



ENGEMA – CONSÓRCIO DOUTORAL

Título: Precificação do Carbono em Energia Eólica: Uma Análise Comparativa entre a Alemanha e a América Latina e Caribe.

Doutoranda: Mirela Cavalcante Colares

E-mail: mirela_colares@yahoo.com.br/mirelacolares@gmail.com

Contato: (62) 9.8275.5621

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONTABILIDADE – UFSC

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Flach

RESUMO

A precificação do carbono é um mecanismo fundamental para incentivar a transição para uma economia de baixo carbono, atribuindo um valor monetário às emissões de gases do efeito estufa (GEE). Diante disso, o objetivo geral da tese é estimar a precificação do carbono, considerando fatores endógenos e exógenos, e analisar as diferentes abordagens de políticas climáticas e seus efeitos nos instrumentos de precificação na Alemanha e nos países da América Latina e Caribe. Para tanto, a tese é composta por três estudos. O primeiro tem por objetivo estimar a precificação do carbono com fatores endógenos e exógenos. O segundo estudo tem por objetivo diferenciar as abordagens de políticas climáticas entre a Alemanha e os países da América Latina e Caribe. O terceiro estudo tem o objetivo de examinar os efeitos das políticas climáticas na instrumentalização da precificação do carbono. Consequentemente, a tese explora os fatores endógenos e exógenos e a estimação da precificação do carbono com ênfase nos fatores (estudo 1), políticas climáticas e suas diferenciações entre os países (estudo 2) e instrumentos de precificação do carbono e os efeitos das políticas climáticas na instrumentalização da precificação do carbono entre os países (estudo 3). A fundamentação percorre principalmente a literatura de Precificação do Carbono, de Políticas Climáticas e Instrumentos de Precificação, com as respectivas facetas conforme o objetivo de cada estudo. A Teoria das Opções Reais (TOR) é utilizada como base teórica para entender a dinâmica complexa dos investimentos em energia eólica, considerando a incerteza sobre preços e decisões de investimento. A metodologia desta pesquisa abrangerá o uso de modelos de machine learning, Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machine (SVM), e Xtreme Gradient Boosting (XGBoost) na mensuração de fatores endógenos e exógenos que impactam a precificação de carbono, nas políticas climáticas e nos instrumentos de precificação, comparando dados de países da América Latina e Caribe, com dados de 2000 a 2024, levando em consideração a justificativa do período devido à implementação da Lei de Energias Renováveis (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG), ocorrida em 2000. Os dados foram coletados em xxxx. Os dados dos estudos 1, 2 e 3 foram analisados xxx. Os resultados do estudo 1 apontam que xxx. Os resultados do estudo 2 apontam que xxx. E os resultados do estudo 3 apontam que xxx. Os achados dos três estudos confirmam a tese de que xxx. Implicações teóricas, práticas e sociais decorrem dos achados da pesquisa, xxxx. Os achados fornecem insights para que novas pesquisas adentrem nos temas investigados.

Palavras-chave: Precificação de carbono. Energia Eólica. Fatores endógenos e exógenos. Políticas climáticas. Instrumentos de precificação. *Machine Learning*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo teórico da Tese.....	
Figura 2 - Estudo 1: Modelo teórico	
Figura 3 - Estudo 2: Modelo teórico.....	
Figura 4 - Estudo 3: Modelo teórico	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos apresentados na tese

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	xxx
2 ESTIMANDO A PRECIFICAÇÃO DO CARBONO EM ENERGIA EÓLICA ALÉM DAS FRONTEIRAS.....	xxx
2.1 INTRODUÇÃO	xxx
2.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES.....	xxx
2.2.1 Fatores endógenos e exógenos.....	xxx
2.2.2 Estimação da Precificação do Carbono com ênfase nos fatores endógenos e exógenos.....	xxx
2.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	xxx
2.3.1 População e Amostra	xxx
2.3.2 Variáveis da Pesquisa	xxx
2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	xxx
2.5 CONCLUSÃO	xxx
REFERÊNCIAS	xxx
3 UM MOSAICO DE SOLUÇÕES: AS DIFERENTES ABORDAGENS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS EM ENERGIA EÓLICA PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	xxx
3.1 INTRODUÇÃO	xxx
3.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES.....	xxx
3.2.1 Políticas Climáticas	xxx
3.2.1.1 Políticas de Mitigação e Políticas de Adaptação	xxx
3.2.2 Diferenciação das abordagens de Políticas climáticas entre os países.....	xxx
3.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	xxx
3.3.1 Amostra da pesquisa	xxx
3.3.2 Variáveis da Pesquisa	xxx
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	xxx
3.5 CONCLUSÃO	xxx
REFERÊNCIAS	xxx
4 DIFERENTES CAMINHOS: EXAMINANDO OS EFEITOS DAS POLÍTICAS CLIMÁTICAS EM ENERGIA EÓLICA NA INSTRUMENTALIZAÇÃO DA PRECIFICAÇÃO DO CARBONO	xxx
4.1 INTRODUÇÃO	xxx
4.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES.....	xxx
4.2.1 Instrumentos de Precificação do Carbono.....	xxx
4.2.1.1 Instrumento de Tributação do Carbono.....	
4.2.1.2 Instrumento de Emissions Trading System (ETS).....	
4.2.1.3 Instrumento de Mecanismo de Crédito de Carbono.....	

4.2.2 Efeitos das Políticas Climáticas dos países na instrumentalização da Precificação do Carbono.....	xxx
4.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	xxx
4.3.1 População, Amostra e Período.....	xxx
4.3.2 Variáveis da Pesquisa	xxx
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	xxx
4.5 CONCLUSÃO	xxx
REFERÊNCIAS	xxx
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	xxx
REFERÊNCIAS DA TESE	xxx

1 Introdução

A precificação do carbono incentiva a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) e promove a adoção de tecnologias e práticas mais sustentáveis, conforme apontam Clausing e Wolfram (2023). Trata-se de um mecanismo político e econômico nos mercados de carbono usado por governos na definição de estratégia climática para atribuir um valor monetário às GEE, comumente expresso em toneladas de CO₂ equivalente (Clausing & Wolfram, 2023). A atribuição de um valor monetário às emissões de GEE, incentiva mudanças na transição para uma economia de baixo carbono, nos padrões de produção, consumo e investimento (Kanda & Carvalho, 2023). O Banco Mundial e a Agência Europeia do Ambiente monitoram e divulgam os preços do carbono em diversos países (Clausing & Wolfram, 2023).

Esta tese trata da precificação do carbono na energia eólica, abordando três questões principais. A primeira diz respeito à estimação do preço do carbono, considerando os fatores endógenos e exógenos, tanto ambientais quanto econômicos e sociais (Kanda & Carvalho, 2023). A segunda, às políticas climáticas e à interação entre as políticas de mitigação e as políticas de adaptação às mudanças climáticas (Oliveira, 2009). Por fim, a pesquisa aborda os instrumentos de precificação de carbono, com base em Kossoy et al. (2015). Assim, esta tese explora a questão da precificação do carbono adotando a Teoria das Opções Reais (TOR) e explicando as suposições da teoria.

A precificação do carbono busca internalizar os custos ambientais das emissões, que são tipicamente externalizados para a sociedade (Nicolletti & Lefèvre, 2016). A estimação do preço do carbono, embora essencial para a implementação de políticas climáticas eficazes, enfrenta desafios relacionados à incerteza dos custos, benefícios e resultados da redução das emissões de gases de efeito estufa (Hong & Karp, 2014). Esses desafios, associados aos fatores endógenos e exógenos, tendem a afastar países avessos ao risco da participação ativa (Hong & Karp, 2014). A estimativa do preço do carbono depende tanto de fatores endógenos, como custos de investimento, custos de manutenção, vida útil, potencial tecnológico e disponibilidade de recursos quanto de fatores exógenos, como taxas de juros, taxas de aquecimento urbano, que são determinados pelo ambiente macroeconômico e fundamental para a tomada de decisão (Li & Maréchal, 2023).

Políticas climáticas são um conjunto de ações, leis e regulamentações implementadas por governos em todos os níveis (local, nacional e internacional) com o objetivo de mitigar e adaptar-se às mudanças climáticas (Edenhofer, 2015). As políticas climáticas englobam tanto as medidas de mitigação quanto as de adaptação. A integração dessas políticas é fundamental para fortalecer as ações climáticas (Oliveira, 2009). As políticas de mitigação possuem uma trajetória mais consolidada devido a um longo histórico de implementação e apoio governamental, ao contrário das políticas de adaptação que ganharam proeminência recentemente, impulsionadas pela crescente preocupação com os impactos das mudanças climáticas (Oliveira, 2009). Dessa forma, políticas climáticas mais abrangentes facilitam a adesão a acordos internacionais (Bättig & Bernauer 2009; Böhmelt et al. 2016). Além disso, consideram que a heterogeneidade dos impactos climáticos e das capacidades adaptativas entre diferentes regiões exigem abordagens específicas e investimentos em infraestrutura adaptável (McGranahan et al., 2007).

A precificação de carbono pode ser implementada por meio dos seguintes instrumentos, tais como: (i) o imposto sobre o carbono, que estabelece um custo fixo por tonelada de CO₂ emitida; (ii) o sistema de comércio de emissões (SCE), que cria um mercado de licenças negociáveis; e (iii) o mecanismo de crédito de carbono, que permite a geração e negociação de créditos por meio de projetos de redução de emissões (World Bank, 2023). Apesar de suas diferentes estruturas, esses instrumentos demonstram equivalência funcional, conferindo aos agentes econômicos a flexibilidade de reduzir suas emissões ou adquirir os direitos de emissão correspondentes ou adquirir os direitos de emissão correspondentes, internalizando assim os custos ambientais associados à poluição por carbono (Lefevre & Breviglieri, 2022). O desafio para a aprovação e preservação dos instrumentos de precificação de carbono, é a aceitabilidade política (Funke & Mattauch, 2018).

A precificação do carbono se fundamenta no conceito de opções reais, preconizado pela Teoria das Opções Reais (TOR), em que a valorização da flexibilidade nas decisões de investimento tende a ser impulsionada por técnicas das opções financeiras (Schachter & Mancarella, 2016). Para compreender a dinâmica complexa dos investimentos em energia eólica, a abordagem de TOR é melhor aplicada, pois leva em consideração a incerteza sobre preços quanto às decisões de investimentos e redução de custos (Gazheli & Van den Bergh, 2018). Portanto, a TOR sustenta o estudo por se tratar de uma ferramenta de investimento que foi proposta para lidar especificamente com o planejamento de investimentos sob incerteza (Schachter & Mancarella, 2016).

Esta tese aborda a seguinte questão de pesquisa: **Qual a influência dos fatores endógenos e exógenos na estimação da precificação do carbono, considerando as diferentes abordagens de políticas climáticas e seus efeitos nos instrumentos de precificação, na Alemanha e nos países da América Latina e Caribe?**

O objetivo geral é estimar a precificação de carbono com fatores endógenos e exógenos para diferenciar as abordagens de políticas climáticas e os seus efeitos nos instrumentos de precificação do carbono da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe. A partir do objetivo geral, formularam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) estimar a precificação de carbono com fatores endógenos e exógenos da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe;
- b) diferenciar as abordagens de políticas climáticas da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe, na transição energética; e
- c) examinar os efeitos das políticas climáticas na instrumentalização de precificação do carbono da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe.

A Figura 1 apresenta o modelo teórico da tese, orientado pelos objetivos geral e específicos deste estudo.

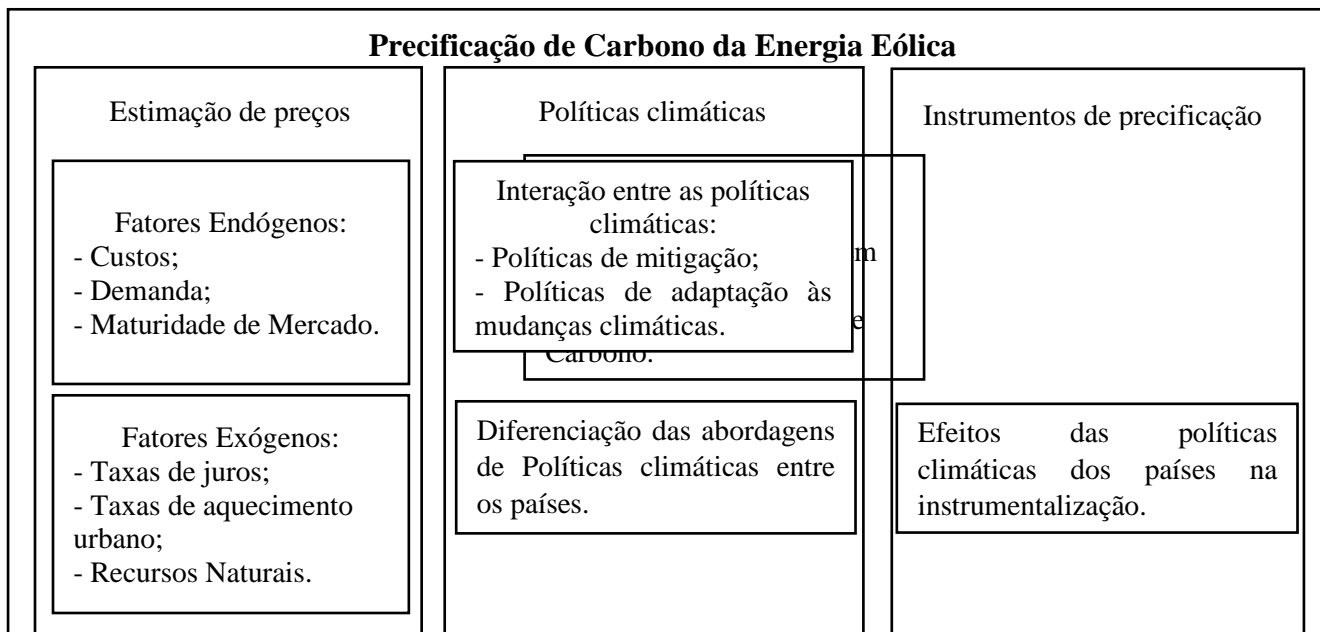


Figura 1. Modelo teórico da tese

Fonte: Elaborada pela autora

A precificação de carbono em energia eólica é a base para os três estudos apresentados nesta tese, que se propõe a estudar a precificação de carbono em energia eólica por meio de estimativas de preços, com o objetivo de contribuir para a melhoria e/ou formulação de políticas climáticas e, conseqüentemente, auxiliar na escolha do instrumento de precificação mais adequado às circunstâncias de negócios e investimentos. Tendo como base teórica a TOR, considera-se que as opções de investimento dos investidores privados podem ser melhor compreendidas a partir das decisões políticas climáticas e dos diferentes instrumentos de precificação (Kitzing et al., 2017).

No primeiro estudo, a estimação da precificação de carbono em energia eólica consiste na identificação e investigação dos fatores endógenos e exógenos, associados para prever a precificação com modelo de *machine learning*. Os fatores endógenos e exógenos, por sua vez, contribuem para o equilíbrio dos mercados, caracterizados por preços que ajustam todos os mercados; por agentes que estão sujeitos a restrições orçamentárias; e pelo nível total de emissões que atenda à meta de redução de emissões (Franco et al., 2022). Presume-se que os fatores endógenos e exógenos em energia eólica estão em tendência de crescimento nas participações de mercado (Gowrisankaran et al., 2011; Lamont, 2008; Mills & Wiser, 2012; Nicolosi, 2012).

No segundo estudo explora-se a interação entre as políticas climáticas, considerando as políticas de mitigação e políticas de adaptação e suas diferenciações. Que em decorrência de indefinições quanto às questões de segurança energética, a mitigação dos efeitos da emissão dos GEE e a adaptação tornaram a energia eólica uma fonte de energia competitiva e sustentável. (Fischlein et al. 2010). E reforçar que os fatores sociopolíticos podem reduzir a distância que existe entre a concepção de políticas climáticas energéticas de baixa emissão de carbono e a respectiva implantação de tecnologias de energias renováveis para mitigação e adaptação dos efeitos das mudanças climáticas (Fischlein et al. 2010). A incerteza sobre as políticas climáticas energéticas associadas a acordos de compra de energia ampliam significativamente os riscos dos investimentos, provocando a desaceleração dos investimentos (Barradale, 2010).

No terceiro estudo, considera o exame dos efeitos das políticas climáticas na instrumentalização da precificação do carbono, tais como: Tributação do Carbono, Emissions Trading System (ETS) e Mecanismo de Crédito de Carbono entre a Alemanha e os países da América Latina e Caribe. A maneira mais eficiente para reduzir emissões é através da tributação direta de emissões (Aldy & Stavins, 2012; Aldy, 2015; Edenhofer et al., 2015; Schmalensee & Stavins, 2015). A perspectiva do uso de créditos de carbono concedidos para reduções genuínas de carga de carbono poderia ser criada por meio da iniciativa privada (Mathews, 2008). Com isso, presume-se sobre a importância dos instrumentos de política, que incluiriam desde a Tributação de Carbono, Sistema de Comércio de Emissões, Crédito de Carbono até a sua regulamentação direta (Van den Bergh *et al.*, 2021).

A escolha metodológica desta pesquisa de tese baseia-se na classificação proposta em adotar uma abordagem funcionalista e epistemologia positivista. Essa escolha permite uma análise objetiva e mensurável dos fatores endógenos e exógenos para a estimação da precificação do carbono em energia eólica, a identificação de relações causais para a construção de políticas climáticas, com ênfase nas políticas de mitigação e de adaptação e a identificação dos efeitos das políticas climáticas nos instrumentos de precificação de carbono

na Alemanha e na América Latina e Caribe, com destaque para a utilização de métodos nomotéticos e o foco na generalização dos resultados, justifica a escolha por esta perspectiva teórica (Burrell & Morgan, 1979)

Como motivação para a pesquisa, busca-se expandir o conhecimento e contribuir para a agenda de debates do Núcleo de Estudos sobre Trabalho e Ensino em Contabilidade (NETEC), criado pelo prof. Dr. Leonardo Flach, do Programa de Pós-Graduação em Contabilidade da UFSC. Além disso, pretende-se aprofundar o conhecimento sobre sustentabilidade, com ênfase na precificação de carbono de energias renováveis, considerando inicialmente as energias eólicas, as políticas climáticas e os instrumentos de precificação de carbono.

Com isso, sob a ótica da Teoria das Opções Reais, a tese pretende demonstrar que, mesmo diante de um cenário de incertezas quanto aos fatores endógenos e exógenos que influenciam na estimação da precificação do carbono em energia eólica, uma estimativa precisa é fundamental para a tomada de decisões sobre políticas climáticas. Assim, pode-se refletir em futuras melhorias e/ou implantações nas políticas climáticas, que, como consequência, têm efeito sobre uma melhor escolha do instrumento de precificação para o carbono em energia eólica. A estimação da precificação de carbono, melhorias e/ou implantações de políticas climáticas e instrumentos de precificação podem ser melhor compreendidas e gerenciadas ao se aplicar a Teoria das Opções Reais.

A presente tese possui contribuições para a literatura, prática e social. Para a literatura, a relevância da justificativa teórica para este estudo pode ser vista na falta de pesquisas sobre precificação de carbono. E embora alguns pesquisadores tenham se interessado em analisar os múltiplos fatores externos que influenciam a precificação de carbono, considerando-os como diversos elementos a serem levados em conta (Feng, Duan, Wang, Zhang & Ma, 2023). Outros autores enfatizam a significativa falta de pesquisas, em termos de fornecer um método para prever as futuras emissões de carbono, utilizando modelos de *machine learning* ((ML) (Shahzad, Sengupta, Rao & Cui, 2023). Considerando os progressos significativos do ML, há limitações em pesquisas sobre a aplicação sistemática do ML em sistemas de energia renovável para prever o preço da eletricidade (Li & Maréchal, 2023).

As justificativas práticas e sociais para o desenvolvimento deste estudo de tese foram baseadas nas premissas e relevância de que a Alemanha se destaca como modelo exemplar na transição para uma matriz energética mais sustentável por meio da Lei de Energias Renováveis - Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), implementada em 2000. E por considerar que todas as fontes de energia têm algum grau de poluição ou impacto ambiental, permitindo ao país promover uma mudança gradual e estratégica de fontes convencionais para fontes com menor impacto ambiental (EEG, 2018). O Brasil, por sua vez, apresenta diversas vantagens, como sua localização geográfica privilegiada e a abundância de recursos naturais. Além da Floresta Amazônica, o país possui um vasto litoral com potencial para geração de energia eólica e solar. Isso o torna capaz de ter um retorno satisfatório sobre o investimento em energia eólica, oferecendo expertise para que a Alemanha tenha acesso à energia renovável, evitando a escassez que outrora sofre. Além disso, o Brasil pode potencialmente se tornar um grande player no mercado de créditos de carbono, vendendo seus excedentes para outros países. Outro ponto justificável seria o quanto o Brasil poderia contribuir para a Alemanha, considerando que eles têm sofrido com a escassez de fornecimento de energia, tendo sido relevante e com destaque com a invasão da Ucrânia pela Rússia, ao que se tornou necessário buscar resolver esse problema urgentemente.

A tese está organizada em cinco capítulos, iniciando por esses aspectos introdutórios. Na sequência, têm-se, respectivamente, os estudos 1, 2 e 3, cada um composto por introdução, fundamentação teórica, procedimentos metodológicos, análise e discussão dos resultados, conclusões e implicações. O quinto capítulo apresenta as conclusões da tese, além de aspectos

gerais da interconexão dos três estudos. A Tabela 1 exibe o campo de estudo, título, o objetivo, amostra e técnicas de dados período amostral e fonte de dados dos 3 estudos.

	Estudo 1 (Capítulo 2)	Estudo 2 (Capítulo 3)	Estudo 3 (Capítulo 4)
Campo de estudo:	Energia Eólica	Energia Eólica	Energia Eólica
Título:	Estimando a Precificação do Carbono em Energia Eólica além das Fronteiras.	Um Mosaico de Soluções: As diferentes abordagens de Políticas Climáticas em Energia Eólica para a Transição Energética.	Diferentes caminhos: Efeitos das Políticas Climáticas em Energia Eólica na instrumentalização da Precificação do Carbono.
Objetivo:	Estimar a precificação de carbono com fatores endógenos e exógenos da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe.	Diferenciar as abordagens de políticas climáticas da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe, na transição energética.	Examinar os efeitos das políticas climáticas na instrumentalização de precificação do carbono da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe.
Amostra e técnica de análise de dados:	Fatores endógenos e exógenos. <i>Machine learning (ML)</i> .	Leis e regulamentações, Programas e projetos; e Planos nacionais de energia. <i>Machine learning (ML)</i> .	Políticas climáticas e Instrumentos de Precificação. <i>Machine learning (ML)</i> .
Período amostral:	2000 a 2024	2000 a 2024	2000 a 2024
Fonte de dados:	Refinitiv; Bases de dados internacionais (ex: Banco Mundial, Our World in Data); Agências nacionais de energia; Empresas de energia eólica (ex: relatórios anuais); Associações do setor (ex: ABEEólica); Publicações acadêmicas e artigos científicos.	Refinitiv; Relatórios de projetos, Bancos de dados de projetos de energia renovável, Agências reguladoras; Diários oficiais, Sites governamentais, Bases de dados legislativas. Publicações acadêmicas e artigos científicos.	Refinitiv; Bases de dados internacionais (ex: Banco Mundial, Our World in Data); Agências nacionais de energia; Empresas de energia eólica (ex: Relatórios anuais); Associações do setor (ex: ABEEólica); Publicações acadêmicas e artigos científicos.

Tabela 1 - Artigos apresentados na tese

Fonte: Elaborado pela autora.

2 Estudo 1: Estimando a Precificação do Carbono em Energia Eólica além das Fronteiras.

Resumo:

Estimar a precificação de carbono com fatores endógenos e exógenos da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe... Aos dados coletados aplica-se a técnica de *machine learning*....Os resultados mostram....Conclui-se que...Os resultados do estudo implicam....

Palavras-chave: Energia Eólica. Estimção de Precificação de Carbono. Fatores endógenos. Fatores exógenos.

2.1 INTRODUÇÃO

2.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES

2.2.1 Fatores endógenos e exógenos

2.2.2 Estimação da Precificação do Carbono com ênfase nos fatores endógenos e exógenos

H1: A estimação do preço de carbono é influenciada por uma combinação de fatores endógenos e exógenos, sendo a relevância de cada fator variável entre países.

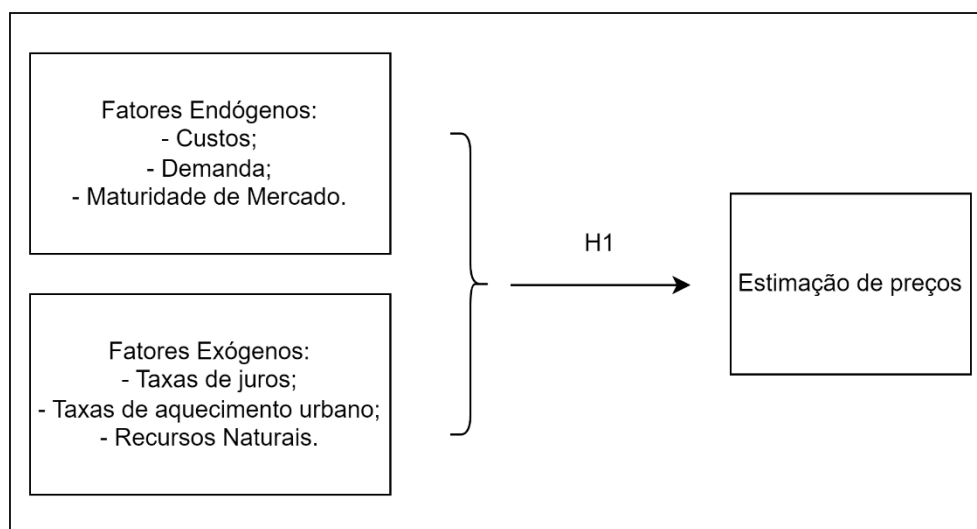


Figura 2. Estudo 1: Modelo teórico

Fonte: Elaborada pela autora

3 Estudo 2: Um Mosaico de Soluções: As diferentes abordagens de Políticas Climáticas em Energia Eólica para a Transição Energética.

Resumo:

Diferenciar as abordagens de políticas climáticas da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe, na transição energética.... Aos dados coletados aplica-se a técnica Os resultados mostram....Conclui-se que... Os resultados do estudo implicam....

Palavras-chave: Energia Eólica. Políticas de Mitigação. Políticas de Adaptação. Transição Energética.

3.1 INTRODUÇÃO

3.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES

3.2.1 Políticas Climáticas

3.2.1.1 Políticas de Mitigação e Políticas de Adaptação

3.2.2 Diferenciação das abordagens de Políticas climáticas entre os países

H1a: Existe interação entre as abordagens das políticas climáticas: políticas de mitigação e políticas de adaptação na Alemanha.

H1b: Existe interação entre as abordagens das políticas climáticas: políticas de mitigação e políticas de adaptação nos países da América Latina e Caribe.

H2a: A interação entre as políticas de mitigação é mais avançada na Alemanha do que nos países da América Latina e Caribe.

H2b: A interação entre as políticas de adaptação é mais avançada na Alemanha do que nos países da América Latina e Caribe.

H3a: A interação entre as políticas de mitigação é mais avançada nos países da América Latina e Caribe do que na Alemanha.

H3b: A interação entre as políticas de adaptação é mais avançada nos países da América Latina e Caribe do que na Alemanha.

H4a: Há relação positiva das abordagens de Políticas climáticas entre os países.

H4b: Há relação negativa das abordagens de Políticas climáticas entre os países.

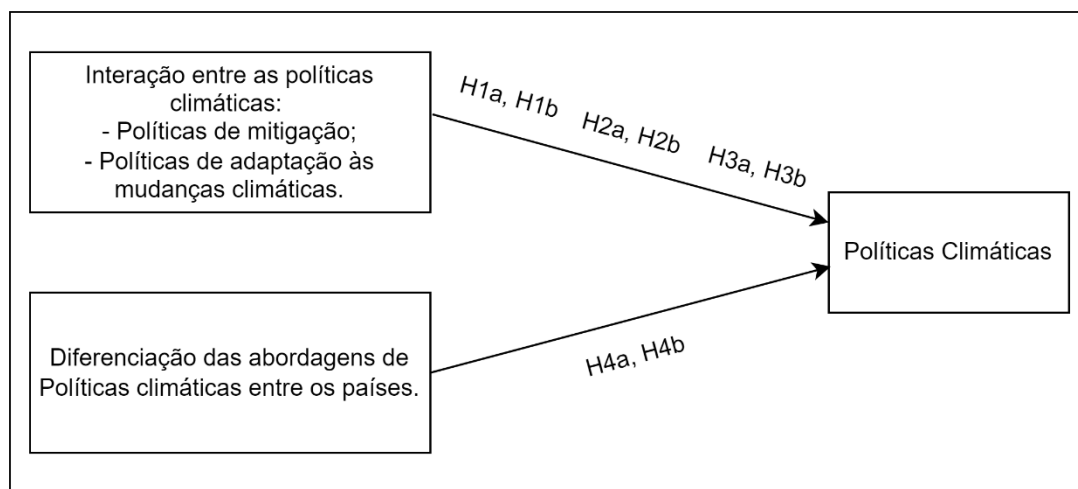


Figura 3. Estudo 2: Modelo teórico

Fonte: Elaborada pela autora

4 Estudo 3: Diferentes caminhos: Efeitos das Políticas Climáticas em Energia Eólica na instrumentalização da Precificação do Carbono.

Resumo:

Examinar os efeitos das políticas climáticas na instrumentalização de precificação do carbono da Alemanha e dos países da América Latina e Caribe... Aos dados coletados aplica-se a técnica.... Os resultados mostram....Conclui-se que... Os resultados do estudo implicam....

Palavras-chave: Energia Eólica. Políticas Climáticas. Instrumentos de Precificação do Carbono.

4.1 INTRODUÇÃO

4.2 REFERENCIAL TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO DAS HIPÓTESES

4.2.1 Instrumentos de Precificação do Carbono

4.2.1.1 Instrumento de Tributação do Carbono

4.2.1.2 Instrumento de Emissions Trading System (ETS)

4.2.1.3 Instrumento de Mecanismo de Crédito de Carbono

4.2.2 Efeitos das Políticas Climáticas dos países na instrumentalização da Precificação do Carbono

H1a: A adoção de Tributação de Carbono está associada a uma redução mais significativa das emissões de gases do efeito estufa em comparação com outros instrumentos de precificação.

H1b: A adoção de Emissions Trading System (ETS) está associada a uma redução mais significativa das emissões de gases do efeito estufa em comparação com outros instrumentos de precificação.

H1c: A adoção do Mecanismo de Crédito de Carbono está associada a uma redução mais significativa das emissões de gases do efeito estufa em comparação com outros instrumentos de precificação.

H2: A combinação de diferentes instrumentos de precificação, como Tributação de carbono e Emissions Trading System (ETS), pode gerar resultados mais eficazes na redução das emissões do que a adoção de um único instrumento.

H3: A existência de políticas climáticas influencia positivamente a implementação de um instrumento de precificação do carbono.

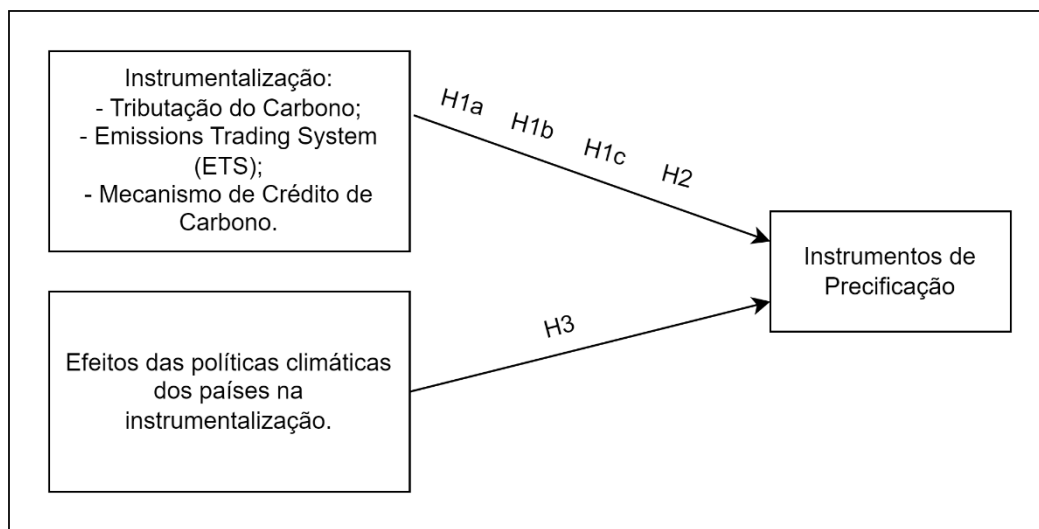


Figura 4. Estudo 3: Modelo teórico
Fonte: Elaborada pela autora

4.3 MÉTODO (MACHINE LEARNING (ML) - A SER APLICADO PARA OS 03 ARTIGOS DA TESE)

4.3.1 Método de pesquisa

A metodologia desta tese abordará o uso de modelos de aprendizado de máquina na mensuração dos fatores endógenos e exógenos que impactam a precificação de carbono, considerando as políticas climáticas e instrumentos de precificação, realizando uma comparação de dados dos países da América Latina e Caribe, com ênfase no Brasil, e dados da Alemanha, no período de 2000 a 2024, considerando a justificativa do período pela implementação da Lei de Energias Renováveis (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG), ocorrida em 2000.

A tese coletará um conjunto de dados abrangendo variáveis endógenas e exógenas que influenciam a precificação de carbono, assim como informações sobre as políticas climáticas e os instrumentos de precificação adotados pelos países com foco na energia eólica. Isso inclui, mas não se limita a, métricas de produção de energia, taxas de adoção tecnológica, indicadores econômicos e ambientes de políticas. Os dados serão obtidos de bancos de dados, como o Banco Mundial, a Agência Europeia do Meio Ambiente e órgãos reguladores nacionais de energia, garantindo confiabilidade e relevância.

O campo do *machine learning* (ML) tem feito progressos significativos, tornando possível explorar características intrínsecas em problemas multifatoriais com maior clareza e precisão. Essa evolução tecnológica encontrou ampla aplicação em sistemas de energia, especialmente em modelagem preditiva de produção, consumo e análise de demanda.

A seleção dos modelos ANN, SVM e XGBoost é baseada em suas capacidades comprovadas em lidar com relacionamentos de dados complexos e não lineares e sua adequação para tarefas de previsão. Cada modelo oferece vantagens únicas.

Para validar o desempenho dos modelos propostos, empregar-se-á uma metodologia robusta que inclui a divisão dos dados em conjuntos de treinamento e teste, juntamente com técnicas de validação cruzada para proteção contra *overfitting*. A avaliação se concentrará em três métricas principais: precisão, medida pelo coeficiente de determinação (R^2) para avaliar as capacidades preditivas dos modelos; precisão, para avaliar o quão próximos os modelos podem prever os preços do carbono dentro de uma margem mínima de erro; e eficiência computacional, considerando os tempos de treinamento e previsão de cada modelo como fatores críticos para sua aplicabilidade em cenários do mundo real. Esta abordagem abrangente não visa apenas avançar a compreensão acadêmica da previsão de precificação de carbono, mas também busca oferecer insights acionáveis para formuladores de políticas, investidores e partes interessadas no domínio de energia renovável, garantindo que as descobertas do projeto tenham significado teórico e prático.

Para prever a produção de energia renovável, como geração eólica e solar, com base em variáveis como condições climáticas, histórico de produção e dados de sensores, os autores Amasyali e El-Gohary (2018); Mosavi et al. (2019); Piotrowski et al. (2022), usaram *machine learning* (ML) em seus estudos para otimizar o gerenciamento da rede elétrica, integrar fontes renováveis de forma eficiente e garantir a segurança do fornecimento de energia. A seguir, detalhamos os modelos de *machine learning* a serem utilizados nesta tese.

4.3.1.1 Rede Neural Artificial (ANN)

O termo Artificial Neural Network (ANN) se refere a uma estrutura de unidades interconectadas contendo um número significativo de neurônios. Cada neurônio na rede recebe, processa e transmite sinais de entrada. E compreende uma série de sinapses ponderadas que somam os dados de entrada ponderados pela força sináptica e uma função de ativação que limita a amplitude da saída do neurônio. Existem dois tipos distintos de arquitetura de rede: redes feedforward multicamadas e redes recorrentes. Existem vários tipos de ANNs, incluindo metodologias de aprendizado supervisionadas e não supervisionadas e estruturas de *recall feedforward* e *feedback*.

A ANN de retropropagação é uma das ANNs mais comumente usadas para aplicações de classificação e predição (Pankratz, 2009). A capacidade das ANNs de se adaptarem a uma ampla gama de conexões funcionais de entrada e saída é sua característica distintiva. Devido à sua suposição subjacente, as ANNs têm bom desempenho mesmo quando confrontadas com conjuntos de dados imprecisos, ausentes ou indistintos. Além disso, uma hipótese a priori ou uma estrutura funcional separada entre entrada e saída não é necessária. Como resultado, as ANNs são amplamente utilizadas como uma opção prática quando o conhecimento ou as suposições são inadequados (Haykin, 2010). Embora a retropropagação seja o algoritmo de aprendizagem mais comumente usado (Wang e Ramsay, 1998), ela foi usada para minimizar a soma dos erros quadrados nesta rede. Para acelerar a velocidade de aprendizagem do algoritmo, a taxa de aprendizagem e o momentum devem ser alterados com base na taxa de convergência. Nesta tese, planeja-se estimar diferentes especificações de ANN, incluindo Feedforward Neural Network (FNN) e Recurrent Neural Network (RNN) (por exemplo, memória de curto prazo longa) e diferentes números de camadas ocultas.

4.3.1.2 Support Vector Machine (SVM)

As Support Vector Machines (SVMs), baseadas na aprendizagem estatística da teoria de Vapnik-Chervonenkis (VC) (Vapnik, 1998), são ideais para generalizar dados não observados. Assim como a classificação, a support vector regression (SVR) usa *kernels*, soluções esparsas e controle VC sobre a margem e o número de vetores de suporte. Embora a SVR seja menos prevalente que a SVM, é um método de estimativa viável para funções de valor real. A SVR é um método de aprendizado supervisionado que emprega uma função de perda assimétrica, penalizando estimativas altas e baixas incorretas igualmente.

A técnica ϵ -insensitive de Vapnik (1998) consiste em construir um tubo flexível de raio mínimo ao redor da função estimada para que erros com valores absolutos menores que um determinado limite ϵ sejam ignorados acima e abaixo da estimativa. Pontos adquiridos fora do tubo, acima ou abaixo da função, são deduzidos; no entanto, pontos obtidos dentro do tubo, acima ou abaixo da função, não são subtraídos. A complexidade computacional da SVR é independente das dimensões do espaço de entrada, o que é um dos seus principais benefícios. Além disso, como evidenciado por sua alta precisão de predição, ela tem um tremendo potencial para generalização.

O SVM foi projetado para superar alguns problemas de Artificial neural network (RNA), como obstáculos na construção da rede, preocupações com *overfitting* e determinação do número de pontos de dados de treinamento (Kavousi-Fard et al., 2014). O estudo atual usou o SVR porque a relação entre variáveis de entrada e saída varia gradualmente ao longo do tempo; mais precisamente, dados históricos recentes podem fornecer mais *insights* do que dados históricos distantes.

4.3.1.3 O Extreme Gradient Boosting Method (XGBoost)

O XGBoost, de acordo com Chen e Guestrin (2016), aparece como uma implementação avançada do método *gradient boosting* com a capacidade de combinar os pontos fortes de vários "aprendizes" em um único modelo de alto desempenho, caracterizando-se como um método de aprendizado conjunto e um algoritmo supervisionado. Esses "aprendizes" são modelos individuais que contribuem para a construção de um modelo final mais preciso. Entre os principais métodos de aprendizado conjunto estão o boosting e o bagging, ambos geralmente baseados em árvores de decisão.

As árvores de decisão analisam as características de entrada e preveem a variável alvo. O método de *boosting* se destaca porque constrói árvores sequencialmente, reduzindo os erros de árvores anteriores. Esse recurso torna o XGBoost particularmente adequado para lidar com grandes conjuntos de dados, mesmo sem hipóteses específicas. As árvores de decisão têm várias vantagens, como sua estrutura simples, a ausência de suposições e sua flexibilidade e robustez em comparação com outros métodos (Alnahit et al., 2022). Elas também podem lidar com relacionamentos não lineares e vários tipos de variáveis, incluindo categóricas e numéricas.

Em contraste com outros métodos de *bagging*, como floresta aleatória, o boosting usa árvores com menos divisões. Durante o treinamento, os parâmetros de cada "aprendiz fraco" são ajustados iterativamente para minimizar uma função objetiva. Cada aprendiz é comparado com seus predecessores para minimizar a taxa de classificação binária. Essa taxa é calculada como a razão entre o número de casos classificados incorretamente e o número total de casos (Militino et al., 2024).

REFERÊNCIAS DA TESE

- Aldy, J. E. (2015). Pricing climate risk mitigation. *Nature Climate Change*, 5(5), 396–398. doi:10.1038/nclimate2540
- Aldy, J., & Stavins, R. (2012). “The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Practice.” *Journal of Environment and Development* 21(2): 152-180.
- Barradale, M. J. (2010). Impact of public policy uncertainty on renewable energy investment: wind power and the production tax credit. *Energy Policy*. Volume 38, Issue 12, Pages 7698-7709. Special Section: Carbon Reduction at Community Scale, December.
- Bättig, M. & Bernauer, T. (2009). National institutions and global public goods: are democracies more cooperative in climate change policy? *Int. Organ.* 63 281–308.
- Böhmelt, T. Boker, M. & Ward, H. (2016). Democratic inclusiveness, climate policy outputs, and climate policy outcomes Democratization. 23 1272–91.
- Burrell, G., & Morgan, G. (1979). *Sociological Paradigms and Organisational Analysis: Elements of the Sociology of Corporate Life*. Londres: Ashgate. <https://doi.org/10.4324/9781315609751>.
- Clausing, K., C. Wolfram (2023), Carbon Border Adjustments, Climate Clubs, and Subsidy Races When Climate Policies Vary, *Journal of Economic Perspectives*, 37(3), 137-162.
- de Oliveira, J. A. P. (2009). The implementation of climate change related policies at the subnational level: An analysis of three countries. *Habitat international*, 33(3), 253-259.
- Edenhofer, O. (Ed.). (2015). *Mudança climática 2014: mitigação da mudança climática* (Vol. 3). Cambridge University Press.
- Feng, M., Duan, Y., Wang, X., Zhang, J., & Ma, L. (2023). Carbon price prediction based on decomposition technique and extreme gradient boosting optimized by the grey wolf optimizer algorithm. *Scientific Reports*, 13(1), 18447.
- Fischlein, M.; Larson, J.; Hall, D. M; Chaudhry, R; Peterson, T. R; Stephens, J. C.; Wilson, E. J. (2010). Policy stakeholders and deployment of wind power in the sub-national context: a comparison of four U.S. states. *Energy Policy*, v. 38, n. 8, p. 4429-4439.
- Franco, M. P. V., Carvalho, M. M. D., Lombardi Filho, S. C., Magalhães, A. S., & Domingues, E. P. (2022). *Impactos econômicos da proposta brasileira na COP21: uma abordagem de equilíbrio geral computável*.
- Funke, F., & Mattauch, L. (2018). Why is carbon pricing in some countries more successful than in others. *Our World in Data*, 10.
- Gazheli, A., & van den Bergh, J. (2018). Real options analysis of investment in solar vs. wind energy: Diversification strategies under uncertain prices and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2693-2704.
- Gowrisankaran, Gautam, Stanley S. Reynolds & Mario Samano (2011): “Intermittency and the Value of Renewable Energy”, *NBER Working Paper* 17086.
- Hong, F., & Karp, L. (2014). International environmental agreements with endogenous or exogenous risk. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(3), 365-394.
- Kanda, J. Y., & Carvalho, A. C. P. D. L. F. D. (2023). Previsão do preço do carbono por modelos de aprendizado de máquina. *Revista Amazônia, Organizações e Sustentabilidade-AOS*, 12(2), 158-176.
- Kitzing, L., Juul, N., Drud, M., & Boomsma, T. K. (2017). A real options approach to analyse wind energy investments under different support schemes. *Applied Energy*, 188, 83-96.
- Lamont, Alan (2008): “Assessing the Long-Term System Value of Intermittent Electric Generation Technologies”, *Energy Economics* 30(3), 1208-1231.
- Lefevre, G. B., Breviglieri, G. V., & do Sol Osório, G. I. (2022). Dez recomendações para um mercado de carbono regulado no Brasil. *GV-EXECUTIVO*, 21(1).

- Li, X., & Maréchal, F. (2023). Deep excavation of the impact from endogenous and exogenous uncertainties on long-term energy planning. *Energy and AI*, 11, 10021.
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low-elevation coastal zones. *Environment & Urbanization*, 19(1), 17–37.
- Mathews, J. A. (2008). How carbon credits could drive the emergence of renewable energies. *Energy Policy*, 36(10), 3633-3639.
- Mills, Andrew & Ryan Wiser (2012): “Changes in the Economic Value of Variable Generation at High Penetration Levels: A Pilot case Study of California”, *Lawrence Berkeley National Laboratory Paper LBNL-5445E*.
- Nicolletti, M., & Lefèvre, G. B. (2016). *Precificação de carbono no Brasil: perspectivas e aprendizados a partir de uma simulação de mercado cap-and-trade*.
- Nicolosi, Marco (2012): *The Economics of Renewable Electricity Market Integration. Na Empirical and Model-Based Analysis of Regulatory Frameworks and their Impacts on the Power Market*, Ph.D. thesis, University of Cologne.
- Schachter, J. A., & Mancarella, P. (2016). A critical review of Real Options thinking for valuing investment flexibility in Smart Grids and low carbon energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 261-271.
- Van den Bergh J, Castro J, Drews S, Exadaktylos F, Foramitti J, Klein F, Konc T and Savin I (2021). Designing an effective climate-policy mix: accounting for instrument synergy *Clim. Policy* 21 745–64.
- WorldBank. (2023). State and trends of carbon pricing 2023. Washington, DC: The World Bank.