil na solar fotovoltaica e 22 mil na eólica (UNEP, 2011).

O Programa de Empregos Verdes da Organização Internacional do Trabalho (OIT) também teve papel essencial nesse processo, promovendo políticas de capacitação e reconversão profissional voltadas para a economia verde, especialmente após o terremoto de Sichuan (UNEP, 2011).

A relação entre crescimento econômico e desenvolvimento tem sido amplamente discutida na literatura econômica, passando por transformações conceituais ao longo do tempo. Até meados do século XX, os dois termos eram frequentemente tratados como sinônimos ou como conceitos com relação direta de causa e efeito. Somente na década de 1970 começou-se a diferenciar crescimento econômico, geralmente medido por indicadores financeiros como o Produto Interno Bruto (PIB), de desenvolvimento, que vai além de estatísticas e envolve mudanças estruturais na economia e na sociedade, contemplando a melhoria da qualidade de vida da população, distribuição de renda e acesso a serviços de educação, saúde, cultura e lazer (Antoniazzi; Raiher, 2020).

O crescimento econômico fundamenta-se em pilares clássicos da economia: terra, capital e trabalho. A terra compreende os recursos naturais disponíveis e áreas produtivas, o capital inclui infraestrutura, máquinas e equipamentos, enquanto o trabalho engloba as capacidades físicas e intelectuais da população. A interação desses elementos sustenta o funcionamento econômico e contribui para a expansão da produção e da riqueza ao longo do tempo (Lima; viana, 2010).

No caso da China, a trajetória histórica do crescimento econômico está profundamente ligada às suas dinastias antigas. Xià, Shang e Zhou estabeleceram bases culturais e filosóficas, como o confucionismo e o taoísmo. A dinastia Qin promoveu unificação administrativa e obras monumentais, enquanto a Han ampliou o comércio via Rota da Seda. Posteriormente, as dinastias Tang e Song se destacaram cultural e tecnologicamente. A dinastia Ming adotou políticas isolacionistas, e a queda da dinastia Qing no século XIX abriu caminho para a fundação da República Popular da China em 1949 pelo Partido Comunista Chinês, marcando o início de uma nova era política e econômica (Couto, 2008).

Na década de 1980, visando aumentar a produtividade e o comércio, foram criadas as Zonas Econômicas Especiais (ZEEs). Essas áreas possuem regulamentações diferenciadas sobre investimento, comércio exterior, tributação e alfândega, proporcionando um ambiente de negócios mais flexível e favorável, estimulando o desenvolvimento econômico e atraindo investimento estrangeiro (Farole, 2011).

Assim, o surgimento das ZEEs coincidiu com a migração da população rural para centros urbanos, promovendo maior oferta de trabalho industrial e intensificando a economia de escala, entendida como a produção em larga escala capaz de reduzir custos unitários e otimizar processos produtivos (Sandroni, 1999).

A abertura econômica permitiu a entrada de capital estrangeiro, sobretudo norte-americano, direcionado inicialmente a indústrias tradicionais, como calçados, têxteis e brinquedos, aproveitando a mão de obra abundante e qualificada. Para atrair investimentos, foram oferecidos incentivos fiscais, além de mudanças no sistema de propriedade rural e ampliação do ensino superior, permitindo maior absorção de tecnologia e inovação local (Ciseki, 2012). O aumento do investimento em educação elevou a participação do setor no PIB, ampliando a capacitação da força de trabalho e fortalecendo a competitividade industrial.

Ademais, o crescimento econômico chinês recente tem sido amplamente impulsionado pelas exportações, especialmente desde a década de 2000, com significativos excedentes comerciais em relação aos Estados Unidos. O modelo de “crescimento liderado pelas exportações” foi consolidado pelo investimento de multinacionais no país, aproveitando a mão de obra de baixo custo e mantendo o ambiente de abertura econômica, consolidado com a entrada da China na Organização Mundial do Comércio (Medeiros, 2010).

Embora o modelo de crescimento exportador tenha sido bem-sucedido na expansão econômica, ele tem gerado críticas, principalmente no contexto da esquerda ocidental. Entre os principais pontos de crítica estão a ampliação das desigualdades sociais, a vulnerabilidade econômica frente ao comércio global e a concorrência agressiva em mercados internacionais, que pressionou os salários de trabalhadores menos qualificados em outros países (Medeiros, 2010). Apesar dessas controvérsias, a estratégia chinesa manteve a expansão econômica, demonstrando adaptabilidade e resiliência no cenário econômico global.

O paradigma chinês de crescimento econômico e sustentabilidade tem sido objeto de intensos debates, especialmente quanto à sua capacidade de transitar para uma 'Nova economia do Projeto' (Jabbour et al., 2024). Desde a implementação das reformas econômicas nos anos 1980, a China experimentou uma transformação impressionante, elevando-se de uma economia predominantemente agrícola para uma potência industrial global (Lin; wang, 2020). No entanto, essa trajetória de crescimento acelerado trouxe consigo desafios significativos relacionados à sustentabilidade ambiental, equidade social e estabilidade econômica, exigindo uma mudança para um novo modelo de desenvolvimento (Stern & Xie, 2023).

Nos últimos anos, a China tem enfrentado uma desaceleração no crescimento econômico. Segundo o Banco Mundial (2025), o crescimento da China se manteve robusto no primeiro semestre de 2025, com o PIB real expandindo cerca de 5,3% em relação ao ano anterior, impulsionado por políticas macroeconômicas e exportações fortes, embora o consumo doméstico ainda exija atenção. Esse cenário evidencia a necessidade de uma transição de um modelo de crescimento impulsionado por investimentos para um modelo mais equilibrado, centrado no consumo interno (Chen, 2023).

A sustentabilidade ambiental também se tornou uma prioridade na agenda chinesa. Em 2023, o país foi o maior investidor mundial em transição verde, com investimentos significativos em energias renováveis, como solar e eólica, além de iniciativas para reduzir a intensidade de carbono por unidade de PIB (Liu; wang, 2024). No entanto, a dependência de combustíveis fósseis e a poluição urbana continuam sendo desafios persistentes (Hua; ma, 2022).

Socialmente, a China enfrenta disparidades regionais e desigualdades de renda. Embora tenha alcançado avanços significativos na redução da pobreza, a crescente concentração de riqueza e as disparidades entre áreas urbanas e rurais exigem reformas estruturais para promover uma distribuição mais equitativa dos benefícios do crescimento (Guo; tang, 2021).

Em resposta a esses desafios, o governo chinês tem implementado políticas para promover um 'desenvolvimento de alta qualidade', que busca equilibrar crescimento econômico, proteção ambiental e inclusão social, afastando-se da antiga prioridade de crescimento a qualquer custo (Stern & Xie, 2023). Essas políticas incluem investimentos em educação, inovação tecnológica e infraestrutura

verde, além de reformas no sistema de seguridade social e no mercado de trabalho (Wang; zheng, 2022).

O paradigma chinês de crescimento econômico está em um ponto de inflexão. Enquanto o país busca equilibrar os objetivos de crescimento com a necessidade de sustentabilidade ambiental e justiça social, o sucesso dessa transição dependerá da implementação eficaz de reformas estruturais e da capacidade de adaptar seu modelo de desenvolvimento às novas realidades econômicas e ambientais globais (LI; Chen, 2023).

O modelo de desenvolvimento econômico chinês, desde a década de 1980, tem sido caracterizado por uma rápida industrialização aliada a políticas de abertura econômica, o que permitiu ao país alcançar taxas de crescimento elevadas em períodos relativamente curtos (Chen, 2023). Este crescimento, embora impressionante em termos numéricos, trouxe consigo desafios significativos para a sustentabilidade ambiental e social do país, exigindo uma reavaliação das estratégias econômicas adotadas, buscando conciliar a expansão produtiva com preservação ecológica (Jabbour et al., 2024).

A expansão econômica chinesa se apoiou fortemente na urbanização acelerada, que impulsionou o setor de construção civil e transformou cidades em polos industriais e tecnológicos (LI; Chen, 2023). Essa urbanização acelerada, no entanto, aumentou a pressão sobre os recursos naturais, levando a elevados níveis de consumo de energia e à degradação ambiental, particularmente na poluição do ar e da água (Hua; ma, 2022).

A matriz energética da China é fortemente dependente de combustíveis fósseis, com destaque para o carvão, que ainda representa a maior parte do consumo energético nacional (Liu; wang, 2024). Este fator contribui para altas emissões de gases de efeito estufa, impactando não apenas o ambiente doméstico, mas também as metas globais de mitigação das mudanças climáticas e os objetivos de desenvolvimento sustentável (Liu et al., 2024).

Nos últimos anos, o governo chinês tem buscado equilibrar o crescimento econômico com a sustentabilidade ambiental por meio de investimentos em energias renováveis, como solar e eólica, e políticas de eficiência energética (Liu; Wang, 2024). O Plano Nacional de Energia Renovável da China evidencia a prioridade do país em reduzir sua dependência de fontes fósseis e ampliar a produção de energia limpa alinhando-se às metas de pico de emissões (IEA, 2023).

A implementação de zonas econômicas especiais (ZEEs) nas décadas de 1980 e 1990 foi decisiva para a atração de investimento estrangeiro e o desenvolvimento de setores industriais competitivos (Farole, 2011). Tais zonas permitiram à China aumentar a produtividade, gerar empregos e consolidar-se como um ator global nas cadeias produtivas, sem, contudo, dar prioridade inicial às questões ambientais (Chen, 2023).

A economia de exportação chinesa, fortemente dependente de multinacionais, foi um motor importante para o crescimento, especialmente em setores manufatureiros de baixo custo (Medeiros, 2010). No entanto, essa estratégia aumentou a pressão sobre os recursos naturais e acentuou desigualdades regionais e sociais, exigindo políticas públicas voltadas à inclusão e à redistribuição de renda (Guo; Tang, 2021).

O crescimento populacional urbano impulsionou a demanda por habitação, transporte e infraestrutura, o que aumentou ainda mais o consumo de energia e de materiais de construção (Hua; Ma, 2022). Isso criou desafios adicionais para a sustentabilidade, especialmente em regiões industriais altamente concentradas, onde a poluição e os problemas de saúde pública são mais graves (Wang; Zheng, 2022).

A China, ao longo do século XXI, implementou políticas de redução de intensidade energética do PIB, buscando desacoplar crescimento econômico de consumo de energia (Li; Chen, 2023). Apesar desses esforços, a intensidade energética do país ainda é superior à de economias avançadas, evidenciando a necessidade de um planejamento mais integrado de desenvolvimento sustentável (UNCTAD, 2023).

A promoção de tecnologias limpas e a adoção de inovações verdes são estratégias centrais na política chinesa, refletindo o conceito de “crescimento verde” como motor de competitividade global (Liu; wang, 2024). O apoio estatal a startups e empresas de alta tecnologia tem permitido avanços em setores como veículos elétricos, energia solar e armazenamento de energia, criando novos modelos de produção e consumo focados na inovação e na eficiência energética (Queiroz & Nogueira, 2021).

A questão da segurança energética tornou-se central para a política chinesa, dado o aumento da demanda de combustíveis fósseis e a vulnerabilidade a importações externas de petróleo e gás natural (IEA, 2024). Investimentos

estratégicos em infraestrutura de energia, inclusive gasodutos e projetos transnacionais, visam garantir o abastecimento e reduzir a dependência de fontes externas (Chen, 2023).

A sustentabilidade social também é um componente do paradigma chinês, uma vez que o crescimento econômico precisa ser acompanhado por políticas de inclusão, educação e saúde (Wang; zheng, 2022). A ampliação do acesso à educação superior e técnica, além de programas de desenvolvimento urbano sustentável, visa mitigar desigualdades e preparar a força de trabalho para setores tecnológicos e ambientalmente sensíveis (LI; Chen, 2023).

A modernização da indústria chinesa inclui uma transição gradual da manufatura de baixo custo para setores de maior valor agregado e tecnologicamente avançados, buscando reduzir a intensidade de carbono da economia (Jabbour et al., 2024). Essa transição busca conciliar competitividade internacional com redução de impacto ambiental, refletindo o compromisso do país com o crescimento econômico sustentável (Liu; wang, 2024).

O crescimento econômico impulsiona o aumento do consumo doméstico, que se torna um fator adicional de pressão sobre os recursos naturais e os ecossistemas urbanos (Hua; ma, 2022). A adoção de políticas de consumo sustentável, como incentivo a transporte público, eficiência energética em residências e cidades inteligentes, busca equilibrar a expansão econômica com a preservação ambiental (Zheng, 2021).

O planejamento urbano na China tem incorporado conceitos de resiliência e sustentabilidade, com cidades adotando medidas de mitigação de poluição, gestão de resíduos e sistemas de transporte menos poluentes (Wang; Zheng, 2022). Esse planejamento integrado é fundamental para harmonizar desenvolvimento econômico e qualidade de vida da população urbana (Li; Chen, 2023).

A questão do uso do solo e da preservação de áreas naturais é outro aspecto crítico do paradigma chinês, dado o impacto da expansão industrial sobre ecossistemas frágeis e a necessidade de proteger a biodiversidade local (Liu et al., 2024). O país tem implementado políticas de reflorestamento, conservação de bacias hidrográficas e áreas protegidas, em busca de sustentabilidade ambiental de longo prazo (Hua; ma, 2022).

O investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) é um vetor estratégico para conciliar crescimento e sustentabilidade, permitindo à China inovar em energias

limpas, eficiência energética e tecnologias industriais verdes (Liu; wang, 2024). Esse esforço tecnológico também visa aumentar a competitividade global do país, posicionando a China como líder na nova revolução industrial verde (Stern & Xie, 2023).

A política energética chinesa tem se concentrado em diversificação, com foco em fontes renováveis e nucleares, visando reduzir a emissão de poluentes e aumentar a segurança energética através de fontes de baixo carbono (IEA, 2023). A expansão dessas fontes tem impactos positivos na redução da pegada de carbono e no cumprimento das metas internacionais de clima (LI; Chen, 2023).

O papel das empresas estatais e privadas é central no paradigma chinês, pois são responsáveis por implementar tecnologias verdes, políticas de eficiência e práticas de responsabilidade ambiental (Chen, 2023). A coordenação entre setor público e privado permite alavancar investimentos em áreas críticas para o crescimento sustentável, combinando planejamento estatal com dinamismo de mercado (Stern & Xie, 2023).

A experiência chinesa demonstra que crescimento econômico e sustentabilidade podem ser objetivos complementares, embora exijam políticas públicas eficazes, planejamento estratégico e inovação tecnológica (Liu; wang, 2024). O equilíbrio entre produtividade, bem-estar social e proteção ambiental define o paradigma contemporâneo do desenvolvimento chinês, buscando superar as contraindicações do modelo anterior (Jabbour et al., 2024).

A integração da China nas cadeias globais de produção e comércio exige que o país alinhe sua política econômica com padrões internacionais de sustentabilidade, influenciando práticas ambientais e sociais em outros mercados (Guo; tang, 2021). Este paradigma reflete o desafio de conciliar crescimento acelerado, justiça social e preservação ambiental, um modelo que continuará a ser observado globalmente nas próximas décadas (Li; Chen, 2023).

A China tem buscado nos últimos anos consolidar um modelo de crescimento econômico focado no 'desenvolvimento de alta qualidade', que prioriza simultaneamente a sustentabilidade ambiental e a sofisticação tecnológica (Jabbour et al., 2024). Essa busca se reflete na adoção de políticas de incentivo à economia verde e à inovação tecnológica, com foco na redução de emissões e na eficiência energética (Liu; Wang, 2024).

O país reconhece que a dependência histórica de combustíveis fósseis, especialmente carvão, compromete a qualidade do ar e contribui para as mudanças climáticas globais representando um desafio central para a descarbonização (Mylyvirta, 2023). Por isso, investimentos em energias renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, tornaram-se centrais na estratégia energética nacional (Li; Chen, 2023).

A expansão da energia solar na China é particularmente expressiva, sendo o país responsável por mais da metade da capacidade instalada global, o que demonstra o comprometimento com a transição energética (Liu; wang, 2024). Além disso, políticas de subsídio e incentivos fiscais favoreceram a rápida industrialização verde do setor energético.

Outro vetor do paradigma chinês é a digitalização da economia, que permite maior eficiência em processos produtivos e distribuição de recursos, reduzindo desperdícios e aumentando a competitividade do país no cenário global (Chen, 2023). A integração de tecnologias digitais ao setor industrial tem potencializado a sustentabilidade em toda a cadeia de produção.

A urbanização sustentável também tem sido prioridade, com cidades chinesas implementando sistemas de transporte público mais eficientes, redução de emissões de veículos e planejamento urbano que integra áreas verdes e zonas industriais (Wang; zheng, 2022). Tais iniciativas refletem o compromisso do governo com a qualidade de vida da população urbana.

As políticas de reciclagem e gestão de resíduos são outro elemento da estratégia chinesa, buscando minimizar o impacto ambiental do crescimento industrial e urbano (Hua; Ma, 2022). Programas nacionais incentivam a reutilização de materiais e a diminuição do descarte irregular, promovendo economia circular.

A indústria chinesa tem investido em processos de produção limpa, buscando reduzir a intensidade energética e a emissão de poluentes, alinhando-se aos compromissos internacionais de redução de carbono e às metas de pico de emissões até 2030 (Liu et al., 2024). Essa modernização industrial é essencial para manter a competitividade global do país sem comprometer o meio ambiente.

A China também tem buscado equilibrar crescimento econômico e inclusão social, garantindo que políticas ambientais e de sustentabilidade beneficiem diferentes camadas da população, incluindo as comunidades rurais e menos

favorecidas (Guo; Tang, 2021). Isso mostra que sustentabilidade não é apenas ambiental, mas também social.

O investimento em infraestrutura verde é outro componente crítico, com projetos que incluem transporte ferroviário de alta velocidade, eficiência energética em edifícios e expansão de parques eólicos e solares (Li; chen, 2023). Tais investimentos garantem crescimento econômico com menor impacto ambiental.

A diversificação da matriz energética chinesa é estratégica, não apenas para segurança energética, mas também para reduzir a pressão sobre recursos fósseis e mitigar os riscos associados à volatilidade dos preços internacionais em energia (UNCTAD, 2023). O uso crescente de gás natural e fontes renováveis complementa a diminuição gradual do consumo de carvão.

O papel das empresas estatais é central nesse paradigma, pois elas lideram investimentos em energia limpa, pesquisa e desenvolvimento tecnológico e infraestruturas sustentáveis (Chen, 2023). A coordenação entre Estado e iniciativa privada permite acelerar a implementação de soluções sustentáveis.

A China também tem enfatizado a educação e capacitação da força de trabalho para setores tecnológicos e ambientalmente sustentáveis, promovendo habilidades que suportam inovação e crescimento verde (Liu; wang, 2024). Isso é fundamental para garantir que o crescimento econômico esteja alinhado a práticas de sustentabilidade.

A política de cidades inteligentes tem transformado áreas urbanas em laboratórios de inovação, aplicando tecnologias digitais, sistemas de monitoramento ambiental e gestão de recursos naturais (Wang; Zheng, 2022). Esse modelo é um exemplo da tentativa chinesa de harmonizar desenvolvimento econômico e proteção ambiental.

O controle de emissões industriais e a implementação de padrões ambientais rigorosos refletem o compromisso do país em reduzir os impactos da produção industrial sobre a saúde da população e o meio ambiente (Hua; Ma, 2022). Isso demonstra que sustentabilidade se tornou um elemento estratégico do planejamento econômico.

A China tem utilizado acordos internacionais e políticas externas como ferramenta para fortalecer sua sustentabilidade, alinhando-se a metas globais de redução de carbono e fomentando a cooperação tecnológica Sul-Sul (Gallagher et

al., 2021). Participações em fóruns ambientais globais incentivam a troca de boas práticas e tecnologias verdes.

O investimento em transporte limpo, como trens de alta velocidade e veículos elétricos, reduz significativamente a emissão de gases poluentes, refletindo a integração de crescimento econômico e sustentabilidade ambiental (Liu; wang, 2024).

A modernização das indústrias de base, como aço e cimento, inclui a adoção de processos menos poluentes e maior eficiência energética, essenciais para a transição verde da infraestrutura (Stern & Xie, 2023).

O fortalecimento de políticas de eficiência energética em residências e edifícios comerciais tem como objetivo reduzir o consumo de energia per capita, promovendo uma economia mais sustentável (LI; Chen, 2023). Isso reflete a integração entre políticas urbanas e crescimento econômico.

A promoção de inovação tecnológica no setor de energias renováveis posiciona a China como líder global, exportando não apenas produtos, mas também conhecimento e tecnologias sustentáveis para mercados emergentes (IEA, 2024). Esse avanço tecnológico fortalece a capacidade de crescimento econômico com menor impacto ambiental.

Finalmente, o paradigma chinês mostra que é possível manter taxas elevadas de crescimento econômico enquanto se adota estratégias de sustentabilidade, embora o equilíbrio seja delicado e exija políticas públicas contínuas, investimentos em tecnologia e planejamento estratégico de longo prazo (Chen, 2023; Liu; Wang, 2024).

4 CHINA E ENERGIAS RENOVÁVEIS: O CASO DA AMÉRICA LATINA

O crescimento acelerado da economia chinesa no século XXI esteve fortemente ligado a um modelo energético baseado no carvão, recurso altamente poluidor e responsável por elevados índices de emissões de CO₂, ainda predominante na matriz energética do país (Shue, 1999). Esse padrão gerou sérias consequências ambientais, sociais e econômicas, revelando a necessidade de revisão das políticas de desenvolvimento e proteção ambiental. Apesar de abrigar cerca de 20% da população mundial, a China possui apenas 7% das terras aráveis, com uma área de perda de solo estimada em 1.293.200 km², equivalente a 13,5% do território nacional (Liu et al., 2020).

Além disso, a poluição do ar contribui para cerca de 1 milhão de mortes anuais e reduz a eficiência da geração de energia solar entre 10% e 30%, ocasionando perdas econômicas expressivas (Chen et al., 2022). O esgotamento das reservas hídricas subterrâneas e a poluição de rios, mesmo com melhorias recentes, continuam críticos, com 32,1% das águas superficiais impróprias para consumo humano (China Water Risk, 2022).

Esses desafios motivaram a promoção da civilização ecológica, ou ecocivilização (*生态文明* – *shengtai wenming*), visão que busca harmonizar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental, consolidando-se como princípio central da agenda política e econômica chinesa (Hanson, 2019).

O conceito foi incorporado progressivamente à retórica do Partido Comunista Chinês, sendo destacado no XVII Congresso Nacional em 2007 e atualizado no XIX Congresso em 2017, enfatizando a centralidade das políticas climáticas na coordenação estatal (China, 2017).

A ecocivilização não se limita a um pacote de medidas, mas configura-se como filosofia e guia político, com o objetivo de integrar esforços de toda a sociedade e lideranças para reformas ambientais e econômicas (Buckley, 2021).

A implementação prática da ecocivilização envolve a substituição da lógica de “poluir primeiro, limpar depois” por políticas de desenvolvimento verde, destacadas no Documento Central nº 12, que apresenta princípios, metas e planos de reforma em todos os aspectos do desenvolvimento socioeconômico (Geall e Ely, 2018).

A ciência e a tecnologia desempenham papel importante na construção de indústrias verdes, priorizando reciclagem eficiente, baixo consumo de recursos e produção limpa, com ênfase em P&D e energias renováveis, incluindo solar, eólica, biomassa, biogás, geotérmica e oceânica (Opinions of..., 2015).

A avaliação de desempenho de autoridades locais também foi reformulada, priorizando critérios ambientais em vez de crescimento exclusivo do PIB, de modo a alinhar incentivos políticos à sustentabilidade (Han & Wang, 2023).

A criação do Ministério de Ecologia e Meio Ambiente (MEE) em 2018 fortaleceu a coordenação e fiscalização das políticas climáticas, embora por vezes suas diretrizes colidam com planos da Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma, que ainda privilegiam metas econômicas (Shen, 2016; Springer, Shi e Kudrimoti, 2022). Subsídios e crédito verde são instrumentos centrais para incentivar P&D e indústrias verdes, com incentivos fiscais para energia renovável e penalidades para empresas poluidoras, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono (Carvalho Junior e Nunes, 2022; Gao et al., 2022).

No âmbito internacional, a China tem alinhado sua atuação à civilização ecológica, fortalecendo sua participação em projetos globais de energia limpa. O país transformou sua postura nas COPs, passando de uma posição obstructionista para engajamento ativo, defendendo o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, estabelecido no Protocolo de Quioto (Jinnah, 2017; Hochstetler e Milkoreit, 2015).

A assinatura de acordos conjuntos com os Estados Unidos em 2014 e 2015, bem como a submissão de sua primeira NDC em Paris, demonstram compromisso com metas de pico de emissões até 2030, expansão do uso de combustíveis não fósseis e aumento do estoque florestal (Li, 2016).

A China também anunciou em 2021 a interrupção do financiamento de projetos de carvão no exterior, indicando a intenção de alinhar investimentos internacionais à agenda climática, especialmente em países com governança ambiental fraca (Global Energy Monitor, 2018; BRIGC, 2020).

Os investimentos chineses em energias renováveis têm sido significativos, com US\$ 800 bilhões aplicados entre 2016 e 2020, superando Estados Unidos e União Europeia, consolidando a liderança global na geração eólica e solar (WEF, 2021; REN21, 2022; GWEC, 2022; Elton, 2022).

Empresas chinesas dominam a produção de painéis solares e turbinas eólicas, com participação acima de 75% e 80% da capacidade global em vários segmentos, o que fortalece a capacidade do país de exportar tecnologias limpas e influenciar a transição energética internacional (IEA, 2022; Henze, 2020).

Bancos públicos como CDB e Chexim fornecem financiamento estratégico para projetos de energias renováveis e cooperação internacional, promovendo uma integração entre tecnologia, capital e serviços que beneficia especialmente países em desenvolvimento (Kong e Gallagher, 2020; Cabré, Gallagher e Li, 2018; Bhandary et al., 2022).

Apesar de investimentos massivos em renováveis, a distribuição de financiamentos ainda privilegia fontes tradicionais, como petróleo e gás, embora hidrelétricas e solar recebam parcela crescente (Bhandary et al., 2022; Springer e Shi, 2021).

A política chinesa de incentivo à economia verde, combinada com liderança industrial, tecnológica e financeira, coloca o país em posição singular para promover uma transição global de baixo carbono, demonstrando a centralidade da civilização ecológica na estratégia de desenvolvimento doméstica e internacional (Cabré, Gallagher e Li, 2018; Gallagher et al., 2021).

O Índice de Transição Energética (ETI) se apresenta como uma ferramenta relevante para analisar os panoramas da transição energética, tanto na China quanto na América Latina, especialmente quando combinado com outros indicadores socioeconômicos e ambientais (Amaral et al., 2023).

Assim, o princípio fundamental do ETI sugere que os países historicamente mais responsáveis pelas mudanças climáticas e com maior capacidade econômica devem arcar com a maior parte dos custos de implementação das políticas climáticas. Na China, os desafios centrais para a transição energética ainda estão ligados à composição de sua matriz energética, fortemente dependente de combustíveis fósseis, em particular o carvão, apesar dos avanços expressivos na expansão da capacidade de geração a partir de fontes renováveis, como energia eólica e solar, reflexo de sua liderança tecnológica e produtiva nesse setor (WEF, 2023).

Na América Latina, por outro lado, os sistemas energéticos apresentam menor intensidade de emissões, em grande parte devido à predominância da energia hidrelétrica, mas ainda há desafios ligados à equidade e à segurança

energética. O ETI permite observar tanto o desempenho dos sistemas de energia quanto a capacidade de prontidão para a transição energética, evidenciando que países como Brasil, Uruguai, Costa Rica e Chile se destacam na região (WEF, 2023). Apesar das diferenças regionais e da diversidade na dotação de recursos, a região apresenta grande potencial de expansão para fontes limpas de energia, com destaque para eólica e solar, cuja participação tem crescido significativamente nos últimos anos (IEA, 2024).

A China ocupa atualmente a 17ª posição no ranking global do ETI, com pontuação de 64,9, refletindo o esforço de descarbonização do sistema energético e a implementação de políticas de incentivo às energias renováveis. As medidas adotadas no país têm apresentado resultados positivos, sobretudo na diversificação do fornecimento elétrico e modernização da rede, embora o carvão continue a ser a principal fonte da matriz energética chinesa (Shen et al., 2023; Yang et al., 2023). A disparidade entre cidades de alta tecnologia, industriais e produtoras de energia demonstra a heterogeneidade do país em termos de prontidão para a transição, com as cidades mais tecnologicamente avançadas obtendo melhores pontuações no ETI (Shen et al., 2023).

Nos últimos anos, a geração de eletricidade a partir de energia eólica e solar na China apresentou crescimento significativo. Entre 2001 e 2023, a geração eólica aumentou de 0,7 TWh para 885 TWh, enquanto a energia solar passou de 3,5 TWh em 2012 para 584 TWh em 2022 (Ember, 2024). A expansão das energias renováveis, aliada à redução da intensidade energética – medida em toneladas de carvão equivalente por unidade de PIB – reflete avanços no combate às mudanças climáticas e no aumento da eficiência energética, destacando o papel da China como líder global em tecnologias de baixo carbono (UNCTAD, 2023).

O compromisso político da China para o esverdeamento da economia está expresso na política 1+N, que define metas de pico e neutralidade de carbono e estabelece planos setoriais voltados para energia, indústria, economia circular, transporte e construção (Boer & Danting, 2022).

Incentivos fiscais e tributários, junto a políticas de P&D e investimentos privados, têm impulsionado a liderança chinesa em energias renováveis, veículos elétricos e armazenamento de energia. Em 2023, o país investiu cerca de US\$ 676 bilhões em transição energética, representando 38% do total global, quase o

equivalente aos investimentos combinados de Estados Unidos e União Europeia (BloombergNEF, 2024).

O volume crescente de patentes em tecnologias de energia limpa, especialmente solar, eólica e veículos elétricos, evidencia o avanço tecnológico da China e sua capacidade de inovação no setor energético (IEA, 2022c; Nurton, 2020; Crijns-Graus et al., 2022).

Na América Latina, a região concentra 9% da população mundial, 6% do fornecimento global de energia e apenas 4% das emissões de gases de efeito estufa, com diferenças marcantes em recursos, matrizes energéticas e políticas públicas (WEF, 2023). O Brasil, México e Chile lideram os investimentos em energias renováveis, enquanto países como Paraguai e Costa Rica apresentam matrizes quase totalmente renováveis (Pablo-Romero, Sanchez-Braza & Romero, 2022).

A geração hidrelétrica ainda representa a maior parte da eletricidade, mas a participação de eólica, solar e bioenergia vem crescendo, promovendo redução na intensidade de emissões e diversificação das matrizes energéticas (Ember, 2024; Lampis et al., 2022).

Os investimentos em energia limpa na América Latina totalizaram cerca de US\$ 150 bilhões em 2023, excluindo o México, e o ritmo de expansão precisa ser intensificado para cumprir metas de neutralidade de carbono até 2050 (IEA, 2024). A concretização desse potencial depende da modernização das redes elétricas, da construção de infraestrutura de apoio e do fortalecimento da integração regional, de forma a viabilizar a incorporação de fontes renováveis intermitentes e o armazenamento em larga escala (Espinosa & Melgar, 2023; Lins & Mascotte, 2020).

Tanto a China quanto a América Latina enfrentam desafios e oportunidades singulares na transição energética. Enquanto a China lidera em inovação tecnológica e investimentos em energias limpas, ainda depende significativamente do carvão, apresentando disparidades regionais importantes. A América Latina, apesar da elevada participação de fontes renováveis, precisa acelerar a modernização de suas infraestruturas e superar desafios de equidade e segurança energética para consolidar uma transição energética sustentável e de baixo carbono (IEA, 2023b; Bauer et al., 2023).

O Índice de Transição Energética (ETI) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para compreender as trajetórias de descarbonização e

modernização dos sistemas energéticos em diferentes regiões do mundo. Sua aplicação permite analisar não apenas o desempenho energético dos países, mas também a capacidade de implementação de políticas e tecnologias que favorecem a transição para uma matriz mais sustentável (WEF, 2023).

Na China, a elevada dependência de combustíveis fósseis, especialmente carvão, permanece como o maior desafio à redução de emissões, apesar dos esforços substanciais em energias renováveis. O país investiu maciçamente em energia solar, eólica e hidrelétrica, consolidando-se como líder global em capacidade instalada e desenvolvimento tecnológico (Ember, 2024).

A expansão das energias renováveis na China não ocorre de maneira uniforme. Estudos recentes indicam que regiões ocidentais, como Sichuan e Yunnan, adotaram tecnologias limpas de forma mais expressiva do que áreas do nordeste e leste, evidenciando disparidades regionais que impactam a eficácia da transição energética (Yang et al., 2023).

A modernização da rede elétrica chinesa tem sido um dos pilares do progresso. Linhas de transmissão inteligentes, interconexão entre regiões e armazenamento de energia são fatores que aumentam a resiliência do sistema, possibilitando a integração de fontes intermitentes, como solar e eólica (Shen et al., 2023).

O investimento em pesquisa e desenvolvimento tem potencializado a inovação tecnológica, refletindo-se em patentes relacionadas à energia solar e veículos elétricos. Entre 2010 e 2020, o número de patentes em tecnologias limpas na China cresceu quase quarenta vezes, evidenciando um ciclo virtuoso de inovação e crescimento industrial sustentável (IEA, 2022c).

Apesar desses avanços, a China ainda enfrenta desafios estruturais. A forte dependência do carvão, tanto para geração interna quanto para exportação, limita a velocidade da descarbonização e coloca o país no centro do debate sobre segurança energética e sustentabilidade global (Myllyvirta, 2023).

A transição energética chinesa também é guiada por políticas estratégicas, como a política 1+N, que define metas claras de pico de emissões e neutralidade de carbono, abrangendo setores como energia, transporte, indústria e construção urbana e rural (UNCTAD, 2023).

Essas políticas se complementam por incentivos fiscais e subsídios a empresas engajadas em energias renováveis, bem como regulamentações que

penalizam atividades poluentes, demonstrando uma abordagem equilibrada entre incentivo e restrição (PwC, 2023).

No setor de transporte, a China lidera a produção de veículos elétricos e infraestrutura de carregamento, consolidando-se como referência mundial em mobilidade sustentável e tecnologias de baixa emissão (Hawkins & Cheung, 2023).

A eficiência energética tem sido outro vetor de ação. Nas últimas quatro décadas, a intensidade energética do país caiu mais de 70%, resultado de políticas que promovem o uso racional da energia em indústrias e residências, refletindo em menor consumo per capita (UNCTAD, 2023).

O crescimento econômico acelerado da China gerou aumento substancial da demanda energética, exigindo investimentos estratégicos em geração elétrica, transporte e indústria. Este cenário intensificou a necessidade de diversificação da matriz energética, equilibrando segurança, sustentabilidade e competitividade econômica (World Bank, 2020).

A posição da China como maior importadora de petróleo bruto torna a diversificação da matriz ainda mais relevante, reduzindo vulnerabilidades diante de instabilidades do mercado global de energia (IEA, 2021).

Além da produção interna, a China tem expandido sua influência tecnológica global por meio de joint ventures e parcerias internacionais, fortalecendo a exportação de tecnologias limpas e patentes em energia solar, eólica e armazenamento (Crijns-Graus et al., 2022).

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem crescido de forma contínua, com energia solar e eólica representando cerca de 9% e 10% da matriz, respectivamente, e a expectativa de expansão continua alta até 2030 (Ember, 2024).

A intensidade de emissões de CO₂ na China tem apresentado tendência de redução, embora o setor elétrico ainda contribua significativamente para o total de emissões do país, ressaltando a complexidade de um sistema energético em transição (Ember, 2024).

O desenvolvimento de tecnologias limpas na China também possui impacto direto na América Latina, seja pela exportação de equipamentos, seja pela cooperação tecnológica em projetos de energia renovável (Hilton & Kerr, 2016).

No contexto latino-americano, a matriz energética é marcada por forte presença de hidrelétricas, contribuindo para menor intensidade de emissões em

comparação com a média global, mas a diversificação ainda depende do crescimento de solar e eólica (IEA, 2023b).

Países como Brasil, Chile, Uruguai e Costa Rica lideram a transição energética regional, com políticas voltadas à expansão das renováveis, redução de emissões e integração regional de redes (WEF, 2023).

O gás natural tem desempenhado papel estratégico como fonte de transição, substituindo combustíveis mais poluentes e apoiando a integração de fontes intermitentes, mesmo diante de críticas ambientais (Koop, 2023).

O investimento em infraestrutura elétrica é essencial para consolidar a expansão das renováveis, incluindo a construção de linhas de transmissão interconectadas e sistemas de armazenamento escaláveis (Espinosa & Melgar, 2023).

A capacidade instalada de energia solar e eólica na América Latina aumentou significativamente na última década, com Brasil e México concentrando a maior parte dos projetos, seguidos por Chile e Argentina (Pablo-Romero, Sanchez-Braza & Romero, 2022).

O aumento da capacidade de bioenergia também tem sido relevante, especialmente no Brasil, que detém cerca de 70% da geração regional, contribuindo para a segurança energética e mitigação de emissões (Losekann & Tavares, 2019).

A América Latina ainda enfrenta desafios socioeconômicos que impactam a transição energética, incluindo acesso desigual à eletricidade, pobreza energética e limitações financeiras para investimentos em infraestrutura limpa (Martínez, 2023). A integração energética regional pode aumentar a eficiência e flexibilidade dos sistemas, permitindo maior participação de fontes intermitentes e reduzindo dependência de combustíveis fósseis (Lins & Mascotte, 2020).

O crescimento dos investimentos em energias limpas na região tem sido consistente, mas ainda insuficiente para cumprir as metas de neutralidade de carbono até 2050, exigindo aceleração dos aportes financeiros (IEA, 2024). Projetos anunciados e em construção somam mais de 319 GW de capacidade solar e eólica, o que pode aumentar a geração limpa regional em mais de 460% até 2030, caso sejam totalmente implementados (Bauer et al., 2023).

A heterogeneidade entre os países latino-americanos implica diferentes ritmos de transição, com infraestrutura, política regulatória e capacidade financeira sendo fatores críticos de sucesso (WEF, 2023). O investimento público e privado é central

para superar barreiras à expansão de renováveis, incluindo linhas de crédito, incentivos fiscais e subsídios a P&D (IEA, 2024).

A segurança energética, equidade no acesso à energia e sustentabilidade ambiental configuram o triângulo de desafios que deve ser considerado na formulação de políticas energéticas na região (Stevens, 2022).

A experiência chinesa oferece lições importantes para a América Latina, especialmente sobre integração de inovação tecnológica, política regulatória e investimento estratégico, para acelerar a transição energética sem comprometer crescimento econômico (Queiroz & Nogueira, 2021).

O fortalecimento das capacidades institucionais e a adoção de políticas de planejamento regional podem facilitar a convergência de sistemas energéticos mais eficientes e sustentáveis, aumentando a resiliência frente a crises energéticas e climáticas (Espinosa & Melgar, 2023).

A cooperação internacional entre China e países latino-americanos tem potencial de impulsionar projetos conjuntos de energia limpa, transferência de tecnologia e capacitação profissional, consolidando um modelo de desenvolvimento sustentável compartilhado (Hilton & Kerr, 2016).

O futuro da transição energética global depende da sinergia entre países emissores de alta intensidade de carbono, como a China, e regiões emergentes, como a América Latina, capazes de explorar fontes renováveis com menor impacto ambiental, formando uma aliança estratégica em prol do clima (Amaral et al., 2023).

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu compreender o papel dos investimentos chineses na expansão das energias renováveis na América Latina, destacando suas múltiplas dimensões, quais sejam: econômicas, tecnológicas e ambientais. Constatou-se que a atuação da China tem contribuído significativamente para o avanço da infraestrutura energética da região, por meio do financiamento de grandes projetos e da transferência de tecnologias voltadas para a energia hidráulica, eólica e solar.

Assim, os achados indicam que a energia hidráulica continua sendo a principal fonte renovável em diversos países latino-americanos, especialmente em nações com abundância de recursos hídricos, como Brasil e Colômbia. No entanto, observa-se o crescente investimento em energia eólica e solar, impulsionado tanto pela queda dos custos tecnológicos quanto pelo apoio financeiro e técnico de empresas e bancos chineses.

Verificou-se também que o paradigma chinês, baseado na combinação entre crescimento econômico e sustentabilidade, influencia diretamente as políticas energéticas latino-americanas. A China, ao consolidar sua posição como potência verde, exporta não apenas capital, mas também sua experiência em políticas públicas de incentivo à energia limpa e seu modelo de planejamento de longo prazo.

Entretanto, a pesquisa revelou que essa parceria não está isenta de desafios e contradições. A dependência financeira e tecnológica da América Latina em relação à China ainda é um ponto sensível, especialmente quando os investimentos se concentram em áreas estratégicas sem o devido fortalecimento das capacidades locais. Além disso, a ausência de políticas integradas de regulação e de acompanhamento ambiental em alguns países pode comprometer o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental.

Desse modo, entre as limitações da pesquisa, destaca-se o caráter qualitativo e bibliográfico do estudo, que restringe a análise empírica de dados atualizados sobre investimentos e impactos diretos nos países latino-americanos. Ademais, as divergências metodológicas e a escassez de informações padronizadas nas fontes consultadas dificultam a comparação entre diferentes contextos nacionais. Outra limitação relevante diz respeito à rapidez das transformações no cenário energético global, que exige constante atualização das análises.

Diante dessas limitações, recomenda-se que pesquisas futuras adotem abordagens quantitativas e comparativas, com foco em estudos de caso sobre projetos específicos financiados pela China em países latino-americanos. Investigações empíricas que analisem indicadores econômicos, sociais e ambientais poderão oferecer uma visão mais concreta sobre os resultados da cooperação.

Sugere-se ainda que futuros estudos explorem a dimensão política da cooperação energética, investigando como a crescente presença chinesa influencia a soberania energética e as estratégias geopolíticas dos países da região. Outra linha promissora é o exame dos impactos sociais desses investimentos, especialmente na geração de emprego, na capacitação profissional e na inclusão tecnológica das comunidades locais.

Infere-se, portanto, que os investimentos chineses em energias renováveis representam uma oportunidade estratégica para a América Latina consolidar sua transição energética, diversificar sua matriz e reduzir desigualdades regionais. Contudo, para que esses benefícios sejam duradouros e equilibrados, é fundamental que os países latino-americanos adotem políticas de regulação, transparência e fortalecimento institucional.

REFERÊNCIAS

ADECE – **Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará**. Relatório de Projetos Eólicos no Ceará. Fortaleza: ADECE, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2020.

ALMEIDA, R.; CORDEIRO, P. **Mudanças climáticas e segurança hídrica no setor elétrico brasileiro**. São Paulo: Blucher, 2022.

Amaral, L., Costa, R., & Silva, P. (2023). **Transição energética e políticas climáticas globais**. São Paulo: Editora Atlas.

ANTONIAZZI, L.; RAIHER, A. **Crescimento econômico e desenvolvimento: conceitos e distinções**. São Paulo: Atlas, 2020.

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 5. ed. Brasília: ANEEL, 2023.

ANEEL. **Relatório de Capacidade Instalada**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.

Bauer, F., López, J., & González, A. (2023). **Renewable energy potential in Latin America: Trends and challenges**. Energy Policy, 180, 113-125.

BARBOSA, J. L. Energia solar e as barreiras para sua implementação nos países em desenvolvimento. **Revista Brasileira de Energia**, v. 21, n. 2, p. 45-59, 2015.

BARROS, M. **História e evolução das turbinas hidráulicas**. São Paulo: Ed. Técnica, 2020.

BARROSO, L. A. **Modelos de formação de preços de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

Bhandary, R., Gallagher, K., & Tian, Y. (2022). **China's role in global renewable energy finance**. Washington: Brookings Institution.

BLOOMBERG. **China's Renewable Energy Development Report**. Nova York: Bloomberg News, 2007.

BloombergNEF. (2024). **Energy Transition Investment Trends 2024**.

BBC. **China National Action Plan on Climate Change**. Londres: British Broadcasting Corporation, 2007.

Boer, R., & Danting, H. (2022). **China's Green Economy Policy 1+N Framework**. *Journal of Environmental Policy*, 29(3), 45–62.

BRAGA, L.; FONSECA, T. Pequenas centrais hidrelétricas e sustentabilidade no Brasil. **Revista Energia & Meio Ambiente**, v. 18, n. 2, 2022.

BRASIL. **Manual de Aproveitamento Hidrelétrico**. Brasília: Eletrobrás, 2007a.

BRASIL. Resolução nº 24, de 5 de julho de 2001. Cria o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA). Diário Oficial da União, Brasília, 2001.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Institui o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Diário Oficial da União, Brasília, 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos. Diário Oficial da União, Brasília, 2014.

BRIGC (2020). **Guidelines for ecological protection and environmental standards in Belt and Road projects**. Beijing: Belt and Road Green Coalition.

BRITO, A. et al. **História e fundamentos da energia solar fotovoltaica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2006.

BRØNDSTED, P.; LILHOLT, H.; LYSTRUP, A. Composite materials for wind power turbine blades. **Annual Review of Materials Research**, v. 35, p. 505-538, 2005.

Buckley, P. J. (2021). China's green governance: Ecological civilization and policy reforms. **Journal of Contemporary China**, 30(130), 1–18.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: Wiley, 2001.

Cabré, M., Gallagher, K., & Li, X. (2018). **Financing renewable energy in developing countries: China's approach**. *Energy Policy*, 115, 389–398.

Carvalho Junior, A., & Nunes, R. (2022). Políticas fiscais para a economia de baixo carbono na China. **Revista de Economia e Meio Ambiente**, 14(2), 45–63.

CARVALHO, A. **Hidrelétricas e turbinas hidráulicas: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

CARVALHO, M.; LIMA, J. **Impactos socioambientais das hidrelétricas no Brasil**. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2021.

CAVALIERO, C. **Energias renováveis e sustentabilidade econômica**. São Paulo: Annablume, 2005.

CELESC. **Histórico da Regulação do Setor Elétrico Brasileiro**. Florianópolis: CELESC, 2012.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). **The World Factbook**. Washington, D.C.: Central Intelligence Agency, 2014.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2008.

CCEE – **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. Relatório Anual de Energia. Brasília: CCEE, 2020.

CHEN, Y. **China's Economic Transition: Challenges and Opportunities**. Beijing: China Economic Press, 2023.

Chen, H., Zhang, Y., & Wang, L. (2022). **Air pollution and energy efficiency in China: Impacts and mitigation strategies**. *Environmental Science & Policy*, 133, 1–12.

China (2017). **Constitution of the Communist Party of China**, 19th National Congress. Beijing: CPC Central Committee.

China Water Risk (2022). **The state of water resources in China**. Beijing: China Water Risk Report.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Funcionamento das Usinas Hidrelétricas**. Belo Horizonte: CEMIG, 2020.

CISEKI, K. **Educação e desenvolvimento econômico na China**. Pequim: China Social Sciences Press, 2012.

COUTO, H. **História da China: da Antiguidade à República Popular**. Rio de Janeiro: FGV, 2008.

Crijns-Graus, W., Van Sark, W., & Faaij, A. (2022). **Clean energy patent trends in China: 2000–2020**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112-178.

DA SILVA JÚNIOR, R. Fontes alternativas de energia e sustentabilidade ambiental. **Revista de Energia Limpa**, v. 3, n. 1, p. 22-37, 2008.

DOLAND, J. **Hydroelectric Power Plants Design**. New York: McGraw-Hill, 1954.

Elton, J. (2022). **Global renewable energy capacity: Wind and solar growth**. *International Energy Review*, 28(3), 12–27.

Ember. (2024). **Data Explorer: Electricity generation by source**.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2020. Brasília: EPE, 2020.

ENERGIA LIMPA. **Panorama da Matriz Energética Brasileira**. São Paulo: Energia Limpa, 2020.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. Balanço Energético Nacional 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

Espinosa, P., & Melgar, A. (2023). **Grid modernization for renewable integration in Latin America**. *Energy Reports*, 9, 310–329.

EUROPEAN UNION. **China-EU Business Summit Speech by Wen Jiabao**. Nanjing: European Union, 2009.

FAROLE, T. **Special Economic Zones in China: Drivers of Growth and Policy Lessons**. Washington, DC: World Bank, 2011.

Gallagher, K., Bhandary, R., & Kong, Y. (2021). **China's international energy investment and climate diplomacy**. *Global Environmental Politics*, 21(4), 1–25.

Gao, W., Li, X., & Zhang, H. (2022). Green credit policies and renewable energy financing in China. *Journal of Environmental Management*, 310, 114755.

GOOGLE. **Gemini**. 2025. Disponível em: <https://gemini.google.com/>.

GRANGEIRO, L. S. **A energia eólica no Estado do Ceará: avanços e desafios**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2012.

GWEC (2022). **Global wind report 2022**. Brussels: Global Wind Energy Council.

Guerrero, C. (2021). **Natural gas as a transitional fuel in Latin America**. *Energy Research & Social Science*, 78, 102-115.

GUIMARÃES NETO, J. R.; VIEIRA, M. E. **Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Nordeste brasileiro**. Recife: Ed. Universitária, 2009.

GUO, L.; TANG, X. **Regional Inequalities and Social Inclusion in China**. Shanghai: Fudan University Press, 2021.

HAN, H.; WANG, J. **Performance management and environmental governance in China**. *Regional Governance*, 2023.

Hansen, J. (2019). **Ecological civilization as a political philosophy in China**. *China Quarterly*, 238, 101–123.

Hansen, H., Li, F., & Svarverud, R. (2018). **Sociotechnical imaginaries and China's ecological civilization**. *Environmental Politics*, 27(3), 455–475.

Hawkins, S., & Cheung, L. (2023). **China's renewable energy manufacturing dominance**. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101-120.

Henze, M. (2020). **Global wind turbine manufacturers: Market analysis**. *Renewable Energy Reports*, 12(1), 1–15.

Hilton, I.; Kerr, R. **Technology transfer and renewable energy cooperation between China and Latin America**. *Energy Research & Social Science*, v. 20, p. 101-115, 2016.

Hochstetler, K., & Milkoreit, M. (2015). **China and climate governance: Responsibilities and opportunities**. *Global Environmental Politics*, 15(4), 1–18.

HOTELLING, H. The Economics of Exhaustible Resources. **Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137–175, 1931.

HUA, J.; MA, R. **Environmental Sustainability in Chinese Urban Development**. *Environmental Studies*, v. 45, n. 2, p. 112-130, 2022.

IBAMA – **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Licenciamento ambiental de empreendimentos hidrelétricos. Brasília: IBAMA, 2023.

IEA (2022). **Renewable energy market report**. Paris: International Energy Agency.

IEA – **International Energy Agency**. *Hydropower Market Report 2023*. Paris: IEA, 2023.

IHA – **International Hydropower Association**. **Hydropower Status Report 2024**. Londres: IHA, 2024

IEA. (2021). **World Energy Outlook 2021**. Paris: International Energy Agency.

IEA. (2022c). **Tracking Clean Energy Innovation: Focus on China**. Paris: International Energy Agency.

IEA. (2023b). **Renewable Energy Market Analysis: Latin America 2023**. Paris: International Energy Agency.

IEA. (2024). **World Energy Investment 2024**. Paris: International Energy Agency.

IAE – **International Energy Agency**. *World Energy Outlook 2018*. Paris: OECD/IEA, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2010*. Paris: International Energy Agency, 2010.

IPEA. **Matriz Energética Brasileira: Desafios e Perspectivas**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.

IPECE – **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará**. *Perfil Socioeconômico do Ceará*. Fortaleza: IPECE, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2005*. Paris: OECD/IEA, 2005.

JABBOUR, E. et al. **China's conciliation between economic growth and environmental sustainability**. *Revista de Economia Política*, 2024.

Jinnah, S. (2017). **Differentiated responsibilities in climate negotiations**. *Climate Policy*, 17(1), 1–15.

Kong, Y., & Gallagher, K. (2020). **China's policy banks and global renewable energy finance**. *Energy Research & Social Science*, 70, 101679.

Lampis, A., Torres, M., & Fernández, D. (2022). **Energy transition in Latin America: Trends in renewables and gas**. *Renewable Energy*, 190, 1031–1045.

Lins, M., & Mascotte, F. (2020). **Regional energy integration in South America**. *Energy Policy*, 140, 111-123.

Li, X. (2016). **China-US climate agreements: A new era in cooperation**. *Energy Policy*, 96, 1–10.

Liu, J., Liu, M., & Zhang, F. (2020). **Land degradation and soil loss in China**. *Land Use Policy*, 99, 104892.

LI, P.; CHEN, S. High-Quality Growth and Green Economy in China. **Journal of Chinese Economic Studies**, v. 12, n. 1, p. 23-41, 2023.

LIMA, A.; VIANA, M. **Fundamentos de economia: produção e crescimento**. São Paulo: Saraiva, 2010.

LIN, H.; WANG, M. From Agriculture to Industry: Economic Transformation in China. **Journal of Asian Economics**, v. 68, p. 1-18, 2020.

LIU, Q.; WANG, Y. **Renewable Energy Investments and Climate Policies in China**. *Energy Policy*, v. 150, p. 112-125, 2024.

LIU, Z. et al. **The intersection of economic growth and environmental sustainability in China: Pathways to achieving SDG**. *Energy Strategy Reviews*, v.55, 101530, 2024.

Losekann, M.; Tavares, F. **Bioenergy development in Brazil: Trends and prospects**. *Renewable Energy*, v. 134, p. 1154-1165, 2019.

MACÊDO JÚNIOR, J. R. et al. **Potencial eólico e desenvolvimento regional no Ceará**. Fortaleza: UFC, 2010.

MACINTYRE, A. **Máquinas de Fluxo**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

Martínez, J. **Socioeconomic challenges to energy transition in Latin America**. *Energy Reports*, v. 9, p. 2131-2145, 2023.

MATHEWS, John A. **Greening of Capitalism: How Asia is Driving the Next Great Transformation**. Stanford: Stanford University Press, 2011.

MEDEIROS, C. **China e o crescimento liderado pelas exportações**. Brasília: IPEA, 2010.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. **A review on solar energy use in industries**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 1777–1790, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (MME/EPE). Plano Nacional de Energia 2030. Brasília: MME/EPE, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (MME/EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2021. Brasília: MME/EPE, 2012.

MME – **Ministério de Minas e Energia**. Relatório de Gestão Energética Nacional 2024. Brasília: MME, 2024.

Myllyvirta, L. **China's coal consumption and global climate implications**. Helsinki: Center for Research on Energy and Clean Air, 2023.

NETHERLANDS ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY (NEAA). Netherlands Environmental Assessment Agency Report. Haia: NEAA, 2007.

Nurton, J. (2020). **China's renewable energy patent surge**. *Renewable Energy World*, 24(2), 15–21.

(2015). Promoting the development of ecological civilization. **Opinions of the Central Committee of the CPC and the State Council** Beijing: Central Government Publications.

Pablo-Romero, M., Sanchez-Braza, A., & Romero, C. (2022). **Renewable energy deployment in Latin America: Policy and progress**. *Renewable Energy*, 185, 205–220.

PEREIRA, E. B. **Energia solar: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM (PRIS). Power Reactor Information System. Viena: International Atomic Energy Agency, 2013.

PUTNAM, P. **Power from the Wind**. New York: Van Nostrand, 1948.

PwC. **China renewable energy policies and incentives**. PricewaterhouseCoopers, 2023.

- Queiroz, A., & Nogueira, J. (2021). **Innovation and renewable energy in China: Implications for global energy markets.** *Energy Economics*, 102, 105-118.
- RAMOS, R.; SILVA, C. **Turbinas Hidráulicas: teoria e prática.** Porto Alegre: Ed. Universitária, 2009.
- REN21 (2022). **Renewables 2022 Global Status Report.** Paris: REN21 Secretariat.
- SANDRONI, J. **Economia de escala e produtividade industrial.** São Paulo: Pioneira, 1999.
- SANTOS, R.; OLIVEIRA, C. Geração distribuída e inovação no setor elétrico brasileiro. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 1, 2021.
- SCHREIBER, H. **Turbomáquinas Hidráulicas.** Rio de Janeiro: LTC, 1978.
- Shue, H. (1999). **Global environment and international inequality.** *International Affairs*, 75(3), 531–545.
- Shen, Y., Li, Q., & Zhang, H. (2023). **Regional disparities in China's energy transition.** *Energy Policy*, 177, 112-130.
- Shen, W. (2016). **China's Ministry of Ecology and Environment: Structure and mandate.** *Environmental Policy and Governance*, 26(6), 447–458.
- Springer, C., & Shi, X. (2021). **Hydropower, climate change, and social impacts in China.** *Energy Policy*, 149, 112023.
- Springer, C., Shi, X., & Kudrimoti, S. (2022). **Policy conflicts in China's environmental governance.** *Environmental Politics*, 31(2), 345–365
- SHEPHERD, D. **Historical Development of Wind Energy Technology.** *Journal of Wind Engineering*, v. 18, p. 112–128, 1994.
- SIMAS, M. **Panorama e Perspectivas da Energia Eólica no Brasil.** Brasília: Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE), 2012.
- SILVA, E.; COSTA, R. **Energia e desenvolvimento sustentável no Brasil.** Belo Horizonte: UFMG, 2021.
- SILVA, J.; SOUZA, M. Histórico e evolução da energia hidráulica no mundo. **Revista Engenharia e Sustentabilidade**, v. 15, n. 3, 2020.
- SIMONE, C. **Estudos Hidroenergéticos e Evolução de Turbinas Francis.** Curitiba: UTFPR, 2013.
- SPENCE, Jonathan D. **The Search for Modern China.** 3. ed. Nova York: W. W. Norton & Company, 2011.

STERN, N.; XIE, C. **Embracing the New Paradigm of Green Development in China**. LSE Grantham Institute, 2023.

THE GUARDIAN. **China tops renewable energy investment**. Londres: The Guardian, 2011.

THE PEW CHARITABLE TRUSTS. **Who's Winning the Clean Energy Race?**. Washington, D.C.: The Pew Charitable Trusts, 2012.

UNCTAD (2022). **World Investment Report 2022: China's FDI performance**. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development

UNCTAD. **China's energy transition and strategic policies**. Geneva: United Nations, 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Green Economy Report. Nairóbi: United Nations Environment Programme, 2011.

UNIVERSIDADE DA FLÓRIDA (UF/IFAS). **Jatropha Curcas for Biofuel Production**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, 2014.

VALLÊRA, A. M. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2006.

VIEIRA, C. S. O desenvolvimento das células solares e a revolução energética do século XXI. **Revista Energia e Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 10–25, 2013.

WANG, L. et al. **Hydraulic Design of Francis Turbines**. Beijing: Springer, 2012.

WANG, T.; ZHENG, L. **Social Policies and Sustainable Development in China**. *Social Policy Review*, v. 30, n. 3, p. 55-73, 2022.

WEF (2021). **Global renewable energy investment report 2021**. Geneva: World Economic Forum.

WILLIAM, J. **Natural Resource Economics: Principles and Applications**. Cambridge: MIT Press, 2004.

WORLDWATCH INSTITUTE. **Renewables 2007 Global Status Report**. Washington, D.C.: Worldwatch Institute, 2007.

WORTHY, B. **Energy Economics: A Modern Approach**. Oxford: Oxford University Press, 2011.

WWEA. **World Wind Energy Report 2012**. Bonn: World Wind Energy Association, 2012.

World Bank. **China Economic Update – Unlocking Consumption**. Washington, D.C: World Bank Group, 2025.

World Bank. **China Energy Sector Review 2020**. Washington, D.C.: World Bank Group, 2020.

Yang, L.; et al. **Regional disparities in China's renewable energy adoption**. Energy Reports, v. 9, p. 1005-1017, 2023.

XINHUA NEWS AGENCY. **China's National Climate Change Programme**. Pequim: Xinhua News Agency, 2007.

ZENG, J. Chinese view of global economic governance, Third World Quarterly, 2019.