



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA  
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

**ELIZABETH FARIAS DE MELO DE SOUSA**

**A DINÂMICA DOS INSTRUMENTOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO: Uma  
análise para o mercado *cap-and-trade***

**JOÃO PESSOA**

**2020**

**ELIZABETH FARIAS DE MELO DE SOUSA**

**A DINÂMICA DOS INSTRUMENTOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO: Uma  
análise para o mercado *cap-and-trade***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Ciências Econômicas do Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Sinézio Fernandes Maia

JOÃO PESSOA  
2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S725d Sousa, Elizabeth Farias de Melo de.

A dinâmica dos instrumentos de precificação de carbono:  
uma análise para o mercado cap-and-trade / Elizabeth  
Farias de Melo de Sousa. - João Pessoa, 2020.  
60 f. : il.

Orientação: Sinézio Fernandes Maia.  
TCC (Graduação) - UFPB/CCSA.

1. Mecanismos de precificação de carbono. 2.  
Cap-and-trade. 3. Mercado futuro. I. Maia, Sinézio  
Fernandes. II. Título.

UFPB/CCSA

CDU 33

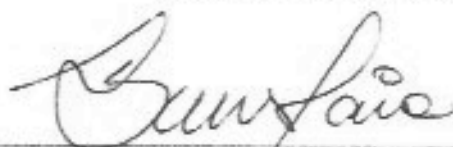
**ELIZABETH FARIAS DE MELO DE SOUSA**

**A DINÂMICA DOS INSTRUMENTOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO: Uma  
análise para o mercado *cap-and-trade***

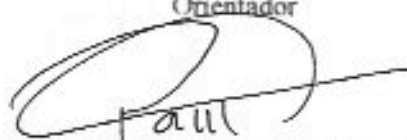
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Ciências Econômicas do Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Economia.

Aprovado em: 16 de Dezembro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Sinézio Fernandes Maia  
Orientador



Prof. Dr. Paulo Amilton Maia Leite Filho  
Examinador



Prof. Dr. Ignácio Tavares de Araújo Júnior  
Examinador

## RESUMO

Existe um crescente impulso para avanços de políticas climáticas que incentivem mecanismos de precificação de carbono que forneçam reduções significativas de emissões de  $CO_2$ . Dada a inexistência de um mercado de carbono brasileiro, o presente trabalho objetiva identificar a dinâmica dos instrumentos de precificação (mercado *cap-and-trade*) de carbono em andamento, e estudar o possível enquadramento dos modelos de precificação na Lei 13.576/17 (RenovaBio). Com esta finalidade, é feita a modelagem da dinâmica das permissões de emissões de  $CO_2$  para os principais Sistemas de Comércio de Emissões estrangeiros a partir de três variantes das classes de modelos com heterocedasticidade condicional autorregressiva, os modelos GARCH, EGARCH e TARARCH. Os resultados, indicam que os preços apresentam comportamentos dinâmicos, efeitos assimétricos e persistência. Em seguida, estima-se um modelo de transmissão de preços do mercado futuro para o *spot* por meio da razão de hedge de variância mínima, os resultados confirmam a importância da formação de instrumentos de mercado que auxiliem no gerenciamento de riscos, e monitoramento dos custos de emissões de  $CO_2$  nos processos de produção das empresas.

**Palavras-chave:** Sistemas de Comércio de Emissões. Dinâmica. Modelagem. *Hedge*.

## ABSTRACT

There is an increasing momentum for advances in climate policies that encourage carbon pricing mechanisms that provide significant emission reductions of  $CO_2$ . Given the inexistence of a Brazilian carbon market, the present work aims to identify the dynamics of carbon pricing instruments (*cap-and-trade* market) in progress, and to study the possible framing of pricing models in Law 13.576 / 17 (RenovaBio). For this purpose, the dynamics of  $CO_2$  emission allowances for the main foreign Emissions Trading Schemes is modeled based on three variants of the model classes with autoregressive conditional heteroscedasticity, namely, the GARCH, EGARCH and TARARCH models. The results indicate that prices show dynamic behavior, asymmetric effects and persistence. Then, a model of price transmission from the future market to the textit spot is estimated through the minimum variance text hedge ratio, the results corroborate the idea of the importance of forming market instruments that assist in risk management, and monitoring emission costs of  $CO_2$  in companies production processes.

**Keywords:** Emissions Trading Schemes. Dynamics. Modeling. *Hedge*.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das séries de log-retornos ( $r_t$ ) diários. . . . .	39
Tabela 2 – Modelo ARMA( $p,q$ ), estatística $Q(k)$ e o Teste ML de Engle. . . . .	40
Tabela 3 – Estimativas dos modelos GARCH, EGARCH e TARCH para as séries. . . .	41
Tabela B.1 – Critérios de Informação para todas as variações do modelo ARCH. . . . .	56
Tabela B.2 – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as EUAs. . . . .	57
Tabela B.3 – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as CEAs. . . . .	58
Tabela B.4 – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as CCAs. . . . .	59
Tabela B.5 – Teste de Causalidade de Granger para a série de preços <i>spot</i> e futuro de EUAs.	59
Tabela B.6 – Testes de Raiz Unitária para as séries de retornos e preços <i>spot</i> e futuro de EUAs. . . . .	60

# SUMÁRIO

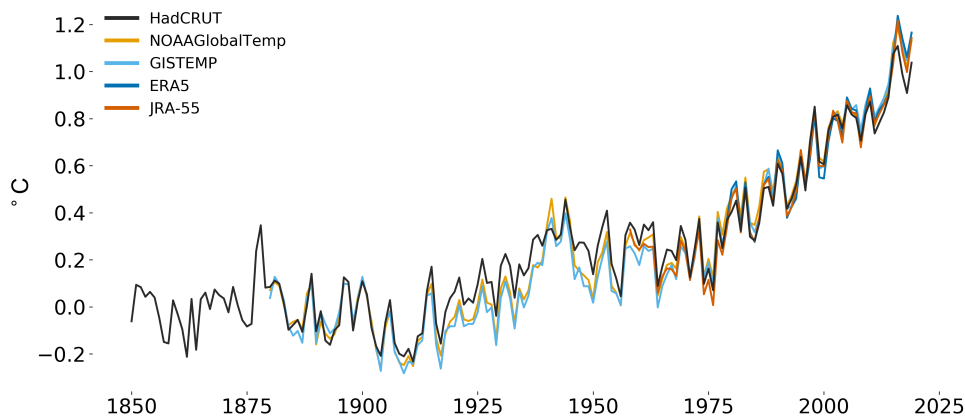
1	INTRODUÇÃO . . . . .	8
2	REVISÃO DA LITERATURA . . . . .	12
2.1	À guisa de contextualização . . . . .	12
2.2	Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil . . . . .	14
2.2.1	Lei 13.576/17 - RenovaBio . . . . .	14
2.3	Estudos sobre os mecanismos de precificação: mercado <i>cap-and-trade</i> . . . . .	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	19
3.1	Mecanismos e instrumentos de mercado . . . . .	19
3.1.1	Sistema de Comércio de Emissões (ETS) . . . . .	20
3.1.2	Fundamentos de mercado . . . . .	21
3.1.3	Sistemas de mercado: a experiência europeia . . . . .	22
3.1.4	A experiência de negociações em bolsa: a importância do mercado de derivativos . . . . .	23
3.1.5	Os fundamentos do mercado de futuro . . . . .	25
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS . . . . .	28
4.1	Modelos ARCH . . . . .	28
4.1.1	Identificação . . . . .	30
4.1.2	Estimação . . . . .	31
4.2	Modelos GARCH, TARCH e EGARCH . . . . .	32
4.3	Razão de <i>Hedge</i> de Variância Mínima . . . . .	34
4.4	Base de Dados . . . . .	35
5	RESULTADOS . . . . .	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	44
	REFERÊNCIAS . . . . .	46
A	APÊNDICE A . . . . .	50
B	APÊNDICE B . . . . .	55

# 1 INTRODUÇÃO

A mudança climática global vem assumindo um papel substancial na agenda político-econômica mundial, tanto pelos seus impactos socioeconômicos a curto prazo quanto a longo prazo. Segundo Smith et al. (2014), estas mudanças podem impactar tanto as condições de saúde, quanto o *status* socioeconômico dos indivíduos, sendo que estes efeitos podem ser ainda mais acentuados em países menos desenvolvidos e com menos condições de infraestrutura.

De acordo com os relatórios do IPCC (2018) e WMO (2019), há uma trajetória de aumento da temperatura média global, como apresentado na Figura 1, sendo que alguns relatos <sup>1</sup> apresentam a hipótese de que o aquecimento global pode ser causado pelo aumento das emissões antrópicas de Gases do Efeito Estufa (GEE).

**Figura 1** – Diferença de temperatura média global de 1850-1900 (°C).



Fonte: World Meteorological Organization.

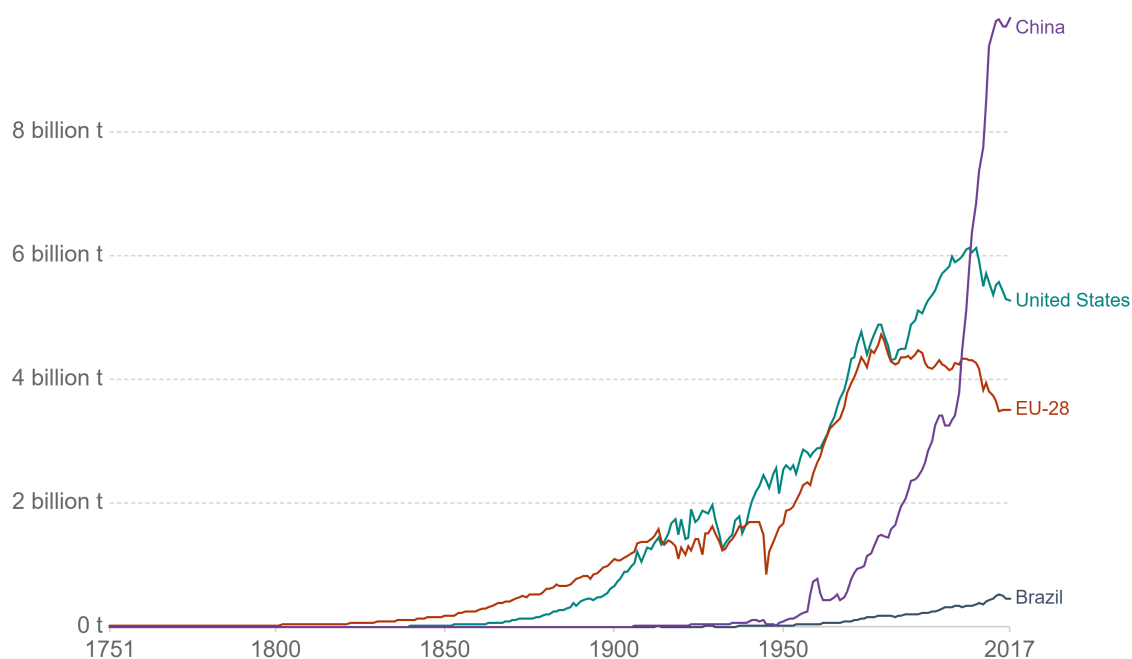
Conforme IPCC (2018), as concentrações de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera atingiram um nível recorde de 407,8 partes por milhão (ppm) em 2018 e continuaram a aumentar em 2019 <sup>2</sup>. Já em relação ao nível de emissões por país, a China representa a maior emissora da Ásia e do mundo, respondendo por quase 10 bilhões de toneladas por ano de  $CO_2$ , mais de um quarto das emissões globais. Os Estados Unidos (EUA) é o segundo maior emissor regional, com 18% das emissões globais, seguido sequencialmente pela União Europeia (EU-28)<sup>3</sup> com cerca de 17%. A África e a América do Sul são emissores relativamente pequenos, responsáveis por 3 e 4% das emissões globais, respectivamente. A Figura 2 apresenta a evolução de emissões de  $CO_2$  por país, desde 1751 até 2017, como destacado por Ritchie e Roser (2017).

<sup>1</sup> <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>

<sup>2</sup> As emissões observadas relacionam-se ao país onde o  $CO_2$  é produzido, não ao país onde os bens e serviços que geram emissões são consumidos.

<sup>3</sup> Agrupa-se os 28 países da União Europeia, considerando aqueles que fazem parte das negociações e definições de metas como órgão coletivo.

**Figura 2** – Emissões anuais de  $CO_2$  sem atividades de Uso da Terra e Floresta (em inglês - LULUCF).



Fonte: Ritchie e Roser (2017).

Por meio da análise conjunta das Figuras 1 e 2, observa-se que há tanto o aumento da concentração de  $CO_2$ , quanto a elevação da temperatura média global, fato que, apesar de ser apenas uma hipótese, pode indicar associação entre essas variáveis. Nesse sentido, iniciativas de precificação de carbono bem planejadas podem desempenhar um papel essencial na entrega de um resiliente e futuro de baixo carbono. Conforme Nicolletti e Lefèvre (2016), a adoção de uma gama de instrumentos capazes de lidar com as variadas fontes de emissões e setores econômicos, tenderia a ser a escolha mais custo-efetiva para garantir a mitigação de GEE. Ainda que, instrumentos econômicos, em particular, os que visam à precificação de carbono, devem ser considerados na estratégia aplicada as políticas climáticas de países e regiões (KOSSOY et al., 2015).

Na busca de tomar jus a este processo, o tema vem sendo constantemente debatido pela Organização das Nações Unidas (ONU), em conferências internacionais. Mas foi a partir do Protocolo de Quito (1997), que se fica evidente a importância do mercado (criação de um valor transacionável para essas reduções) no processo de redução de emissões. Dentro desse princípio, foram propostos mecanismos de flexibilização, entre eles o Comércio de Emissões (*Emissions Trade*), a Implementação Conjunta (JI) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), como forma de auxiliar os países industrializados a reduzirem suas emissões de GEE.

O Sistema de Comércio de Emissões (em inglês, Emissions Trading Scheme - ETS) é o mecanismo objeto de estudo deste trabalho. A precificação de carbono por meio de um ETS (ou mercado *cap-and-trade*), consiste no estabelecimento de um limite de emissões (*cap*), que

determina o nível de ambição do programa, enquanto o componente comercial (*trade*) pretende fazer com que esse limite seja alcançado da maneira mais eficaz em termos de custo-benefício para as empresas participantes. Além do estabelecimento do limite, a distribuição de permissões e o monitoramento do cumprimento das metas de redução determinam a eficácia do sistema em atingir o objetivo para o qual foi estipulado. Uma vez definido o limite, deve-se decidir como distribuir as permissões.

De acordo com o Banco Mundial, atualmente, 31 países e 29 jurisdições subnacionais precificam as emissões de GEE por meio de ETSs, cobrindo cerca de 9  $GtCO_2$  (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente), que representam 17% das emissões globais de GEE em 2020. As iniciativas de precificação de carbono estão se expandindo em linhas nacionais e subnacionais. Como fator amostral, tem-se a abordagem federal de precificação de carbono instalada no Canadá, assim como, o início da fase piloto do mercado nacional de carbono do México, representando o primeiro ETS na América Latina. A China mantém-se rumo à implementação do seu ETS nacional, visando o desenvolvimento da capacidade das partes interessadas para o início da fase de simulação. Em síntese, também se configuram iniciativas de precificação de carbono, ou de um possível mercado de carbono na; Alemanha, África do Sul, Cingapura, Indonésia, New Brunswick, Montenegro, e diversos estados dos Estados Unidos.

Estabelecer um comércio de emissões no Brasil parte de uma prática inovadora e exploratória, o mercado de comércio de emissões não é somente uma solução importante para o controle das mudanças climáticas, mas também, uma importante escolha para empresas e investidores que desejam estabelecer estratégias operacionais de mitigação de GEEs. Considerado isto, o conhecimento estatístico da incerteza e assimetria dos "preços de carbono", permite que formuladores de políticas públicas e participantes do mercado examinem a complexidade e os benefícios desse instrumento de mercado, de modo a auxiliar os agentes a realizarem estratégias de negociações eficientes e gerenciamento de riscos.

Dada a inexistência de um mercado de carbono brasileiro, o presente trabalho tem como objetivo geral identificar a dinâmica dos instrumentos de precificação (mercado *cap-and-trade*) de carbono em andamento, e estudar o possível enquadramento dos modelos de precificação na Lei 13.576/17 (RenovaBio). Especificamente objetiva-se: observar os modelos de precificação com base na negociação de permissões de emissões de  $CO_2$ , para os principais Sistemas de Comércio de Emissões estrangeiros, sendo o principal deles, o European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS); avaliar a dinâmica da volatilidade dos preços das licenças de emissões a partir de três variantes das classes de modelos com heterocedasticidade condicional autorregressiva, a saber, os modelos GARCH, EGARCH e TARARCH; estimar um modelo de transmissão de preços do mercado futuro para o *spot*, que auxilia no entendimento da importância da gestão de riscos e do monitoramento dos custos de emissões de  $CO_2$  nos processos de produção das empresas.

Para isto, o trabalho está dividido em seis seções, incluindo a presente introdução. A segunda seção apresenta uma contextualização da Convenção do Clima, das principais Confe-

rências, da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil, e da Lei 3.576/17 (RenovaBio), ainda que os principais estudos sobre os mecanismos de precificação de carbono, modelagem da dinâmica dos preços, e seus determinantes. Na terceira seção é feita uma discussão sobre os princípios dos mecanismos e instrumentos de mercado utilizados para fundamentar a pesquisa. A metodologia é definida na quarta seção. Por fim, a quinta seção apresenta os resultados e, as conclusões extraídas são expostas na sexta seção.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 À guisa de contextualização

A primeira reunião global que tratava de questões ambientais foi a Conferência de Estocolmo em 1972. Como apresentado por Emmelin (1972), o tema central desta Conferência foi a relação entre desenvolvimento, população e meio ambiente, sendo que muitas resoluções referentes ao manuseio de recursos naturais foram estabelecidas. Outro ponto relevante foi o debate entre países industrializados que defendiam a ideia de desenvolvimento zero como forma de preservação do meio ambiente, como aqueles emergentes, que argumentavam pelo desenvolvimento econômico como forma de reduzir as disparidades.

Em 1982, após 10 anos da Conferência de Estocolmo, ocorreu a Conferência de Nai-róbi, que resultou em uma declaração que refletia a insatisfação quanto aos resultados alcançados naqueles 10 anos e apresentava algumas novas diretrizes a serem tomadas em relação ao meio ambiente, além daquelas que já haviam sido estabelecidas anteriormente.

Para discutir as preocupações relacionadas ao aumento de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e suas possíveis consequências, firmou-se durante a Rio-92<sup>1</sup>, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC). A Convenção do Clima entrou em vigor em 21 de março de 1994, com intuito de propor ações para estabilização das concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) aos países do ANEXO 1<sup>2</sup>, de forma a evitar que atividades antrópicas induzam a impactos catastróficos no clima (ROCHA, 2003).

Com a finalidade de combater as mudanças climáticas, as negociações foram feitas no âmbito da CQNUMC por meio de rodadas internacionais sucessivas, em que os países, intitulados “Partes”, responsabilizam-se por pautas relacionadas ao compromisso com ações voltadas às finalidades de mitigação e de adaptação, além das negociações dos meios tecnológicos e financeiros para seu alcance. Esse processo contínuo deu origem a criação da Conferência das Partes (COP), o órgão supremo da Convenção, cujas reuniões têm ocorrido anualmente, de 1995 até os dias atuais (BUENO, 2016).

A 3ª Conferência das Partes realizada em Quioto, em 1997, onde foi assinalado o Protocolo de Quioto, destaca-se como cerne desta discussão, uma vez que, foi o primeiro acordo multilateral a fixar um compromisso de redução de emissões de GEE, na qual os países industrializados deveriam reduzir suas emissões em 5,2% abaixo dos níveis observados em 1990, no período compreendido entre 2008 e 2012 (primeiro período de compromisso). Foi a partir deste Protocolo que se fica evidente que a formação de um mercado de emissões poderia contribuir no processo de redução dos GEE, criando assim um “valor transacionável” para essas reduções

<sup>1</sup> Conferência das Nações sobre Meio Ambiente de Desenvolvimento (UNCED) realizada em 1992.

<sup>2</sup> Os membros do ANEXO 1 estão listados no Apêndice A.

(BUENO, 2016).

Bueno (2016) investiga os princípios e normas que caracterizam o regime climático<sup>3</sup> em dois períodos: o pré-Quioto (1990-2009); e o pós-Quioto (a partir de 2009), que tem como marco de negociações recentes o Acordo de Paris. A configuração inicial do Protocolo de Quioto induz a uma atribuição justa aos países quanto às responsabilidades de mitigação das emissões de  $CO_2$ . No entanto, apesar do problema de mudanças climáticas ser de natureza global, a contribuição dos grupos de países não é equivalente, visto que a maioria dos países do Anexo 1, ainda são os responsáveis por grande parte das emissões. Dessa forma, um dos princípios que fundamentam a Protocolo consiste na "responsabilidade comum, porém diferenciada" (SOUZA; CORAZZA, 2017).

No período de vigência do Protocolo de Quioto, uma análise mais detalhada ratifica que os compromissos de redução de emissões voltados somente aos países do Anexo I, seriam insuficientes (cobrindo apenas 20% das emissões globais) e deixariam de fora uma quantidade demasiada de emissões. Nesse contexto, apontam-se dois aspectos à medida que as negociações do período pré-Quioto avançam: 1) a evidência de que outros países começaram a contribuir substancialmente para as emissões globais; 2) enfrentar este problema requer grandes esforços e investimentos em mitigação e adaptação (SOUZA; CORAZZA, 2017).

A partir dessa lógica, tem-se uma mudança nos perfis de emissões de gases de efeito estufa, e consequentes transformações no regime climático global. Segundo Souza e Corazza (2017), a reconfiguração da estrutura do regime climático induz a mudanças significativas em termos de liderança, de coalizão de países e de atribuição de responsabilidades. Esta nova abordagem para a ação climática foi consolidada no Acordo de Paris durante a 21ª COP e irá substituir, a partir de 2020, o atual Protocolo de Quioto. A principal determinação do Acordo de Paris estabelece limitar o aumento da temperatura média global a 2°C quando comparado a níveis pré-industriais. A partir dessa abordagem, as Partes apresentam suas metas de redução de GEE consolidadas na forma de NDCs (*Nationally Determined Contributions*), em uma nova disposição, onde participam não apenas países listados no ANEXO 1, mas também países emergentes, a exemplo do Brasil.

Para exercício do sucesso político e econômico desse novo regime climático coloca-se a necessidade de se pôr em investigação a efetividade e adequação das NDCs para que as metas estipuladas pelo Acordo de Paris sejam cumpridas. Nos últimos anos, como apresentado por Speranza et al. (2017), foram desenvolvidas algumas ferramentas para monitorar a implementação das políticas climáticas, como o *Consortium Climate Action Tracker (CAT)*, *EU Climate Policy Tracker (EU CPT)*, *OCN Climate Policy Implementation Tracking Framework*. Estas ferramentas possuem metodologias próprias que permitem avaliar o progresso dessas políticas e podem ser utilizadas para avaliar as medidas climáticas adotadas pelos países.

<sup>3</sup> O regime climático é denominado por Souza e Corazza (2017) como uma forma específica de regime internacional, direcionada às mudanças climáticas, que objetiva, em suma, o controle e a redução das emissões de GEEs em escala global.

## 2.2 Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil

O crescimento significativo de iniciativas (jurisdições nacionais e subnacionais) que buscam adotar instrumentos de precificação de carbono como componentes de suas políticas climáticas, torna-se um incentivo para que o Brasil também inclua tais mecanismos no seu rol aplicado a políticas e instrumentos que visam a mitigação de GEE. No referente ao contexto nacional, as justificativas para a implantação de um mecanismo de precificação de carbono (ETS) no Brasil ancoram-se nos compromissos de redução de emissões definidos na Contribuição Nacional Determinada e, em especial, na Lei 13.576/17.

Nas contribuições nacionais (NDCs) devem constar medidas que abrangem a mitigação das mudanças climáticas, a promoção de medidas de adaptação e, a geração de oportunidades econômicas. A NDC brasileira se compromete em chegar em 2025 com níveis de emissões de 1,3 *GtCO<sub>2</sub>e*, assumindo o compromisso de redução das emissões em 37% até 2025 e em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005<sup>4</sup>.

É assinalado que o compromisso de redução se aplica ao conjunto da economia, ou seja, pode permear por meios flexíveis para atingir seus objetivos. As linhas de ações traçadas se segmentam em seis; quatro no setor de energia, um no setor florestal e uso da terra, e uma no setor agrícola. Apesar da matriz energética brasileira já possuir relevância mundial, as linhas de ação estabelecem medidas como; aumento da participação de bioenergia sustentável na matriz energética, novos padrões de energias limpas, melhorias de infraestrutura de transporte, entre outros.

A elevação da participação do setor energético nas emissões de GEE é um dos fatores que corroboram para o enfoque que é dado a tal setor. Além disso, o número de ações contidas na NDC para tratar do setor de energia, demonstra o interesse do governo em fazer jus a um reestudo agregativo para a matriz energética brasileira.

### 2.2.1 Lei 13.576/17 - RenovaBio

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) dimensionada pelo Ministério de Minas e Energia (2018) como “uma política de Estado que objetiva traçar um plano conjunto para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para mitigação das emissões de GEE”. Essa postura evidencia o posicionamento do governo brasileiro visando a redução da intensidade de GEE no setor de transporte e expansão da produção de biocombustíveis.

O programa foi estabelecido pela Lei 13.576/17, embora muitos dos seus recortes estejam ainda em fase de detalhamento, é previsto a introdução de mecanismos de mercado para o alcance do que se propõem a ser um projeto de “descarbonização” na transformação de um bem público (externalidade positiva) em um incentivo para o desenvolvimento sustentável. Os

<sup>4</sup> NDC disponível em: [http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_esenvsust/BRASIL\\_-\\_iNDC\\_-\\_portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_esenvsust/BRASIL_-_iNDC_-_portugues.pdf).

mecanismos previstos têm como base a Certificação da Produção de Biocombustíveis, no qual firmas inspetoras avaliam a conformidade da mensuração referente à produção ou à importação de combustíveis por parte dos distribuidores de biocombustíveis, em função da eficiência energética e emissão dos Gases do Efeito Estufa. Por meio dos Certificados emitidos por essas firmas inspetoras, o Crédito de Descarbonização (CBio), funciona como uma ferramenta que possui a finalidade de comprovar a meta individual desses distribuidores.

A funcionalidade do RenovaBio está fundamentada nas intenções propostas pela NDC brasileira em até 2030, aumentar a participação de biocombustíveis sustentáveis em sua matriz energética para aproximadamente 18% na matriz energética nacional. As metas de descarbonização de combustíveis são para um período de dez anos, onde serão instituídas metas individuais anuais e compulsórias para todos os distribuidores de combustíveis em função da sua participação no mercado em relação ao ano anterior (MME, 2018).

O programa baseia-se na obrigação, por parte do Estado, aos comercializadores de combustíveis fósseis em comprar os Certificados de Produção Eficiente de Biocombustíveis (CBios) que serão emitidos pelos produtores de biocombustíveis de acordo com sua intensidade de carbono (MME, 2018). Essa comercialização de certificados (CBios) permitirá a formação de um mercado de revenda que tem como inspirações iniciativas internacionais já vigentes, como; o *Renewable Fuel Standard (RFS)*, o *Low Carbon Fuel Standard (LCFS)*, e o *Renewable Energy Directive (RED)*.

No que se refere aos produtores de biocombustíveis, haverá a certificação e a inspeção por firmas privadas, utilizando uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de intensidade de carbono, gerando Notas de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA). A NEAA deverá ser calculada utilizando a RenovaCalc, ferramenta de ACV que está sendo desenvolvida pela Embrapa. Tem-se a expectativa de que o RenovaBio possibilite o incentivo a inovação e o aumento da produtividade na cadeia produtiva, visto que a diminuição na intensidade de carbono poderá incumbir a um ganho no número de CBios emitidos pelo mesmo volume de biocombustível (MME, 2018).

Em relação aos distribuidores de combustíveis, cada um terá uma meta compulsória anual proporcional à respectiva participação de mercado na comercialização de combustíveis fósseis no ano anterior. Sendo assim, quanto mais combustíveis fósseis um distribuidor vender, mais CBios ele deverá comprar no mercado no ano seguinte. Dando aos CBios uma formatação de imposto a comercialização e produção de combustíveis fósseis (MME, 2018).

É por meio do equilíbrio de mercado entre oferta, por parte dos produtores de biocombustíveis e demanda, realizada pelos comercializadores de combustíveis fósseis, que se adquire condições para o aparecimento de um mercado futuro de carbono no Brasil, posto que seria possível reduzir os riscos de “preços de carbono”, tendo em vista a padronização dos projetos para a formação dos CBios, ainda que a abertura de negociação na bolsa, que favorecerá a caracterização do carbono como *commoditie*.

## 2.3 Estudos sobre os mecanismos de precificação: mercado *cap-and-trade*

Estudos empíricos frequentemente apontam a precificação do carbono como a ferramenta mais econômica para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Em seu estudo sobre a viabilidade de implementação de um esquema de comércio de emissões, Stavins (2008) afirma que o mercado *cap-and-trade* consiste na melhor estratégia para minimizar os custos da redução de emissões, assim como a melhor forma para se alcançar reduções significativas a curto e médio prazo. Para o autor, este sistema proporciona maior segurança quanto aos níveis de emissões; oferece uma alternativa acessível de compensar os encargos inevitavelmente desiguais inerentes a política climática; facilita o intermédio com as políticas climáticas de outros países; evita a aversão política condicionada a adesão de impostos; e tem um histórico de implementação bem-sucedido.

Ainda para Stavins (2008), mesmo um sistema de *cap-and-trade* com credibilidade a longo prazo não é suficiente para sustentar o nível social desejável de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e implantação de novas tecnologias, e conseqüentemente, garantir a redução de emissões de  $CO_2$ . Stavins (2008) coloca que são desconsideradas algumas falhas de mercado que desincentivam os agentes a investir, como as associadas à natureza do bem público resultante dos esforços em pesquisa e desenvolvimento. Isto posto, para se atingir o patamar ideal de investimentos são necessárias políticas adicionais de estímulo ao financiamento público e privado.

Para Baranzini et al. (2017), a principal razão para utilização da precificação do carbono é a sua eficácia ambiental a um custo relativamente baixo, o que por sua vez contribui para aumentar a aceitabilidade social e política da estratégia climática. Baranzini et al. (2017) também discorre sobre a complementaridade de outros instrumentos no sistema precificação de carbono e, argumenta que “entre todos os instrumentos, a precificação do carbono merece a mais séria atenção de pesquisadores, políticos e cidadãos”.

O mercado *cap-and-trade* fundamenta-se na comercialização de permissões de emissões de  $CO_2$ . Daskalakis, Psychoyios e Markellos (2006), norteiam os resultados para o primeiro estudo empírico sobre a modelagem de preços *spot* e preços de futuros de permissões de emissões da Bolsa Europeia de Energia na Alemanha, onde propõem que os preços à vista de licenças de emissões demonstram comportamento de passeio aleatório volátil interrompido por mudanças descontínuas, que podem ser bem aproximadas por um modelo de difusão em salto. A análise dos preços dos contratos futuros de longo prazo implica que os participantes do mercado adotam preços padrões sem arbitragem.

Os mercados mundiais de energia e gás têm uma relação natural com os mercados de licenças de carbono globais comercializáveis. As concessionárias de energia elétrica operam suas usinas baseadas tanto no preço da energia, quanto no custo relativo do carvão e do gás natural. Sendo assim, as restrições de carbono impostas em uma economia impactam diretamente

na estrutura operacional destas empresas. O conhecimento da distribuição estatística do comércio de licenças de emissões, e sua previsibilidade, torna-se crucial na construção de estratégias ideais de compra e *hedge* no mercado de carbono. Em sua análise aprofundada dos preços de  $CO_2$ , aborda-se o comportamento de cauda incondicional e a dinâmica heterocedástica inerente nos retornos das permissões de emissões ((PAOLELLA; TASCHINI, 2006)).

A análise de um modelo de preço *spot* de  $CO_2$  adequado, faz-se necessária para que as entidades poluidoras possam avaliar melhor seus custos de produção e assumir decisões de investimento relacionadas às emissões. Mesmo diante um histórico de preços insuficiente, Seifert, Uhrig-Homburg e Wagner (2008) apresentaram um modelo de equilíbrio estocástico tratável refletindo as características estilizadas do EU ETS, e analisando a dinâmica do preço *spot* de  $CO_2$  resultante. Os principais resultados consideram que os preços do  $CO_2$  não necessitam seguir nenhum padrão sazonal. Ainda que, os preços com desconto devem possuir a propriedade martingale e um processo de preços de  $CO_2$  adequado deve exibir uma estrutura de volatilidade em função do tempo e do preço ((SEIFERT; UHRIG-HOMBURG; WAGNER, 2008)).

Swaray et al. (2002) tratam da questão da volatilidade, apresentando que sua origem se difere para os diversos tipos de *commodities*. Em relação às *commodities* primárias, a volatilidade do preço é dada em função de desequilíbrios na oferta; enquanto para matérias-primas industriais, dar-se a partir de perturbações na demanda. Usualmente, as interações de tais desequilíbrios com a demanda de curto prazo e as elasticidades da oferta resultam em variações consideráveis nos preços.

Em análise das *commodities* primárias, Swaray et al. (2002) constata que informação, *hedging*, especulação e disponibilidade física, são fatores primordiais que influenciam a volatilidade dos mercados de *commodities*. Além disso, Herrmann (1983) discorre que o aumento da volatilidade nesses mercados pode justificar a utilização de procedimentos com base em informação para a modelagem do padrão de volatilidade do retorno de tais *commodities*. Em tese, assume-se o mesmo para o mercado de licenças de emissões de  $CO_2$ .

Com o propósito de analisar melhor o comportamento dos preços, deve-se identificar os principais determinantes dos preços de permissões de emissões de  $CO_2$ . De acordo com Benz e Trück (2006) o preço de provisão do  $CO_2$  é determinado diretamente pelo mercado esperado de escassez induzida pela demanda e oferta no mercado de carbono. Notavelmente, as empresas são capazes de controlar o mercado de escassez, e portanto, o preço de mercado, por suas decisões de redução de  $CO_2$ . Para os autores, é mais adequado comparar o direito de emitir  $CO_2$  com os moldes de negociação de *commodities* do que com um modelo participação acionária tradicional, posto a classificação dos ativos como fatores "normais" de produção, que segundo Fichtner (2004), reduz o limite de emissões para os períodos de compromisso.

Estudos que investigam empiricamente a dinâmica e os componentes que afetam os preços de licenças de emissões no sistema de comércio de emissões da União Europeia assumem que os preços possuem uma dinâmica e um comportamento volátil em diferentes fases do

retorno. O preço da energia, a atividade econômica, as mudanças de temperatura, e os eventos de mercado são componentes que influenciam nas mudanças de preços das permissões de emissões de  $CO_2$  (ALBEROLA; CHEVALLIER; CHÈZE, 2008). Ao considerar a introdução, desde 2013, de um projeto piloto de comércio de emissões regional na China, Zhang e Wei (2010) colocam que os níveis de desenvolvimento, a eficiência técnica e a substituição dos combustíveis fósseis nas indústrias de manufatura chinesa, impulsionam as mudanças de preços sombra<sup>1</sup> das licenças de emissões na China.

Hammoudeh, Nguyen e Sousa (2014) explica que as mudanças nos preços do petróleo, carvão, gás natural e eletricidade podem afetar a trajetória de curto prazo dos preços de licenças de emissões  $CO_2$ . Além disso, a capacidade dos geradores de eletricidade em alternar entre gás e carvão têm influência significativa no preço futuro do carbono (BOERSEN; SCHOLTENS, 2014). Para Benz e Trück (2009), no caso da Europa, o caminho mais compensatório seria a troca do carvão pela geração de energia a partir do gás natural, essa alternativa permitiria a redução de demanda por licenças de  $CO_2$  pela metade. No entanto, essa fonte de incerteza de preço pode ter um impacto de curto a médio prazo na liquidez de mercado, que pode influenciar no aumento da volatilidade nos preços das permissões.

A política e questões regulatórias são variáveis de baixa previsibilidade e quando sujeitas a mudanças podem impactar o comportamento dos preços de curto prazo das permissões de emissões. Chevallier (2011), reconhece que os eventos de conformidade anual e as crescentes incertezas nos acordos internacionais pós-Quito podem definir as instabilidades de volatilidade nos preços das permissões de emissões da União Europeia (UE). Assim como Hitzemann, Uhrig-Homburg e Ehrhart (2015), afirma que a realização dos anúncios anuais referentes aos Planos Nacionais de Alocação (PNAs) da UE, implicam diretamente em anormalidades significativas nos retornos do dia do evento, seguidos por um aumento no volume de negociações e altas volatilidades intra-diárias.

No referente ao quadro regulatório, a proibição bancária de licenças de emissões entre fases distintas do EU ETS, proporcionaram um impacto significativo sobre os preços de futuros de permissões (DASKALAKIS; PSYCHOYIOS; MARKELLOS, 2009). As regras explícitas de negociação (negociação intertemporal), o envolvimento do Regime de Comércio de Licenças de Emissões da UE (RCLE-UE) com os mecanismos de financiamento de projetos com baixa emissão podem assumir um impacto importante nos preços. Ainda assim, esses fatores são resultado de um longo processo de discussão cuja consequências devem ser estudadas com antecedência, sendo os investidores propícios a protegerem-se contra esses riscos de preços no longo prazo (BENZ; TRÜCK, 2009).

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Mecanismos e instrumentos de mercado

O mercado de carbono é um exemplo de mecanismo de mercado criado com intuito de alcançar as metas de reduções das emissões de GEE. O objetivo é estimular o setor privado e os países em desenvolvimento a contribuírem no sentido de equilibrar os efeitos negativos das emissões. Esse mecanismo tem como instrumento a imposição de um custo às entidades que ultrapassem os limites de emissões, atribuindo um preço às externalidades (poluição), e criando assim um incentivo econômico aos agentes participantes do mercado. Segundo Stern et al. (2006), sob a ótica da teoria econômica, ao aplicar-se um preço sobre as emissões de carbono, empresas ou indivíduos pagam o custo social de se emitir GEE.

Os instrumentos de precificação do carbono ligam-se a iniciativas que colocam um preço explícito em emissões de GEE – expressas em uma unidade monetária por tonelada de dióxido de carbono equivalente ( $tCO_2$ ) – que, ou podem ser aplicados na forma de tributos, ou por meio da criação de um Sistema de Comércio de Emissões (ETS). No que diz respeito aos tributos, determina-se um preço a ser pago por uma unidade de gás poluente emitido, de forma que o nível agregado de emissões preestabelecido seja alcançado. A tributação é realizada de modo que o somatório das reduções de poluição atingidas por cada empresa represente um novo nível agregado de controle desejado. Assim, para cálculo da alíquota do imposto ambiental, considera-se as funções de custo de controle dos agentes poluidores. A outra proposta reflete da capacidade dos reguladores em criar mercados em que os agentes interagem em negociações de compra e venda de direitos de emissão transacionáveis. Isto é, no Sistema de Comércio de Emissões, o regulador define a quantidade de emissões permitida e a aloca entre os agentes regulados, permitindo que as interações de mercado definam o preço do carbono.

Embora a tributação seja uma maneira de precificação eficaz, é mais adequada como política interna do que externa, posto que a curva de custo marginal de abatimento (MAC)<sup>1</sup>, não é a mesma para cada país. Já no Sistema de Comércio de Emissões é estabelecido um limite superior para as emissões de GEE, onde os fluxos são direcionados para onde os custos são inferiores (BLOCH, 2010).

Rocha (2003) afirma que a ideia base desse mecanismo é de que a redução, estabilização e/ou eliminação de GEEs sejam alcançadas por meio da comercialização de permissões de emissões e/ou créditos de redução entre as empresas poluidoras. Esse comércio induz a maior flexibilidade no cumprimento das metas ambientais estabelecidas pela regulação vigente. Além disso, com a sua utilização, o poder público fica encarregado apenas em definir as metas

<sup>1</sup> Vale salientar que, as curvas marginais de abatimento significam os "preços-sombras" das metas de emissão, em função da quantidade abatida de emissões, ou seja, o custo marginal de se reduzir as emissões de GEE.

ambientais a serem atingidas, monitorar e penalizar os infratores, enquanto que a escolha das melhores alternativas para se alcançar os objetivos fica a cargo das empresas, que irão buscar sempre a melhor relação custo-efetividade. Assim, esse mecanismo apresenta-se ao setor privado como uma ferramenta fundamental para a gestão de riscos e desenvolvimento de vantagens competitivas em um mundo em transição para o baixo carbono.

Para Gusmão et al. (2015), o ETS tem como propósito oferecer alternativas para que os poluidores possam reduzir suas emissões da maneira mais econômica possível por meio de: i) aquisição de permissões de poluição; ii) uso de tecnologias de baixo carbono; ou iii) compra de créditos de carbono no mercado. Ao se utilizar desse instrumento, o regulador fornece aos poluidores opções para maximizar suas escolhas, de modo a obter o menor custo marginal de abatimento, ou seja, o menor custo de investimento por  $tCO_2$  que deixa de ser emitida.

Para Bloch (2010) o comércio de emissões é um mecanismo quantitativo que estabelece e fixa as metas gerais de emissões e, como tal, permite com que os preços variem, forçando os poluidores a se protegerem contra incertezas futuras. Conforme reportado pelo autor, é possível determinar o menor custo para se atingir as metas exigidas e se proteger de possíveis flutuações nos preços a partir de uma estrutura de otimização de Lagrange para as curvas de custo marginal de abatimento. Rocha (2003) define as curvas de custo marginal de abatimento (MAC) como sendo o custo marginal de se reduzir emissões de GEE, de maneira precisa, um ponto na curva representa o custo marginal de se abater uma unidade adicional de GEE<sup>2</sup>. Consequentemente, o multiplicador de Lagrange determina o preço permitido (limite) no mercado de carbono para os poluidores, que minimiza seus custos e satisfaz a conformidade regulamentar.

### 3.1.1 Sistema de Comércio de Emissões (ETS)

O Sistema de Comércio de Emissões baseia-se na negociação de permissões de emissões de carbono. As permissões são determinadas com base em medidas discretas (Ex.: toneladas), onde se exerce o direito de emitir uma quantidade definida em um determinado tempo (uma vez executado o direito de poluir, a permissão deixa de ter validade). Como apresentado por Rocha (2003), a alocação pode ser realizada por meio de leilões ou distribuída para cada empresa poluidora a partir de uma regulamentação, estipulada normalmente com base no histórico de emissões corrente (TIETENBERG, 1990). A implementação de tal instrumento se torna algo complexo, e assim como qualquer mecanismo de mercado, pode apresentar algumas dificuldades, que segundo Tietenberg (1990) vão abranger; custos de transação<sup>3</sup>, localização

<sup>2</sup> Para mais detalhes, ver Rocha (2003).

<sup>3</sup> Esses custos envolvem os despesas para identificar o parceiro ideal, estabelecer os termos de troca e efetivar o negócio. Na ausência de custos, as negociações para controle da poluição atribuem custo mínimo à sociedade (TIETENBERG, 1990).

geográfica <sup>4</sup>, poder de mercado <sup>5</sup>; dimensão temporal <sup>6</sup>.

O principal mercado de emissões é o europeu (European Union Emissions Trading Scheme, EU ETS), fundamentado no sistema *cap-and-trade* (limite e comércio) de emissões. A partir do *cap-and-trade* o governo (ou órgão regulador) designa um limite total para emissões durante um período determinado e fornece um número fixo de permissões aos agentes poluidores. Cada entidade poluidora deve promover reduções internas de GEE de modo a emitir quantidades de GEE compatíveis com as permissões recebidas, ficando dentro do limite total pré-estabelecido. Se um poluidor não usa todas as suas permissões, pode comercializá-la com outra entidade que não tenha capacidade de emitir apenas aquilo que lhe foi permitido e necessita de mais licenças. Além de comprar permissões excedentes de empresas que não utilizaram todas as suas permissões, os poluidores podem adquirir créditos de carbono (Reduções Certificadas de Emissões, RCEs) provenientes de países ou setores que não possuem uma meta de redução. (GUSMÃO et al., 2015)

Existem diversas formas de distribuir permissões entre os agentes participantes, e cada modelo imerge em resultados diferentes para o mercado e para os próprios participantes. A escolha do mecanismo de alocação de permissões dependerá de diversos fatores, tais como o objetivo do mercado, os setores envolvidos e a necessidade de compensar consumidores por eventuais aumentos de preços (GUSMÃO et al., 2015).

### 3.1.2 Fundamentos de mercado

Para análise dos preços de permissões de emissões de  $CO_2$ , em um modelo em que haja concorrência, os cruzamentos entre as curvas de oferta e demanda são determinantes dos preços de mercado. No entanto, existem outros fatores que orientam os comportamentos destas curvas, e estimulam as flutuações nos preços (HULL, 2017).

A dinâmica dos preços pode apresentar fases de comportamento específico em função dos níveis de produção de  $CO_2$ . Em suma, a produção de  $CO_2$  se relaciona a fatores como; dados meteorológicos, preços de combustíveis, e crescimento econômico. Dessa forma, eventos ambientais inesperados e mudanças nos *spreads* de combustível representam choques no lado da demanda e oferta de permissões de  $CO_2$ , e por conseguinte, afetarão o valor dos preços de mercado. A baixa temperatura induz a um aumento no consumo de energia, logo haverá uma elevação nas emissões de  $CO_2$ , e um possível aumento da demanda por permissões; assim como

<sup>4</sup> Quando consideramos a localização geográfica como fator importante, esses instrumentos de mercado podem gerar falhas, com altas concentrações de poluentes sendo direcionados a determinadas áreas (TIETENBERG, 1990).

<sup>5</sup> O uso desses instrumentos pode induzir na adoção de comportamentos monopolísticos, ou monopsonicos, fazendo com que empresas possam manipular preços e quantidades, e eliminar concorrentes (TIETENBERG, 1990).

<sup>6</sup> As permissões ou créditos podem ser livremente negociados no tempo a partir de empréstimos e poupança, o que pode gerar algumas imperfeições, como o aumento do uso em determinadas épocas, ainda que dificuldades para impor penalidades (TIETENBERG, 1990).

a inconstância de ventos e de chuvas podem induzir na diminuição de geração de energia por fontes renováveis, o que acarreta no aumento de emissões de  $CO_2$  (BENZ; TRÜCK, 2009).

O crescimento econômico pode elevar as emissões de  $CO_2$  pelos agentes poluidores, levando assim a dois possíveis cenários: i) um choque positivo na produção, incentivando o aumento na demanda por licenças de emissões de  $CO_2$ , e conseqüentemente, um aumento nos preços; ii) um choque negativo na produção, acarretando em uma possível queda na produção, o que faz com que haja uma redução nas emissões de  $CO_2$ , impulsionando uma maior oferta de permissões no mercado, e como efeito, uma diminuição de preços.

Koch et al. (2014) afirma que os fundamentos de mercado (teoria do custo marginal de abatimento que sinaliza choques de demanda negativos) podem explicar em parte a queda de preços no EU ETS, porém é necessária uma análise mais aprofundada para identificar o impacto de fatores que envolvam eventos políticos e fraquezas estruturais (baixa credibilidade). Os determinantes de preço dos EUAs são resultados de um longo processo de discussão, todavia ainda há espaço para estudos que quantifiquem o impacto real dos diferentes fatores explicativos.

### 3.1.3 Sistemas de mercado: a experiência europeia

Na Europa, o sistema iniciou-se em 2005, sendo o primeiro sistema internacional de comércio do mundo, e sua implementação foi dividida em períodos de negociações distintos, instituídos como fases<sup>7</sup>. O *European Union Emissions Trading System* (EU ETS) foi ente fundamental para consolidação do Comércio de Emissões<sup>8</sup>. Em janeiro de 2005, começaram-se as negociações de permissões de emissões a partir de um mercado à vista, enquanto, em outubro de 2005, era estabelecido um mercado de futuro na *European Energy Exchange* em Leipzig. Logo, os participantes do mercado tinham a oportunidade de realizar operações de proteção contra supostas volatilidades na demanda ou preços de licenças de  $CO_2$ .

Em 2020, espera-se que as emissões dos setores deste sistema sejam 21% menores em relação a 2005. E em 2030, estima-se que as emissões sejam reduzidas em 43% em relação aos níveis de 2005, como parte do atual regime climático e energético da UE. A fase atual (terceira fase) do EU ETS teve início em 2013 e persistirá até 2020. O EU ETS opera em todos os países da UE, além da Islândia, Liechtenstein e Noruega, e limita as emissões de mais de 11.000 instalações que usam energia pesada (centrais elétricas e plantas industriais) e companhias aéreas que operam entre esses países, cobrindo cerca de 40% das emissões de gases com efeito de estufa da UE.

Com a intenção de aumentar a liquidez, a EU-ETS permite a participação de empresas não emissoras ou de investidores individuais na negociação das permissões de emissões de  $CO_2$

<sup>7</sup> 1) Fases 1 e 2 (2005-2012): agregação dos Planos Nacionais de cada estado-membro da UE, com valores limites descentralizados. 2) Fase 3 (2013-2020): estabelecimento de um limite único de emissões em toda a UE, adoção do leilão como método padrão para a atribuição de licenças, e adesão de mais setores e gases. 3) Fase 4 (2021-2030): fortalecimento da EU ETS como um gerador de investimentos, aumentando o ritmo de reduções anuais de licenças para 2,2% a partir de 2021, e reforçando a Reserva de Estabilidade de Mercado.

<sup>8</sup> Informações gerais sobre os Comércios de Emissões, encontram-se no Apêndice A.

(em inglês, an European Union Allowance (EUA)). As licenças de emissões *spot* com base no câmbio no EU-ETS são principalmente negociadas continuamente por meio da European Energy Exchange (EEX), que recentemente integrou a Powernext francesa e os mercados de energia Nordic Nord Pool. Os contratos à vista nestes mercados correspondem a uma EUA e são liquidados fisicamente no dia seguinte da transação. A negociação de contratos futuros de permissão de emissões é realizada principalmente por meio da ICE Futures Europe. O ativo subjacente do contrato futuro em ambas as bolsas é de 1000 EUAs *spot*, com os contratos mais líquidos sendo esses com vencimentos anuais (dezembro) para cada ano<sup>9</sup>.

O EEX, estabelecido em 2002, é o mercado alemão de eletricidade que fornece uma estrutura para o comércio de contratos de eletricidade e EUAs, e é um dos maiores mercados de energia da Europa. Cada contrato especifica um determinado preço e período de entrega, e chega a 1000 EUAs (equivalente a 1000 toneladas de  $CO_2$ ), com preços cotados em euros por tonelada de  $CO_2$ . O preço de ajuste<sup>10</sup> é estabelecido pela bolsa de acordo com o atual preço de mercado do contrato em uma base diária, enquanto o preço de ajuste final é aquele definido na última negociação do dia.

### 3.1.4 A experiência de negociações em bolsa: a importância do mercado de derivativos

O referencial teórico que pode ser utilizado como base para a formação do mercado de carbono, classifica-o em três níveis: primário, secundário e derivativo (Beil<sup>11</sup>, 1999 e Beil Assim<sup>12</sup>, 2000 citado por Rocha, 2003):

1. **Mercado primário:** distribuição de permissões pelo órgão regulador, seja por meio de leilões ou alocações gratuitas;
2. **Mercado secundário:** compra e venda de permissões;
3. **Mercado derivativo ou mercado futuro:** compra e venda de produtos financeiros cujos ativos subjacentes derivam dos mercados primários e secundários (Ex.: contratos futuros de permissões de  $CO_2$ ). Esses contratos têm como objetivo minimizar os riscos de preços e investimentos provenientes dos mercados primários e secundários.

Existe a necessidade de se observar diversas questões para a implementação do mercado de emissões. Para SANDOR e WALSH (2000), a evolução deste processo depende de sete passos: 1) ocorrência de mudanças estruturais que criem demanda por capital; 2) origem de uma

<sup>9</sup> No Anexo 2 podem ser visualizadas as particularidades do contrato de EUA.

<sup>10</sup> De acordo com Hull (2017), "o preço de ajuste é utilizado para calcular os ganhos e perdas diários e os requerimentos de margem".

<sup>11</sup> Beil, S. (1999, August). Evolution and design of an emissions trading market of greenhouse gases. In *2nd annual emissions trading forum* (pp. 30-31).

<sup>12</sup> BEIL, S., ASSIM, F. (2000). The "securitisation" of environmental markets: from theory to reality. In *Apresentado no Workshop Forests in the Green Economy*, Sidnei.

padronização uniforme para a *commodity* (carbono); 3) o desenvolvimento de ferramentas legais que garantem o direito de propriedade; 4) o desenvolvimento de mercados à vista informais e de entrega futura (mercado a termo); 5) o surgimento de bolsas; 6) a formação de mercados futuros e de opções; e 7) a proliferação de mercados de balcão. Dadas as características prévias para formação de um mercado de carbono, é válido considerar que a sua operacionalização pode ser considerada similar a de qualquer outro mercado de *commodities*?

Admite-se que os participantes do mercado mantêm estoques, uma vez que, os mercados de *commodities* estão sujeitos a flutuações estocásticas tanto na produção quanto no consumo. Como resultado, o preço de mercado de um produto (ativo financeiro) não é igual ao valor presente dos fluxos de caixa futuros, sequer é equivalente ao valor esperado do pagamento final, porém é significativamente conduzido pela demanda e pelo abastecimento. O mercado *spot*<sup>13</sup> é uma compensação diária de preço fixo obtido pelo equilíbrio de compras e vendas ordenado por meio dos agentes. O "*covenience yield*" representa as vantagens de se obter fontes físicas do ativo ao invés de contratos de entrega futura. A volatilidade do preço *spot* da *commoditie* geralmente é alta quando o estoque está baixo, e a volatilidade dos contratos futuros diminui com o vencimento (efeito Samuelson). Dentre os riscos que impactam os preços futuros incluem-se o custo de armazenamento, o custo de entrega, o risco de volume e o risco de taxa de juros (BLOCH, 2010).

Em virtude de variações inesperadas na demanda por energia, os agentes poluidores não têm informações *ex-ante* da sua demanda por permissões de emissões. Como resultado, alguns dos riscos inerentes ao sistema de comércio de emissões são o risco de preço e de volume. Sendo assim, empresas devem desenvolver uma gestão de risco que se adeque as suas estratégias, como também modelos confiáveis para estimar a demanda por permissões de emissões de  $CO_2$  da Europa, com intenção de reduzir as possibilidades futuras em arcar com pagamentos de multas, ou possíveis altas nos preços para a compra de licenças adicionais de  $CO_2$  (BLOCH, 2010).

Nos mercados EU-ETS, a quantidade anual de licenças de emissões é limitada e já exatamente especificada pela diretiva da UE para todos os períodos de comércio. Além disso, as permissões de emissões de  $CO_2$  têm um limite de duração da validade, pois perdem seu valor uma vez usado para cobrir as emissões de  $CO_2$ , enquanto cada um permanece, o subsídio expira após cada período de compromisso. Como resultado, o preço das licenças é determinado diretamente pela escassez esperada de mercado induzida pela demanda e oferta atuais. Consequentemente, a probabilidade de uma armadilha de iliquidez potencial existe se os participantes do mercado enfrentam uma compressão durante o evento de conformidade (BLOCH, 2010).

Mesmo que o mercado trate as licenças de emissões como *commodities*, o acerto físico envolve apenas um lançamento contábil em uma conta nacional. Como resultado, alguns autores como Uhrig-Homburg et al.(2009) presumem que as EUAs são negociáveis sem restrições,

<sup>13</sup> Neste trabalho, mercado *spot* é usado como termo para referenciar o mercado à vista.

considerando que o armazenamento das EUAs é possível e gratuito dentro dos períodos de negociação. Portanto, pode-se replicar uma posição *long*<sup>14</sup> comprando EUAs a crédito, se não houver benefício direto em manter EUAs até que seja necessário para conformidade, ou seja, emissores regulamentados de  $CO_2$  poderiam vender alguns de seus EUAs, e usar o dinheiro em uma abordagem de custo de transporte para replicar uma posição curta a prazo a uma taxa livre de risco. Por outro lado, outros autores como Borak et al. (2006) consideram que a falta das licenças de emissão, reduzindo o limite de emissões ao longo dos períodos de alocação, classifica os ativos como fatores normais de produção. Estes podem ser transferidos para a produção de  $CO_2$  e são removidos após o resgate, tornando-os mais próximos das *commodities*.

### 3.1.5 Os fundamentos do mercado de futuro

Segundo (HULL, 2017), os mercados de derivativos, após sua criação e expansão, passaram a atrair um número cada vez mais elevado de negociantes. Os contratos negociados impuseram a padronização e homogeneidade dos produtos. Esse mercado caracteriza-se pela independência de intervenção governamental (e formação de monopólio), o que configura uma dinâmica de mercado semelhante aos fundamentos econômicos oriundos da concorrência perfeita. Os principais produtos negociados no mercado de derivativos são: os contratos futuros, contratos a termo, e os contratos de opções<sup>15</sup>.

Nos mercados futuros os ativos ou produtos não são diretamente comercializados, ao contrário do que acontece no mercado à vista e a termo. Segundo Hull (2017), os contratos futuros são compromissos padronizados em que as partes assumem comprar e vender um ativo financeiro ou índice econômico por um preço previamente estabelecido, em uma determinada data futura; os mercados são posicionados onde há alta volatilidade nos preços, e para existência destes faz-se necessário que o produto esteja perfeitamente padronizado, de forma que um contrato seja substituto perfeito de outro.

Tais operações buscam minimizar os riscos de preços assumidos pelos produtos. Neste tipo de negociação, pode-se destacar três agentes: a) os hedgers, preocupados em se defender das oscilações de preços do mercado físico; b) os especuladores, interessados em assumir riscos de preços; e c) os arbitradores, que obtêm ganhos financeiros a partir da identificação de possíveis desequilíbrios entre os mercados. Em linhas gerais, todos os agentes são tomadores de riscos, dado que, em tese, todo o custo associado às variações de preços distribui-se entre eles.

Para fins de evitar a inadimplência de uma das partes no momento em que ocorre a liquidação, ambas as partes realizam pagamentos intermediários que podem representar perdas ou ganhos segundo a variação negativa ou positiva no valor diário das posições dos agentes (sendo tais margens acumuladas conforme o período de maturação do contrato). Para ocorrência das negociações, exige-se o depósito de uma margem de garantia aos negociantes de contratos futuros, os quais ocorrem em câmaras de compensação. Essa margem relaciona-se ao tamanho

<sup>14</sup> Quando o investidor é *long*, significa que assume uma posição comprada no mercado (HULL, 2017).

<sup>15</sup> Estes mercados têm como ideia básica a proteção contra as flutuações de preços no futuro.

e número de contratos negociados, e garante que o depósito do ajuste diário seja cumprido. A margem é corrigida diariamente conforme preço de ajuste, na liquidação de uma operação, o montante excedente (não utilizado) depositado como margem, é estornado ao investidor.

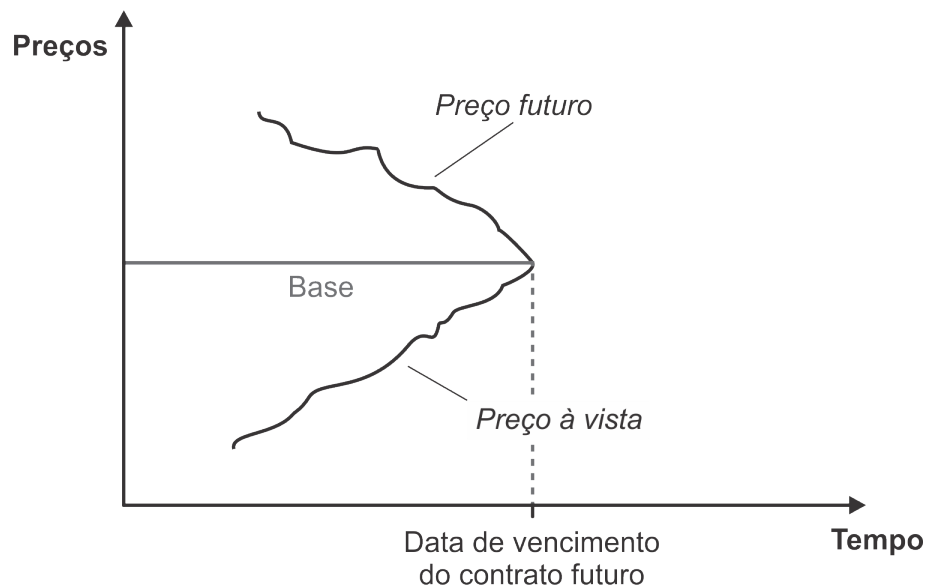
Na descrição do contrato é especificado o preço futuro, de modo que nenhum pagamento seja realizado de imediato. Entretanto, na data de vencimento do contrato o investidor que assume uma posição futura comprada (*long*), ou posição futura de venda (*short*), deve realizar ou receber montantes diários pela eventual compra da mercadoria. Quando o preço futuro aumenta, o comprador deve receber do vendedor a quantia referente a diferença de preço, e vice-versa, tal processo é denominado como "marcação a mercado"(ou *marking-to-market*). Assim como no mercado *spot*, as flutuações de preços futuros são determinadas a partir das mudanças de expectativa entre a oferta e procura das mercadorias (HULL, 2017).

Ainda segundo Hull (2017), a ampla maioria dos contratos futuros não são concretizados com a entrega física da mercadoria. Isto ocorre devido a possibilidade que o comprador/vendedor tem de encerrar suas posições antes do período de entrega especificado no contrato. Encerrar uma posição condiz em realizar uma operação contrária à original. Como resultado, o investidor pode ganhar ou perder, condição que é determinada pela diferença de preço futuro entre a data de adesão e encerramento do contrato, decorrente da liquidação financeira.

Ao explorar as vantagens operacionais e econômicas dos contratos futuros, Cavalcante, Misumi e Rudge (2005), citam que que além da proteção contra o risco de preços realocação de exposição ao risco de variação no preços entre os integrantes do mercado, seus benefícios abrangem a garantia de preços futuros, a aumento do grau de competitividade no mercado à vista (disseminação dos preços das *commodities*, a atração de capitais de risco, redução de custos de financiamento e maior disseminação de informações.

Conforme o período de liquidação de um contrato futuro se aproxima, o preço futuro tende a convergir com o preço à vista do ativo subjacente, entretanto não na mesma magnitude, visto que as expectativas podem influenciar os preços de maneiras distintas. A formação dos preços no mercado de futuro fundamenta-se pelas diferenças de preços entre o mercado *spot* e futuro. Para entender melhor este processo, é estabelecido o conceito de "risco de base"<sup>16</sup>, que caracteriza este diferencial de preços, no qual o "risco de base" pode evoluir durante a maturação do contrato, podendo assumir valores negativos, positivos, ou iguais a zero. Dessa forma, os investidores podem ter à sua disposição uma oportunidade clara de arbitragem, ou os preços *spot* e futuro tendem à convergência, configurando a diminuição do "risco de base" e sua equivalência nula (HULL, 2017).

<sup>16</sup> A incerteza sobre a base durante um período futuro pode ser determinada como "risco de base", que é essencial ao investidor que deseja realizar operações de *hedge* no momento de fixação do preço no mercado futuro para melhor estabelecer a estratégia de *hedging* a ser implementada (HULL, 2017).

**Figura 3** – Convergência de preços entre os mercados *spot* e futuro.

Fonte: Adaptado de Hull (2017).

A convergência de preços ocorre, pelo fato de que, no período de liquidação, o contrato futuro é auferido com propriedades iguais ao do mercado *spot*. Em sentido oposto (divergência de preços), existiriam oportunidades de arbitragem, e seria possível que o investidor obtivesse lucro sem incorrer riscos a partir operações simultâneas de compra e venda. Como exemplo, supõem-se que, no vencimento, o preço futuro fica abaixo do preço à vista, neste caso os agentes estariam interessados em adquirir o ativo, considerando compensatório firmar contratos futuros comprados, e em seguida vendê-los no mercado *spot*, garantindo ganhos, teoricamente, livres de risco. Quando isto ocorre, os arbitradores vão atuar de forma a restaurar o equilíbrio, o preço de futuro tenderá a aumentar, garantindo a convergência de preços.

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a modelagem de séries financeiras, diversos pesquisadores ainda utilizam o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Como apresentado por Engle (2001), esta escolha se dá pelo fato de que econométricos aplicados buscam isolar os efeitos de uma variável sobre a outra. Nestes métodos, a estacionariedade é premissa básica para modelagem. Porém, ao tratar retornos financeiros, estas séries tendem a ter volatilidade não constante (isto é, heterocedasticidade). Nessas situações, uma alternativa ao MQO são os modelos não lineares, ou seja, um estudo empírico onde a volatilidade desempenha um papel importante.

Assim sendo, para séries financeiras, como a abordada neste estudo, para identificação da dinâmica utiliza-se de modelos não lineares que admitem a heterocedasticidade, como é o caso da classe de modelos ARCH (*Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*). Neste estudo serão estimadas três extensões muito utilizadas do modelo original, a saber, os modelos GARCH, EGARCH e TARARCH, sendo que, a variância condicional fornecida por estes modelos será utilizada como *proxy* para a volatilidade do retorno das permissões de emissões de  $CO_2$ .

Em síntese, pretende-se estudar, de forma mais pontual, a dinâmica de preços das permissões de emissões de  $CO_2$  a partir de modelos não lineares, e sobretudo, o processo de transmissão de preços no mercado secundário por meio de um modelo de *hedge* estático.

### 4.1 Modelos ARCH

Enquanto os modelos tradicionais lineares assumem homoscedasticidade, ou seja, termo de erro com variância constante ao longo do tempo, o modelo proposto por Engle (1982) de séries temporais autorregressivas com heterocedasticidade condicional (ARCH( $p$ )), foi o primeiro modelo formal que conseguiu abordar o problema da heterocedasticidade (BENZ; TRÜCK, 2009). Engle (1982) introduziu este modelo, caracterizando-o por um processo estocástico único, com variância condicional evoluindo no tempo. Ao estimar a variância da inflação norte-americana, no estudo de Engle (1982), foi possível verificar a existência de aglomerações (*clusters*) alternadas entre períodos de pequenas e grandes variações em torno da média.

Para a pesquisa, a estrutura base do modelo consiste da ideia de que o retorno  $r_t$  é não correlacionado serialmente, mas a variância condicional depende dos termos de erro passados por meio de uma função quadrática. No modelo, a dependência do comportamento da variância de sua trajetória passada dá origem ao termo "condicional". Para Morais e Portugal (1999), a definição de volatilidade parte dessas características, isto é, consiste na variância condicional dos retornos, sendo uma variável não observada modelada a partir de informações passadas.

Alternativamente, há de se conceituar a Teoria dos Mercados Eficientes. Fama (1970) apresenta que os preços incorporam todas as informações disponíveis aos participantes do mer-

cado. Seja  $p_t$ , o preço no período  $t$  e  $r_t = \ln(p_t) - \ln(p_{t-1})$  o retorno composto continuamente gerado no período  $t - 1$  e  $t$ . Logo, variações nos preços (retornos) não são previsíveis. Morettin (2017) ainda destaca que esta não previsibilidade diz respeito àqueles retornos "anormais", não previstos pelo mercado.

Partindo do conceito de eficiência estabelecido na Teoria dos Mercados Eficientes, como apresentado por Morettin (2017), os modelos ARCH permitem que os erros (inovações) sejam não correlacionados, mas não estocasticamente independentes, ou seja,  $Cov(r_t^2, r_{t-1}^2)$  pode ser diferente de zero. O autor ainda expõe algebricamente a forma de modelos não lineares, que é apresentada pela equação a seguir:

$$r_t = g(\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots) + \varepsilon_t h(\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots), \quad (4.1)$$

em que,  $r_t$  representa o retorno no período  $t$ ;  $\varepsilon_i$  os choques aleatórios nos períodos  $i = t, t - 1, t - 2, \dots, 1$ ;  $g(\cdot)$  a média condicional e  $h^2(\cdot)$  a variância condicional. Dessa forma, se  $g(\cdot)$  for não linear, o modelo será não linear na média, por outro lado, se  $h(\cdot)$  for não linear, o modelo será não linear na variância (caso dos modelos ARCH). Portanto, considere o seguinte modelo:

$$r_t = \varepsilon_t \sqrt{\alpha r_{t-1}^2}. \quad (4.2)$$

Note que a média condicional é igual a zero [ $g(\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots) = 0$ ], já que a equação 4.2 não apresenta choques passados ( $\varepsilon_{t-1}$ ). Por outro lado, a variância condicional é igual a  $\sqrt{\alpha r_{t-1}^2}$ , pois segue a forma apresentada na equação 4.1, em que  $\varepsilon_t h(\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots) = \varepsilon_t \sqrt{\alpha r_{t-1}^2}$ . Esse modelo segue a forma de um processo ARCH.

Um modelo ARCH pode ser descrito em termos da distribuição dos erros de um modelo autorregressivo linear dinâmico. Partindo dessa lógica, os retornos gerados possam ser descritos pelo seguinte processo autorregressivo de ordem  $k$ :

$$r_t = \phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i r_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4.3)$$

O modelo original proposto por Engle (1982), em que  $p$  denota a ordem do modelo, expressa a variância condicional do modelo anterior para a média condicional como uma função dos resíduos passados por meio de uma função quadrática, dada a formalização do modelo:

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \dots + \alpha_p \varepsilon_{t-p}^2, \quad (4.4)$$

onde  $h_t$  é a variância condicional. Os coeficientes  $\alpha_i$ , com  $i = 1, \dots, p - 1$ , satisfazem algumas restrições para que a volatilidade não apresente valores negativos, considera-se então  $\alpha_0 > 0$ ,  $\alpha_1 \geq 0$ ,  $\alpha_p > 0$ , condições que diferem o modelo de um AR( $p$ ) puro. Admita-se também que  $\sum_{i=1}^p \alpha_i < 1$ , onde as raízes da equação polinomial  $(1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i L^i)$  precisam

estar fora do círculo de raio unitário para que a série seja estacionária. Na prática, supõem-se que  $\varepsilon_t \sim N(0, 1)$ ,  $\varepsilon_t \sim 0$  ou uma distribuição que melhor descreva as caudas pesadas das séries financeiras.

Conforme apresentado em Morettin (2017), uma importante característica dos modelos ARCH é que valores grandes de  $r_t$  são seguidos por outros valores grandes da série, uma vez que tal comportamento é o que vai caracterizar a ocorrência dos *clusters*.

De modo a justificar as propriedades do modelo, consideremos  $p=1$ :

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2, \quad (4.5)$$

com  $\alpha_0 > 0, \alpha_1 > 0$ .

A média e a variância incondicionais da série, respectivamente, são representadas por:

$$(i) E(r_t) = E\{E(r_t | F_{t-1})\} = 0;$$

$$(ii) Var(r_t) = E(\varepsilon_t^2) = E\{E(\varepsilon_t^2 | F_{t-1})\} = E(\alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2) = \alpha_0 + \alpha_1 E(\varepsilon_{t-1}^2).$$

Dado que o processo  $\varepsilon_t$  seja estacionário de segunda ordem, logo, para todo  $t$ ,  $E(\varepsilon_t^2) = E(\varepsilon_{t-1}^2) = Var(r_t)$ , onde:

$$Var(r_t) = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_1}. \quad (4.6)$$

Como  $Var(r_t) > 0$ , tem-se que  $0 < \alpha_1 < 1$ .

$$(iii) Cov(r_t, r_{t+k}) = E(r_t r_{t+k}) = E[E(r_t r_{t+k} | F_{t+k-1})] \\ = E[r_t E(r_{t+k} | F_{t+k-1})] = E[r_t E(\sqrt{h_{t+k}} \varepsilon_{t+k} | F_{t+k-1})] = 0,$$

para  $k > 0$ , pois  $r_t$  está em  $F_{t+k-1}$  e  $(\varepsilon_{t+k}|_{F_{t+k-1}}) = 0$ .

Assim sendo,

$$\gamma_r(k) = 0, k \geq 1.$$

Genericamente, obtém-se que  $r_t$  é uma sequência de variáveis não correlacionadas (ruído branco), com média zero e variância calculada a partir de (4.6). Assim, o termo  $r_t$  é usado como referencial para uma série não autocorrelacionada, ou para o resíduo da aplicação de um processo ARMA à série original (retornos) (MORETTIN, 2017).

#### 4.1.1 Identificação

Morettin e Toloí (2006) colocam que na primeira etapa para a construção de modelos ARCH, faz-se necessário identificar o padrão ARMA  $(p,q)$  associado a série de retornos, com intenção de remover a correlação serial na série, caso exista. No processo de identificação é sugerido a adoção da metodologia Box-Jenkins, efetuada a partir da observação das Funções de Autocorrelação (FAC) e Funções de Autocorrelação Parcial (FACP). A partir da FAC estima-se o processo de médias móveis MA(q), representado por:

$$r_j = \frac{c_j}{c_0}, j = 0, 1, \dots, T - 1, \varepsilon_{t-1}^2, \quad (4.7)$$

onde  $c_j$  é estimado pela autocovariância amostral.

Como dito anteriormente, a FAC é adequada para identificar processos MA<sup>1</sup>, sendo inutilizada para processos ARMA, que têm FAC complicada. Assim sendo, propõem-se a utilização da FACP para facilitar este procedimento. Denota-se por  $\phi_{kj}$  o  $j$ -ésimo coeficiente de uma modelo AR( $k$ ), de modo que  $\phi_{kk}$  seja o último coeficiente. A FACP mensura o grau de correlação entre  $r_t$  e  $r_{t-k}$  depois de retirada a influência de  $r_{t-1}, \dots, r_{t-k+1}$ , e é estimada pela função:

$$\phi_{kk} = \frac{|P_k^*|}{|P_k|}, \varepsilon_{t-1}^2, \quad (4.8)$$

sendo  $P_k$  a matriz de autocorrelação, e  $P_k^*$  a matriz  $P_k$  com a última coluna substituída pelo vetor de autocorrelações.

Ademais, a escolha do modelo pode ser feita com base em diversos critérios, como o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério Bayesiano de Schwarz (SBC):

$$AIC(k, l) = \ln \sigma_{k,1}^2 + \frac{2(k+l)}{T} \quad (4.9)$$

$$SBC(k, l) = \ln \sigma_{k,1}^2 + (k+l) \frac{\ln(T)}{T}, \quad (4.10)$$

sendo  $\sigma_{k,1}^2$  o estimador de máxima verossimilhança de  $\sigma^2$  e  $T$  observações da série.

#### 4.1.2 Estimação

A estimação dos modelos ARCH ( $p, q$ ) é realizada por meio do método de máxima verossimilhança, como documentado por Brooks, Burke e Persaud (2001). Uma hipótese geralmente utilizada é a de que o termo de erro assume uma distribuição normal. Esta é uma hipótese justificável, posto que Bollerslev e Wooldridge (1992) mostraram que os estimadores de máxima verossimilhança dos parâmetros de uma modelo ARCH, quando assumem distribuição normal, são consistentes ainda que a verdadeira distribuição não seja gaussiana. Para atingir tal consistência, necessita-se utilizar a matriz de variância-covariância corrigida, proposta por Bollerslev e Wooldridge (1992).

De acordo com Issler (1999), para efetuar a estimação por máxima verossimilhança, primeiro decompõe-se a densidade conjunta da amostra  $(r_1, \dots, r_t)$  recursivamente, com um produto das densidades condicionais para formar:

$$f(r_1, \dots, r_t; \theta) = \prod_{t=1}^T f(r_t | r_{t-1}, \dots, r_{t-k}; \theta), \quad (4.11)$$

<sup>1</sup> Um processo MA( $q$ ) tem FAC finita, no sentido que ela apresenta um corte após o "lag"  $q$  (MORETTIN; TOLOI, 2006).

em que  $\theta$  é o vetor de parâmetros da densidade conjunta,  $r_1$  é um vetor que contém a variável explicada e  $T$  o número de observações. O condicionamento em relação às observações pré-amostrais está subentendido. Assumindo-se, por exemplo, normalidade condicional para os termos de erro  $\varepsilon_t$  do modelo ARCH ( $p, q$ ), tem-se que:

$$f(r_1|r_{t-1}, \dots, r_{t-k}; \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi h_t}} \exp\left(\frac{-1}{2} \frac{\varepsilon_t^2}{h_t}\right). \quad (4.12)$$

Com a especificação correta da forma funcional de  $f(r_1|r_{t-1}, \dots, r_{t-k}; \theta)$ , a função de verossimilhança condicional derivada da normal pode ser escrita como:

$$\ln(L(\theta; \cdot)) = \sum_{t=1}^T f(r_t|r_{t-1}, \dots, r_{t-k}; \theta) = \frac{-T}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \ln(\sigma_t^2) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \frac{\varepsilon_t^2}{\sigma_t^2} \quad (4.13)$$

A função anterior é maximizada por métodos numéricos, sujeita às restrições de negatividade necessárias. Ademais, deve-se fornecer valores iniciais para o vetor de parâmetros  $\theta$  e para as séries  $\varepsilon_t^2$  e  $\sigma_t^2$ .

Em modelos ARCH, com  $\varepsilon_t$  normal ou  $t$ -Student, os resíduos (padronizados) são v.a. i.i.d. com distribuição normal padrão ou  $t$ -Student. Isto posto, uma forma de verificar o ajuste do modelo é calcular a estatística  $Q$  de Ljung-Box para os resíduos. Para mais, pode-se calcular os coeficientes de assimetria e curtose estimados, ainda que um gráfico  $Q \times Q$  para avaliar a suposta normalidade (ou  $t_\nu$ ). Com intenção de testar a presença de heterocedasticidade condicional autorregressiva utiliza-se o teste do tipo multiplicador de Lagrange proposto por Engle (1982); a estatística de teste possui distribuição qui-quadrado. Assim, comparando-se o valor calculado desta estatística com a entrada apropriada de uma distribuição qui-quadrado, pode-se testar a hipótese nula de não haver evidência de heterocedasticidade condicional.

## 4.2 Modelos GARCH, TARCH e EGARCH

Benz e Trück (2009) em suas aplicações práticas para dados de séries temporais financeiras, observam que a ordem  $p$  do modelo estimado é bastante grande. No entanto, quando a variância condicional depende não apenas de valores passados da série, mas também de uma média móvel de variâncias condicionais, o modelo resultante permite uma maior representação parcimoniosa dos dados. Este modelo *Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity* (GARCH( $p, q$ )) sugerido por Bollerslev (1986), em que  $p$  representa a ordem do componente de médias móveis ARCH e  $q$  a ordem do componente autorregressivo GARCH, é definido como:

$$r_t = \varepsilon_t \sqrt{h_t} \quad (4.14)$$

$$h_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j h_{t-j}, \quad (4.15)$$

em que  $\varepsilon_t$  são variáveis aleatórias i.i.d., com média zero,  $\alpha_0 > 0$ ,  $\alpha_i \geq 0$ ,  $i = 1, \dots, p-1$ ,  $\beta_j \geq 0$ ,  $j = 1, \dots, q-1$ ,  $\alpha_p > 0$ ,  $\beta_q > 0$ ,  $\sum_{i=1}^q (\alpha_i + \beta_i) < 1$ ,  $q = \max(p, q)$ . Parâmetros positivos fornecem uma condição suficiente, mas não necessária, para que  $h_t > 0$ .

Swaray et al. (2002) aborda que o modelo em GARCH ( $p, q$ ) define a variância condicional de uma série de retornos como dependendo de uma constante, de informações defasadas da volatilidade (i.e, os termos  $\varepsilon_{t-i}^2$ ) e de variâncias previstas passadas (os termos  $h_{t-j}$ ). Para o autor, a incorporação de variâncias condicionais defasadas pode capturar o efeito de "aprendizagem adaptativa" que caracteriza o processo. Em geral, tal como nos modelos ARCH, supõem-se que os  $\varepsilon_t$  são normais, seguem uma distribuição *t-student*, ou uma distribuição de erro generalizada. Bollerslev (1986) indica que uma forma parcimoniosa e simples verificada nas aplicações é a do modelo GARCH (1,1):

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \beta_1 h_{t-1}, \quad (4.16)$$

em que  $\alpha_1$  capta a reação da volatilidade aos choques nos retornos e,  $\beta_1$  indica a persistência dos choques na volatilidade. Para Swaray et al. (2002), o benefício desta especificação é que ela inclui poucas restrições nos parâmetros. As condições para a variância do processo ser positiva e fracamente estacionária são,  $\alpha_0, \alpha_1 > 0$ ;  $\beta_1 > 0$  e  $\alpha_1 + \beta_1 < 1$ . A soma de  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  mede a dinâmica (memória) gerada por choques na volatilidade da série de retornos. Em situações práticas, quando mais próxima de um for a soma ( $\alpha_1 + \beta_1$ ), maior o tempo que um choque na série levará para dissipar-se.

Para Morettin (2017), a identificação da ordem de modelos ARCH a ser ajustado a uma série torna-se procedimento difícil, por sua vez, recomenda-se o uso de modelos de ordem baixa, como (1,1), (1,2), (2,1) ou (2,2).

Os modelos anteriores (ARCH e GARCH) tratam que os choques na volatilidade são simétricos, pois a volatilidade é uma função quadrática dos mesmos. Porém, nos mercados financeiros, verifica-se as variantes dos modelos seminais em que, variações negativas nos preços são comumente seguidas por períodos de maior volatilidade, enquanto que em movimentos de alta nos preços da mesma magnitude, a volatilidade não é tão intensa. Essa assimetria é determinada como "efeito alavancagem", sendo que, em geral choques positivos e negativos tendem a ter impactos diferentes sobre a volatilidade. Tal propriedade pode ser capturada por duas extensões do modelo GARCH, o modelo EGARCH de Nelson (1991), e o modelo TARARCH de Zakoian (1994).

No modelo proposto por Nelson (1991), denominado EGARCH ( $p, q$ ) (*Exponential GARCH*), o efeito de choques é exponencial, em vez de quadrático. A especificação da variância

condicional para o modelo EGARCH (1,1) segue a forma funcional:

$$\ln(h_t) = \alpha_0 + \beta_1 \ln(h_{t-1}) + \alpha_1 \left| \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sqrt{h_{t-1}}} \right| + \gamma \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sqrt{h_{t-1}}}, \quad (4.17)$$

com a ressalva de que não há assimetria na volatilidade quando  $\gamma_1 = 0$ . Conforme Issler (1999), isto constitui um processo de teste para o efeito de assimetria. Se  $\gamma_1 \neq 0$ , institui-se um impacto diferenciado de choques negativos e positivos na volatilidade. Se  $\gamma_1 < 0$ , suporta-se evidências do "efeito alavancagem", em que choques negativos têm maior impacto na volatilidade<sup>2</sup>. A persistência de choques na volatilidade é medida pelo parâmetro  $\beta_1$ . E note que, na 4.17, usa-se o logaritmo de  $h_t$ , o que implica que os coeficientes do modelo não precisam ser negativos.

O modelo TARCh (1,1) (*Threshold Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*) é um caso particular do modelo ARCH não linear, e pode ser formalizado por:

$$h_t = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \beta h_{t-1} + \gamma_1 d_{t-1} \varepsilon_{t-1}^2, \quad (4.18)$$

com

$$d_t = \begin{cases} 1, & \text{se } \varepsilon_t < 0 \text{ ("bad news")} \\ 0, & \text{se } \varepsilon_t \geq 0 \text{ ("good news")} \end{cases}$$

ou seja,  $d(\cdot)$  é uma variável binária que assume valor igual a 1 quando o termo de erro atende à restrição  $\varepsilon_{t-1} \leq 0$ , e  $\gamma_1$  é o parâmetro que indicará se a assimetria é positiva ou negativa. A variável binária assume o valor  $d_{t-1} = 1$ , se  $\varepsilon_{t-1} < 0$ , e  $d_{t-1} = 0$  caso contrário. Não há assimetria na variância se  $\gamma_1 = 0$ . Condições adversas do mercado e informações negativas (i.e,  $\varepsilon_t < 0$ ), como instabilidades regulatórias, têm um impacto de  $\alpha_1 + \gamma_1$ . Informações positivas (i.e,  $\varepsilon_t \geq 0$ ), como boas condições de demanda por exemplo, têm impacto  $\alpha_1$ . Se  $\gamma_1 > 0$ , há evidências do efeito alavancagem.

### 4.3 Razão de Hedge de Variância Mínima

A razão de *hedge*, como estabelecido por Hull (2016), apresenta a razão entre o tamanho da posição assumida nos contratos futuros e o tamanho do risco. Neste sentido, a razão de *hedge* de variância mínima depende da relação entre as mudanças nos preços à vista e futuro de determinado ativo, o qual pode ser apresentado pela equação 4.19:

$$h^* = \rho \frac{\sigma_S}{\sigma_F} \quad (4.19)$$

em que  $h^*$  é a razão de *hedge* de variância mínima,  $\sigma_S$  é o desvio padrão de  $\delta S$  e  $\sigma_F$  é o desvio padrão de  $\delta F$ . Vale ressaltar que  $\delta S$  e  $\delta F$  representam as mudanças no preço à vista e futuro, respectivamente. Suponha  $h^* = 1$ , isto significa que o preço futuro dos contratos de permissões

<sup>2</sup> "Esta assimetria permite que a volatilidade responda mais rapidamente a retornos negativos do que a positivos" (MORETTIN, 2017).

de emissões de  $CO_2$  correspondem exatamente aos preços à vista. Se  $h^* = 0,5$ , a mudança no preço futuro corresponde ao dobro da variação no preço à vista.

Hull (2016) ainda destaca que  $h^*$  é a inclinação da linha de melhor ajuste de uma regressão linear de  $\delta S$  em função de  $\delta F$ . Sendo assim, como proposto por Ederington (1979), pode-se estimar um modelo a partir do método de Mínimos Quadrados Ordinários, no qual o coeficiente  $\beta_1$  será a própria razão ótima de *hedge* e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) a efetividade do *hedge*, ou seja, a proporção da variância (risco) eliminada pela diversificação. A padronização do modelo é dada pela equação:

$$\delta S_t = \beta_0 + \beta_1 \delta F_t + \mu_t \quad (4.20)$$

Quanto maior o coeficiente de determinação, mais eficiente será a operação de *hedge*, visto que as variações nos preços futuros em relação aos preços *spot* estarão melhor explicadas.

Para Myers e Thompson (1989), essa é a abordagem mais simplificada para o cálculo da razão ótima de *hedge*, pois não considera a autocorrelação residual, e a premissa de heterocedasticidade condicional inerente a modelagem de séries financeiras. Logo, caso exista correlação serial nos resíduos, a estimação via MQO pode gerar uma regressão espúria. A outra falha induzida pelo método, induz a estimativa de que o risco no mercado físico e futuro são constantes ao longo do tempo, ou seja, a estimação da razão ótima de *hedge* que minimiza o risco independe de variações no tempo.

Dada essas restrições, no intuito de atenuar os problemas apresentados pelo modelo convencional, Myers e Thompson (1989) propõem um Modelo Regressivo Generalizado para estimação da razão ótima de *hedge*, que pode ser observada na equação 4.21:

$$S_t = \beta_0 + \beta_1 \delta F_t + \sum_{i=1}^q \alpha_i S_{t-i} + \sum_{i=1}^q \alpha_{q+j} F_{t-j} + \mu_t \quad (4.21)$$

$$\Delta S_t = \beta_0 + \beta_1 \delta \Delta F_t + \sum_{i=1}^q \alpha_i \Delta S_{t-i} + \sum_{i=1}^q \alpha_{q+j} \Delta F_{t-j} + \mu_t, \quad (4.22)$$

onde  $S_t$  denota o preço *spot*, bem como  $\Delta S$  e  $\Delta F$  equivalem as variações dos preços *spot* e futuro, respectivamente. A equação 4.21 representa a estimação com as variáveis em nível. No entanto, caso verificada a ausência de estacionária na série, esta é tratada em primeira diferença, como na equação 4.22. A razão ótima de *hedge* é simbolizada pelo coeficiente angular  $\delta$ , e sua efetividade é calculada por meio do coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ).

## 4.4 Base de Dados

Para observar a viabilidade da implementação de um comércio de emissões no Brasil, deve-se observar a conjectura deste mercado no contexto internacional. Para isto, são analisadas as séries históricas dos preços *spot* e futuro em EUR/ $CO_2$  dos contratos de licenças de emissões

de  $CO_2$  da Europa (EUA). A fim de obter uma série representativa considera-se contratos futuros com vencimento em dezembro, dado o maior número de contratos negociados neste mês. Os dados de preço de contrato *spot* são fornecidos pela European Energy Exchange (EEX), e os preços de contrato futuro são oferecidos pela ICE Futures Europe, ambas representam as principais plataformas de negociação do EU ETS.

A fim de obter uma análise comparativa, são utilizadas a série histórica de preços *spot* em CNY/t $CO_2$  dos contratos de licenças de emissões na China (em inglês, China Emissions Allowances (CEAs)) do mercado-piloto de Xangai<sup>3</sup>, e a série histórica de preços *futuro* em USD/t $CO_2$  dos contratos de permissões de emissões na Califórnia (em inglês, Californian Carbon Allowances (CCAs)). Ambas as séries de preços são disponibilizadas pelo *International Carbon Action Partnership*.

O período considerado foi do dia 01 de janeiro de 2014 a 10 de outubro de 2020 para a série de licenças de emissões do ETS da União Europeia (EU ETS). A escolha do período de análise desta série concilia-se ao fato de que no ano de 2013 iniciou-se a fase III do sistema de comércio europeu, e um fluxo extenso da literatura dedica-se a analisar somente os preços das EUAs na fase I e II do EU ETS, enquanto as evidências para a fase III permanecem escassas. Para as demais séries, utilizadas em termos comparativos, utiliza-se o período do dia 03 de janeiro de 2014 a 30 de novembro de 2020 para o ETS regional da China, e do dia 07 de janeiro de 2013 a 29 de março de 2018 para o ETS da Califórnia. Essas diferenças temporais são decorrentes da disponibilidade dos dados obtidos.

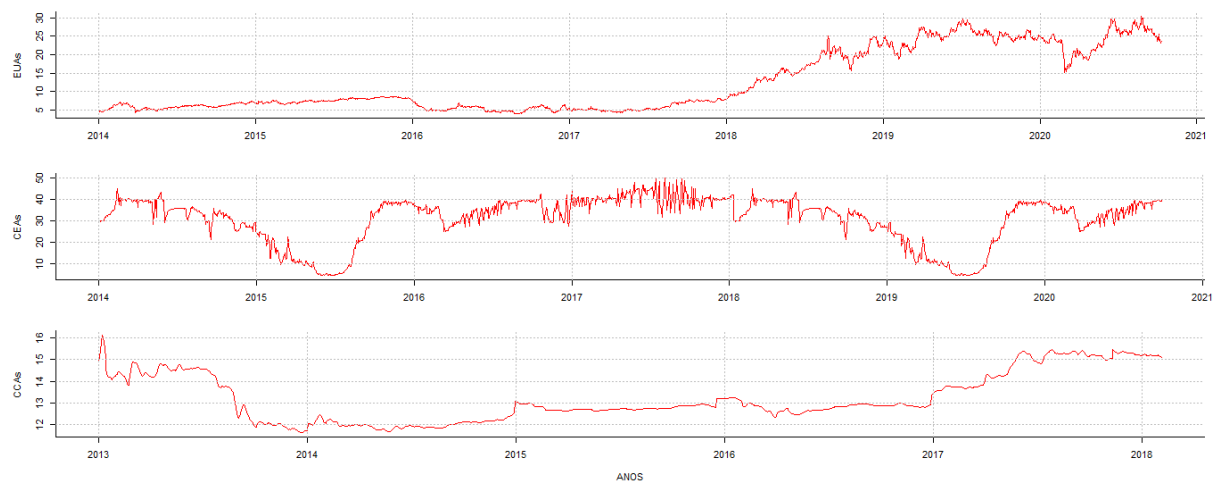
As séries foram transformadas em taxas de retornos instantâneos compostos continuamente por  $r_t = \ln(p_t) - \ln(p_{t-1})$ , em que  $p_t$  e  $p_{t-1}$  são os preços das permissões de emissões de  $CO_2$  na data  $t$  e na data anterior  $t - 1$ . Conforme Morais e Portugal (1999), o uso dos retornos ao invés de preços, é proveniente do fato de que as séries absolutas de preços são, em sua maioria, não estacionárias. Dado isso, a vantagem de se trabalhar com séries de retornos está relacionada as suas propriedades estatísticas mais tratáveis (estacionariedade e ergodicidade), pois raramente são acompanhadas de tendência ou sazonalidades (MORETTIN; TOLOI, 2006).

<sup>3</sup> Segundo Slater et al. (2019), até setembro de 2019, 360 milhões de toneladas de permissões foram negociadas no mercado primário e secundário do esquema regional de comércio de emissões da China, sendo Xangai um dos mercados-piloto regionais com maior volume de negociações.

## 5 RESULTADOS

Para a estimação dos modelos, *a priori*, deve-se observar os gráficos das séries temporais como uma primeira evidência da disposição dos dados. A Figura 4 ilustra o comportamento da série de preços de EUAs, CEAs e CCAs.

**Figura 4** – Série de preços das permissões de emissões de  $CO_2$  da Europa (EUAs), China (CEAs), e da Califórnia (CCAs).



Fonte: Elaboração Própria.

Previamente a análise da Figura 4, é importante salientar os problemas com excesso de oferta sofridos na fase inicial do EU ETS (2015-2016), que argumentaram a queda de 60% nos preços das EUAs, e são justificados por um excedente na distribuição de licenças de permissões. Além disso, os preços das EUAs experimentaram uma queda acentuada também entre 2008 e 2013, fluando de 28 EUR/t $CO_2$  em meados de 2008 para 5 EUR/t $CO_2$  em 2013. As principais causas para este sinal de preço consideram a profunda e duradoura crise econômica de 2008, as políticas climáticas sobrepostas, a exemplo das tarifas "feed-in"<sup>1</sup> para energias renováveis, e o grande fluxo de Certificados de Reduções de Emissão.

Como observado na Figura 4, após alguns anos de contrações na demanda e subsequentes quedas nos preços, estabeleceu-se em 2018, a Reserva de Estabilidade de Mercado (REM) do EU ETS, com o objetivo de absorver o excesso de licenças de emissões do mercado e tornar o sistema mais resiliente no que diz respeito aos desequilíbrios entre oferta e procura. Nesse sentido, o mercado voltou a subir em 2018, com os preços variando em torno de 25 EUR/t $CO_2$ . No início de 2020, a pandemia de coronavírus (Covid-19) e a desaceleração econômica que se

<sup>1</sup> Mecanismo utilizado por políticas públicas destinadas a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis por meio da oferta de contratos de longo prazo aos produtores.

seguiu, foram os fatores que mais influenciaram a queda dos preços, sendo a Reserva de Estabilidade de Mercado insuficiente para amenizar esses choques inesperados. Em geral, por meio da Figura 4 é possível observar que a partir de 2014, a maior parte das flutuações nos preços estão relacionadas a choques negativos na demanda estimulados por variáveis associadas a teoria do custo marginal de abatimento.

Para o mercado-piloto de Xangai, usado para representar o mercado *cap-and-trade* da China<sup>2</sup>, verifica-se uma queda nos primeiros anos (2014-2015). Apesar de períodos de instabilidade, os preços se estabilizam em torno de uma média de 38 CNY/tCO<sub>2</sub>, em função principalmente das expectativas dos agentes, que segundo Slater et al. (2019) esperam que o comércio de emissões de carbono afete cada vez mais as decisões de investimento da China nos próximos anos. A recente queda nos preços pode ser atribuída à pandemia de Covid-19, e em parte à relativa falta de clareza quanto à base jurídica subjacente a proposta entregue para a formalização do ETS nacional.

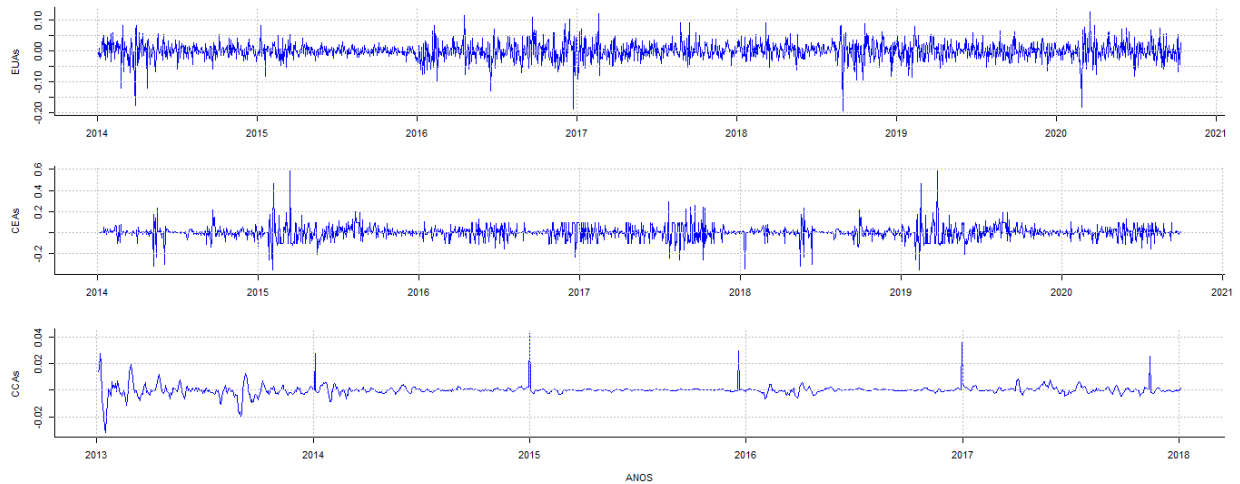
Anteriormente a análise dos preços das permissões de emissões da Califórnia, é válido destacar a sua entrada em vigor em 2012, e recente vinculação ao sistema *cap-and-trade* do Québec (2014)<sup>3</sup>. No ano de 2013, o momento de instabilidade e consecutiva queda nos preços das licenças de emissões, liga-se a um excesso de oferta relacionado ao crescimento de políticas públicas destinadas a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis e a lenta recuperação econômica, ambos fatores reduziram as emissões de CO<sub>2</sub> no estado. Após um período de estabilidade, os preços das licenças voltaram a um patamar de 15 USD/tCO<sub>2</sub> em 2017, refletindo o aumento da confiança, familiaridade e participação no mercado de carbono da Califórnia.

Ademais, a Figura 5 refere-se as séries de retornos das EUAs, CEAs e CCAs. A Figura 5 revela que as séries diárias de retornos possuem *clusters* de volatilidade, ou melhor, valores grandes de log-retorno são seguidos por outros valores grandes da série. Os *clusters*, em sua maioria, são provenientes de momentos de queda na cotação dos preços, corroborando para a hipótese de que o comportamento dos preços de permissões de emissões confirma a motivação deste estudo em trabalhar com modelos que lidam com processos voláteis induzidos por fatores de longo prazo.

Os gráficos dos retornos das séries também permitem inferir que os log-retornos se concentram em torno de uma média zero ao longo do tempo, observando-se a existência de picos em que o log-retorno assumiu valores muito altos ou baixos. Adicionalmente, verifica-se, a partir dos picos, que a variação do log-retorno não aparenta ser constante, o que acusa a existência de um possível comportamento heterocedástico da variância.

<sup>2</sup> Desde 2013 e 2014, os mercados-piloto de carbono estão em operação em cinco municípios (Pequim, Chongqing, Xangai, Tianjin e Shenzhen) e três províncias (Guangdong, Hubei e Fujian). Nos últimos anos, essas regiões desenvolveram ainda mais seus mercados, expandindo a cobertura, refinando suas regras de operação, incluindo mecanismos de alocação, e introdução de produtos derivados.

<sup>3</sup> O programa de *cap-and-trade* da Califórnia agora constitui o terceiro maior mercado de carbono do mundo, depois da China e da União Europeia.

**Figura 5** – Série de retornos das permissões de emissões de  $CO_2$  da Europa (EUAs), China (CEAs), e da Califórnia (CCAs).

Fonte: Elaboração Própria.

Para compreender melhor as séries de log-retornos trabalhadas, foram calculadas as estatísticas descritivas para as permissões de emissões da Europa (EUAs), da China (CEAs) e da Califórnia (CCAs), como indicado na Tabela 1. Por meio da avaliação dos resultados é possível destacar alguns fatores relevantes: a média dos retornos gira em torno de zero; o excesso de curtose (curtose maior que 3) para todas as séries confirma que a função de probabilidade dessa distribuição é leptocúrtica, ou que a distribuição tem caudas longas<sup>4</sup>, o que sugere que a distribuição normal não se encaixa muito bem aos dados; os valores de assimetria são diferentes de zero e varia entre valores positivos e negativos, a assimetria é negativa para as EUAs, indicando que a distribuição tem a cauda direcionada para a esquerda (maior concentração de valores negativos), e para as CEAs e CCAs a assimetria é positiva, indicando que os valores estão concentrados à direita.

**Tabela 1** – Estatísticas descritivas das séries de log-retornos ( $r_t$ ) diários.

	EUAs	CEAs	CCAs
<b>Número de observações</b>	1762	1014	1284
<b>Mínimo</b>	-0,1944	-0,3590	-0,0323
<b>Máximo</b>	0,1280	0,5877	0,0428
<b>Média</b>	0,0009	0,0003	0,0000
<b>Desvio-padrão incondicional</b>	0,0292	0,0688	0,0038
<b>Assimetria</b>	-0,5539	0,6021	1,9655
<b>Curtose</b>	4,9214	9,7783	35,5380
<b>Jarque-Bera</b>	1874,9566	4122,0882	68625,5023
<b>(p-valor)</b>	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Elaboração Própria.

<sup>4</sup> Maior probabilidade de ocorrência de eventos extremos do que o previsto por uma distribuição normal.

Devido a assimetria, o excesso de curtose e caudas longas, a escolha de modelos alternativos que permitem mudanças na estrutura de volatilidade, assimetria e curtose devem fornecer melhor ajuste à série temporal. Para formalização dessas características e diagnóstico da normalidade das distribuições é efetuado o teste de Jarque & Bera. O valor  $p$  observado da estatística desse teste na Tabela 1 confirma a rejeição da hipótese nula de distribuição normal para os retornos das séries.

Como indicado na metodologia, antes de estimar o modelo para a variância condicional, avaliou-se a existência de correlação serial e heterocedasticidade condicional nas séries de log-retornos. Dessa forma, foram aplicados o teste Q de Ljung-Box com intenção de verificar a presença, ou não, de correlação serial, e o teste de multiplicadores de Lagrange (ML) de Engle para confirmar a existência de heterocedasticidade nos resíduos, ambos os testes para equação da média condicional.

A Tabela 2 apresenta a especificação do modelo ARMA ( $p,q$ ) para a equação na média, bem como as estatística  $Q(k)$  de Ljung-Box, para verificar a existência de correlação serial nos resíduos gerados pelo ARMA. Após a definição do modelo ARMA, os resíduos são gerados, e utilizados para estimação dos modelos ARCH e para testar presença do efeito ARCH (heterocedasticidade), respectivamente, como visto na Tabela 2.

**Tabela 2** – Modelo ARMA( $p,q$ ), estatística  $Q(k)$  e o Teste ML de Engle.

	Modelo	Q(12)*	Teste ARCH de Engle*
<b>EUAs</b>	ARMA(1,1)	10,226 (0,5961)	35,368 (0,0000)
<b>CEAs</b>	ARMA(2,2)	14,96 (0,2436)	12,197 (0,0004)
<b>CCAS</b>	ARMA(2,2)	17,796 (0,122)	78,502 (0,0000)

\*Os valores entre parênteses indicam o  $p$ -valor.

Fonte: Elaboração Própria.

Para o trabalho em questão, na equação da média utiliza-se a especificação ARMA(1,1) para séries de retornos das EUAs, enquanto as séries de CEAs e CCAs ajustam-se ao modelo ARMA(2,2). Como apresentado na Tabela 2, em todas as séries, as estatísticas  $Q(12)$  para os resíduos do ARMA( $p,q$ ) têm valor  $p$  superior a 0,20, sustentando estatisticamente que os modelos selecionados foram capazes de eliminar a correlação serial, gerando, desse modo, resíduos i.i.d. A partir das inovações (resíduos) desse modelo é realizada a modelagem da equação da variância condicional. Frente a esse diagnóstico, na etapa posterior, os resíduos da equação da média são usados para testar a existência de heterocedasticidade. Conforme reportado na Tabela 2, o teste ARCH realizado apresenta um  $p$ -valor inferior a 0,05 para todas as séries, ou seja, tem-se a rejeição da hipótese nula de que não há heterocedasticidade ao nível de significância de 5%. Portanto, comprova-se a existência do efeito ARCH e, a consequente, necessidade de utilização de modelos da família ARCH para as amostras selecionadas. Cabe ressaltar, a constatação de que a distribuição  $t$ -Student foi a mais apropriada para a modelagem de todas as séries de log-retornos.

Na etapa consecutiva, modela-se a volatilidade dos retornos condicionais, levando em consideração o padrão heterocedástico da volatilidade. A Tabela 3 dispõe somente dos resultados finais das especificações dos modelos ARCH, obtidos após diversas simulações, selecionadas por meio dos critérios de AIC e SBC<sup>5</sup>.

**Tabela 3** – Estimativas dos modelos GARCH, EGARCH e TARARCH para as séries.

Modelo	Coeficiente de variância condicional para os modelos ARCH						
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\gamma_1$	$\gamma_2$
<b>EUAs</b>							
GARCH(1,1)	0,0000 <sup>(NS)</sup> (0,1214)	0,0764 (0,0000)		0,9213 (0,0000)			
EGARCH(1,1)	-0,1349 (0,0000)	-0,0273 (0,0685)		0,9813 (0,0000)		0,1808 (0,0000)	
TARARCH(2,1)	0,0008 (0,0402)	0,0688 (0,0000)	0,0712 (0,0094)	0,8954 (0,0000)		0,2827 (0,0902)	-0,6308 (0,0020)
<b>CEAs</b>							
GARCH(1,2)	0,0001 (0,0013)	0,5085 (0,0000)		0,2783 (0,0039)	0,2120 (0,0056)		
EGARCH(2,1)	-0,1142 (0,0067)	-0,0325 <sup>(NS)</sup> (0,8411)	0,3045 (0,0025)	0,9630 (0,0000)		2,0740 (0,0050)	-0,8070 (0,0000)
TARARCH(1,2)	0,0046 (0,0022)	1,0000 (0,0000)		0,2970 (0,0018)	0,2418 (0,0029)	0,0417 <sup>(NS)</sup> (0,5239)	
<b>CCAs</b>							
GARCH(1,2)	0,0000 <sup>(NS)</sup> (0,8958)	0,3248 (0,0000)	0,1534 (0,0155)	0,5207 (0,0039)			
EGARCH(2,1)	-0,149 (0,0000)	-0,0240 <sup>(NS)</sup> (0,6483)	-0,1644 (0,0018)	0,5463 (0,0000)	0,4429 (0,0000)	0,2620 (0,0000)	-0,0381 <sup>(NS)</sup> (0,4687)
TARARCH(2,2)	0,0000 <sup>(NS)</sup> (0,5262)	0,6552 (0,0034)		0,0936 (0,0000)	0,5351 (0,0557)	-0,0375 <sup>(NS)</sup> (0,3674)	

Notas:

1. Os parâmetros não significativos estão sobrescritos com <sup>(NS)</sup>.

2. Os valores entre parênteses indicam o *p*-valor.

Fonte: Elaboração Própria.

Conforme análise prévia da Tabela 3 os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são estatisticamente significantes em quase todos os modelos analisados, salvo pelos valores de  $\alpha_1$  estimados pelos modelos EGARCH(2,2) e EGARCH(2,1) para as séries de CEAs e CCAs, respectivamente. Nesse sentido, verifica-se a importância dos choques de um a dois períodos anteriores para a estimação da volatilidade. Os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$  foram estatisticamente significativos para todos os modelos, denotando também a importância da variância condicional defasada para a estimação da volatilidade.

Para a série de retornos das permissões de emissões de  $CO_2$  da União Europeia (EUAs), no GARCH(1,1) o  $\alpha_1$  tem o valor de 0,0764, o que equivale dizer que a amplitude das variações de preços reagem com um movimento menor. O parâmetro  $\beta_1$  assume um valor de 0,9213, dessa maneira admita-se que 92,13% da volatilidade do dia anterior é transmitida para o dia seguinte.

<sup>5</sup> As diferentes ordens de defasagens ARCH e GARCH são retratadas na Figura B.1, do Apêndice B

Para o modelo EGARCH(1,1), o parâmetro  $\gamma_1 \neq 0$  fornece evidência de assimetria na série, ou seja, choques positivos e negativos têm impacto distinto sobre a volatilidade, entretanto, não há evidências do efeito alavancagem. A persistência de choques na volatilidade dos retornos, captada pelo termo  $\ln(h_{t-1})$  foi de 0,9782, próxima da estimada pelo modelo GARCH(1,1), que indica uma elevada persistência dos choques. O TARCH(2,1) reafirma o padrão de persistência dos choques na série, dado que o coeficiente estimado apresentou similaridade ao dos modelos anteriores. O parâmetro  $\gamma_1$  foi estatisticamente significativo, confirmando a presença de assimetria e a ausência de efeito alavancagem, sendo os retornos positivos os de maior impacto na volatilidade.

Os coeficientes estimados para os retornos das permissões de  $CO_2$  da China (CEAs) são estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% para quase todos os modelos. No modelo GARCH(1,2), tem-se um valor de  $\alpha_1$  igual a 0,5085, o que sugere que a série possui um maior nível de variações dos preços médios ao longo do tempo. O  $\beta_1$  e beta 2 assumem valores inferiores a 0,30, cabe sinalizar então que, 27,83% e 21,20% de choques gerados na série no tempo  $t - 1$  e  $t - 2$ , respectivamente, persistirão no tempo  $t$ . O parâmetro  $\gamma_1$  fornecido pelo EGARCH(2,1) indica a existência de efeito assimetria, porém ignora a presença de efeito alavancagem. Nesta especificação, o  $\beta_1$  assume um valor de 0,9630, diferente do padrão de persistência obtido pelo modelo GARCH. O modelo TARCH(1,2), indica a não significância estatística do efeito alavancagem  $\gamma_1$ , apontando que quedas e subidas nos preços tendem a ter o mesmo efeito sobre a volatilidade. Em suma, os modelos captam padrões de volatilidade que se divergem entre si, indo de contramão ao que se espera, e corroborando para a proposição de incompatibilidade analítica desses modelos na série de CEAs.

Na série de retornos de permissões de emissões de  $CO_2$  da Califórnia (CCAs), para o GARCH(1,2) os parâmetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\beta_1$  são estatisticamente diferentes de zero, tanto os parâmetros de reação quanto os de persistência. Os resultados observados se assemelham aos calculados para a série de CEAs no que diz respeito ao alto nível de reação da volatilidade a choques na série, bem como pelo baixo grau de persistência, em que a volatilidade observada de um período anterior tende a influenciar pouco na volatilidade dos retornos do dia seguinte. A assimetria de choques na volatilidade é confirmada pelo modelo EGARCH(2,1), posto que o parâmetro  $\gamma_1$  mostrou-se significativo, mas é dispensada pelo TARCH(2,2), dada a não significância estatística do  $\gamma_1$  nesta especificação. Para o TARCH(2,2)  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são significativos, sendo  $\beta_2$  (0,0936) maior que  $\beta_1$  (0,5351),  $\beta_2$  incorpora informações relevantes aos modelos, diminuindo o impacto de  $\beta_1$  na estimação da volatilidade.

De modo geral, tem-se que a soma dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  indicam quão voláteis são as séries. Com base nos parâmetros observados na Tabela 3 a soma dos coeficientes de reação e persistência são superiores a 0,68, mostrando que, após um choque, o processo de reversão da variância condicional para o seu valor médio tende a acontecer lentamente. Os indicadores da qualidade e ajuste das séries mostraram que todos os modelos ajustados tiveram um desempenho bastante adequado. Tais indicadores e os resultados completos das estimações para a

média condicional e a volatilidade de todas as séries estão reportados na Tabela B.2, B.3, B.4 do Apêndice B.

Dada a alta volatilidade nos preços das licenças de emissões, admite-se a importância da gestão de risco de preços, ou melhor, a necessidade de que instrumentos financeiros como futuros, opções, entre outros, sejam vistos como alternativas para diminuir a exposição à volatilidade verificada nos preços das permissões de emissões analisadas. Na tentativa de comprovar essa proposição, estima-se o *hedge* de variância mínima para as licenças da Europa, onde foi obtido um padrão de volatilidade mais bem definido. Em primeira instância, para verificar o processo de causalidade e transmissão de preços efetua-se o teste de Causalidade de Granger. Os resultados do teste indicam que não há causalidade dos preços futuros pelos preços *spot* no sentido de Granger, tal indicativa também foi verificada no sentido inverso. Portanto evidencia-se que não há repasse de informações dos preços futuros aos preços *spot*, e vice-versa.

Apesar de não ser observado a causalidade por meio do teste de Granger, foram-se estimados os modelos de razão ótima e efetividade para o mercado. Antes disso, realizam-se os testes de raiz unitária para as séries de preços e log-retornos<sup>6</sup>, onde observa-se que as variáveis em nível (preços) são não estacionárias, recusando a hipótese de estabilidade em suas trajetórias. Quanto à série de log-retornos, todos os testes indicaram a ausência de raiz unitária. Posto a estabilidade verificada nos log-retornos, aplica-se o modelo de *hedge* estático, formalizado a seguir:

$$\begin{array}{cccccc} \text{EUA}Spot_t = 0,0001 & + & 1,0190\text{EUA}Futuro_t & R^2 & \text{ARCH} & \text{Jarque-Bera} \\ & & & 0,982 & (0,0000) & (0,0000) \\ & & (0,123) & & & & (0,0000) \end{array}$$

O dados obtidos revelam que o agente atuante no mercado *cap-and-trade* teria que negociar cerca de 1,02 contratos em sua posição no mercado futuro, comprando ou vendendo contratos de permissões de emissões de  $CO_2$  no mercado secundário da EU ETS, para buscar minimizar aproximados 98% da variância da receita, o que denota em uma operação com alta efetividade.

É válido enfatizar que, as estimativas não estão isentas de heterocedasticidade, autocorrelação, e não normalidade dos resíduos, apesar do parâmetro observado ser estatisticamente significativo. Além disso, o modelo estimado pelo método de Mínimos Quadrados Ordinários admite que a variância e covariância das séries sejam constantes ao longo do tempo, o que não é verificado de modo empírico. Entretanto, de acordo com Fan, Roca e Akimov (2014), no EU ETS, a razão ótima e efetividade de *hedge* invariantes no tempo, calculadas por meio de modelos mais simples, superam os índices de *hedge* variantes no tempo, estimados por modelos mais sofisticados.

<sup>6</sup> Ver resultados dos testes de Causalidade de Granger e de Raiz Unitária nas Tabelas B.5 e B.6, do Apêndice B.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de instrumentos de precificação de carbono vem crescendo rapidamente ao redor do mundo, consolidando-se como alternativa central de políticas climáticas pautadas na redução de emissões de  $CO_2$ . No contexto nacional, o objetivo de mitigação de emissões de GEE está dado pela Contribuição Nacional Determinada do Brasil, e programas como o da Lei 13.576/17 (RenovaBio), reforçam a necessidade da adoção de instrumentos de precificação de carbono como uma opção com custo-efetividade para reduzir o gasto total de cumprimento das metas estabelecidas.

Existem motivações, derivadas tanto do contexto nacional quanto internacional, para que o Brasil analise o potencial de adoção de um instrumento de precificação de carbono. O presente estudo tem como objetivo identificar a dinâmica dos instrumentos de precificação de carbono em andamento, e estudar o possível enquadramento dos modelos de precificação na Lei 13.576/17 (RenovaBio).

Neste estudo, são observados os Sistemas de Comércio de Emissões da União Europeia, da China, e da Califórnia para avaliação da dinâmica da volatilidade dos preços de permissões de emissões de  $CO_2$ . Para identificação desta dinâmica busca-se analisar os agrupamentos, a persistência e a assimetria da volatilidade das permissões de emissões, partir dos modelos GARCH, EGARCH e TARARCH, modelos estocásticos apropriados para captar o padrão de retornos das séries. A posteriori, estima-se um modelo de transmissão de preços do mercado futuro para o *spot*, no intuito de verificar a razão ótima e efetividade do *hedge* para um modelo estático. Por meio do estudo da dinâmica de preços e modelos de transmissões de preços os agentes adquirem condições para otimizar suas estratégias de investimento contra flutuações inesperadas nos preços das licenças.

As séries da União Europeia (EUAs), China (CEAs) e da Califórnia (CCAs) foram transformadas em taxas de retorno instantâneos compostos continuamente. Em relação aos resultados, observou-se que as especificações do modelo na equação da média para as séries da União Europeia, China e Califórnia, foram ARMA (1,1), ARMA (2,2) e ARMA(2,2), respectivamente. Constatou-se que estes modelos foram capazes de eliminar a correlação serial, e que há presença de efeitos ARCH. Na avaliação da variância condicional dos retornos, seus efeitos assimétricos mostram resultados diferentes para os mercados explorados.

Para a série de retornos das permissões de emissões de  $CO_2$  da União Europeia foi constatada a alta transmissão da volatilidade de um dia para outro, além da alta persistência de choques na volatilidade dos retornos. De maneira contrária, para a série da China e Califórnia, observou-se que a volatilidade do dia anterior possui uma baixa influência na volatilidade dos retornos do dia seguinte, assim como um baixo grau de persistência dos choques.

As séries de permissões de emissões da China e da Califórnia se assemelham no re-

lativo ao padrão de volatilidade estimado. Os resultados de falta de assimetria revelados pelos parâmetros  $\gamma$  nas especificações TARARCH de ambas as séries, de imediato, parecem incoerentes, visto que o efeito alavancagem em séries financeiras é fato estilizado. Entretanto, não foram encontrados estudos utilizando modelagens que captam o efeito assimétrico em outra janela temporal para estas séries, o que permitiria comparar os resultados alcançados com o presente estudo.

Posteriormente, a soma dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  indicam quão voláteis são as séries, os parâmetros observados mostram que, após um choque, o processo de reversão da variância condicional para o seu valor médio tende a acontecer lentamente, ratificando o comportamento dinâmico das séries. Em linhas gerais, os padrões de variância condicional estimados pelos coeficientes de reação e persistência corroboram com a análise gráfica para explicar as aglomerações de volatilidade no que diz respeito suas permanências e magnitudes ao longo do tempo.

As descobertas feitas por esse estudo, apoiam fortemente a adequação a modelos que capturam características como assimetria, excesso de curtose, e, como sugestão para a melhoria da exploração da dinâmica da volatilidade, tem-se como desafio a utilização de modelos que possam capturar as diferentes fases de comportamento da volatilidade, e incorporar componentes como a atividade econômica, as variações climáticas, os aspectos políticos e regulatórios, na volatilidade dos retornos.

Em relação ao modelo de razão ótima de *hedge* e sua efetividade, apesar de não verificada a causalidade no sentido de Granger entre os preços futuro e *spot*, a razão ótima do modelo (coeficiente angular da regressão) indica que cerca de 1,02 contratos devem estar comprometidos em cada operação de *hedge* com contratos futuros. Efetivamente, essa operação deve cobrir 98% do risco em que agentes comercializadores de contratos de EUAs estariam expostos. Sendo assim, os resultados sugerem que a criação e desenvolvimento de instrumentos de *hedge* baseados no mercado, podem ser ferramentas adequadas frente a volatilidade e persistência dos choques sobre a volatilidade verificada para os retornos.

Em meio ao cenário de impactos e recuperações econômicas, uma crescente atenção está sendo dada à promessa dos mercados de carbono de atingir eficientemente as metas climáticas e, ao mesmo tempo, apoiar outros objetivos econômicos, como já destacado neste estudo. De qualquer maneira, para que os compromissos brasileiros assumidos sejam alcançados por meio de uma trajetória custo-efetiva, é fundamental que mecanismos de precificação de carbono sejam estabelecidos. Os mercados "maduros" de hoje possuem anos de experiência. Nesse sentido, a análise prévia destes mercados, com a intenção de entender os seus modelos e dinâmicas, é fundamental para a compreensão das perspectivas de enquadramento da Lei 13.576/17 (RenovaBio) na formação de um futuro mercado de carbono no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ALBEROLA, E.; CHEVALLIER, J.; CHÈZE, B. Price drivers and structural breaks in european carbon prices 2005–2007. **Energy policy**, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 787–797, 2008.
- BARANZINI, A. et al. Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, Wiley Online Library, v. 8, n. 4, p. e462, 2017.
- BENZ, E.; TRÜCK, S. Co2 emission allowances trading in europe—specifying a new class of assets. **Problems and Perspectives in Management**, Citeseer, v. 4, n. 3, p. 30–40, 2006.
- BENZ, E.; TRÜCK, S. Modeling the price dynamics of co2 emission allowances. **Energy Economics**, Elsevier, v. 31, n. 1, p. 4–15, 2009.
- BLOCH, D. A. A note on emissions trading: The pricing of carbon derivatives. **Available at SSRN 1701619**, 2010.
- BOERSEN, A.; SCHOLTENS, B. The relationship between european electricity markets and emission allowance futures prices in phase ii of the eu (european union) emission trading scheme. **Energy**, Elsevier, v. 74, p. 585–594, 2014.
- BOLLERSLEV, T. Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. **Journal of econometrics**, North-Holland, v. 31, n. 3, p. 307–327, 1986.
- BOLLERSLEV, T.; WOOLDRIDGE, J. M. Quasi-maximum likelihood estimation and inference in dynamic models with time-varying covariances. **Econometric reviews**, Taylor & Francis, v. 11, n. 2, p. 143–172, 1992.
- BORAK, S. et al. Convenience yields for co2 emission allowance futures contracts. SFB 649 Discussion Paper 2006-076, 2006.
- BROOKS, C.; BURKE, S. P.; PERSAND, G. **Benchmarks and the accuracy of GARCH model estimation**. [S.l.]: Elsevier, 2001.
- BUENO, M. d. P. El acuerdo de parís: ¿ una nueva idea sobre la arquitectura climática internacional? Universidad Autónoma de Madrid, 2016.
- CAVALCANTE, F.; MISUMI, J. Y.; RUDGE, L. F. **Mercado de capitais: o que é, como funciona**. [S.l.]: Elsevier, 2005.
- CHEVALLIER, J. A model of carbon price interactions with macroeconomic and energy dynamics. **Energy Economics**, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 1295–1312, 2011.
- DASKALAKIS, G.; PSYCHOYIOS, D.; MARKELLOS, R. N. Modeling co2 emission allowance prices and derivatives: Evidence from the eex. **June [online]**, Available from <http://ssrn.com/abstract>, Citeseer, v. 912420, 2006.
- DASKALAKIS, G.; PSYCHOYIOS, D.; MARKELLOS, R. N. Modeling co2 emission allowance prices and derivatives: Evidence from the european trading scheme. **Journal of Banking & Finance**, Elsevier, v. 33, n. 7, p. 1230–1241, 2009.

- EDERINGTON, L. H. The hedging performance of the new futures markets. **The journal of finance**, JSTOR, v. 34, n. 1, p. 157–170, 1979.
- EMMELIN, L. The stockholm conferences. **Ambio**, JSTOR, p. 135–140, 1972.
- ENGLE, R. Garch 101: The use of arch/garch models in applied econometrics. **Journal of economic perspectives**, v. 15, n. 4, p. 157–168, 2001.
- ENGLE, R. F. Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of united kingdom inflation. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, JSTOR, p. 987–1007, 1982.
- FAMA, E. F. Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. **The journal of Finance**, JSTOR, v. 25, n. 2, p. 383–417, 1970.
- FAN, J. H.; ROCA, E.; AKIMOV, A. Estimation and performance evaluation of optimal hedge ratios in the carbon market of the european union emissions trading scheme. **Australian Journal of Management**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 39, n. 1, p. 73–91, 2014.
- FICHTNER, W. E. Energie und produktion e verknappung der umwelnutzung und produktionswirtschaftliche planung. **Berlin: Erich Schmidt**, 2004.
- GUSMÃO, F. et al. Estudos sobre mercado de carbono no brasil: Análise da alocação de permissões. **Banco Interamericano de Desenvolvimento**, Washington DC., n. Monografia No. 309, 2015.
- HAMMOUDEH, S.; NGUYEN, D. K.; SOUSA, R. M. What explain the short-term dynamics of the prices of co2 emissions? **Energy Economics**, Elsevier, v. 46, p. 122–135, 2014.
- HERRMANN, R. The effects of partial international price stabilization on the stability of national export earnings. **The Developing Economies**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 207–224, 1983.
- HITZEMANN, S.; UHRIG-HOMBURG, M.; EHRHART, K.-M. Emission permits and the announcement of realized emissions: Price impact, trading volume, and volatilities. **Energy Economics**, Elsevier, v. 51, p. 560–569, 2015.
- HULL, J. C. **Opções, futuros e outros derivativos**. [S.l.]: Bookman Editora, 2016.
- HULL, J. C. **Fundamentos dos mercados futuros e de opções**. [S.l.]: Bolsa de Mercadorias & Futuros, 2017.
- IPCC. Global warming of 1.5° c. **Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization**, 2018.
- ISSLER, J. V. Estimating and forecasting the volatility of brazilian finance series using arch models. Sociedade Brasileira de Econometria, 1999.
- KOCH, N. et al. Causes of the eu ets price drop: Recession, cdm, renewable policies or a bit of everything?—new evidence. **Energy Policy**, Elsevier, v. 73, p. 676–685, 2014.
- KOSSOY, A. et al. **State and trends of carbon pricing 2015**. [S.l.]: Washington, DC: World Bank, 2015.

- MME. Ministério de minas e energia. “**RenovaBio: Objetivos**”, 2018.
- MORAIS, I. A. D.; PORTUGAL, M. S. Modelagem e previsão de volatilidade determinística e estocástica para a série do ibovespa. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 29, n. 3, p. 303–341, 1999.
- MORETTIN, P. A. **Econometria financeira: um curso em séries temporais financeiras**. [S.l.]: Editora Blucher, 2017.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. Análise de séries temporais. In: **Análise de séries temporais**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 538–538.
- MYERS, R. J.; THOMPSON, S. R. Generalized optimal hedge ratio estimation. **American Journal of Agricultural Economics**, Wiley Online Library, v. 71, n. 4, p. 858–868, 1989.
- NELSON, D. B. Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, JSTOR, p. 347–370, 1991.
- NICOLLETTI, M.; LEFÉVRE, G. B. Precificação de carbono no brasil: perspectivas e aprendizados a partir de uma simulação de mercado cap-and-trade. Cadernos Adenauer, 2016.
- PAOLELLA, M. S.; TASCHINI, L. **An econometric analysis of emission trading allowances**. [S.l.]: Swiss Finance Inst., 2006.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. Co and greenhouse gas emissions. **Our World in Data**, 2017. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- ROCHA, M. T. Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo cert. **Piracicaba: ESALQ/USP**, 2003.
- SANDOR, R. L.; WALSH, M. J. Some observations on the evolution of the international greenhouse gas emissions trading market. **KOSOBUD, RF; SCHREDER, DL; BIGGS, HM Emissions trade: environmental policy’s new approach**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- SEIFERT, J.; UHRIG-HOMBURG, M.; WAGNER, M. Dynamic behavior of co2 spot prices. **Journal of Environmental Economics and Management**, Elsevier, v. 56, n. 2, p. 180–194, 2008.
- SLATER, H. et al. The 2019 china carbon pricing survey. In: **China Carbon Forum, Beijing, China**. [S.l.: s.n.], 2019.
- SMITH, K. et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: **Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. p. 709–754.
- SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do protocolo kyoto ao acordo de paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, 2017.
- SPERANZA, J. et al. **Monitoramento da implementação da política climática brasileira: implicações para a Contribuição Nacionalmente Determinada**. [S.l.], 2017.

- STAVINS, R. N. Addressing climate change with a comprehensive us cap-and-trade system. **Oxford Review of Economic Policy**, JSTOR, p. 298–321, 2008.
- STERN, N. H. et al. **Stern Review: The economics of climate change**. [S.l.]: Cambridge University Press Cambridge, 2006. v. 30.
- SWARAY, R. B. et al. **Volatility of primary commodity prices: some evidence from agricultural exports in Sub-Saharan Africa**. [S.l.], 2002.
- TIETENBERG, T. H. Economic instruments for environmental regulation. **Oxford review of economic policy**, JSTOR, v. 6, n. 1, p. 17–33, 1990.
- WMO. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019**. [S.l.]: World Meteorological Organisation (WMO), 2019.
- ZAKOIAN, J.-M. Threshold heteroskedastic models. **Journal of Economic Dynamics and control**, Elsevier, v. 18, n. 5, p. 931–955, 1994.
- ZHANG, Y.-J.; WEI, Y.-M. An overview of current research on eu ets: Evidence from its operating mechanism and economic effect. **Applied Energy**, Elsevier, v. 87, n. 6, p. 1804–1814, 2010.

# A APÊNDICE A

## ANEXO 1 – Países membros do ANEXO 1.

### Países

---

Alemanha  
Austrália  
Áustria  
Bélgica  
Bielo-Rússia  
Bulgária  
Canadá  
Comunidade Européia  
Croácia  
Dinamarca  
Eslováquia  
Eslovênia  
Espanha  
Estados Unidos  
Estônia  
Federação Russa  
Finlândia  
França  
Grécia  
Hungria  
Irlanda  
Islândia  
Itália  
Japão  
Letônia  
Liechtenstein  
Lituânia  
Luxemburgo  
Mônaco  
Holanda  
Nova Zelândia  
Noruega  
Polónia  
Portugal  
Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte  
República Tcheca  
Romênia  
Suécia  
Suíça  
Turquia

---

Fonte: Adaptado de UNFCCC.

## ANEXO 1 – Contrato Futuro de EUA.



**ICE Futures Europe**  
**Jul 21, 2020**

ICE FUTURES EUROPE

## EUA Futures

### Contract Specifications

Description	The EUA Futures Contract is a deliverable contract where each Clearing Member with a position open at cessation of trading for a contract month is obliged to make or take delivery of Carbon Emission Allowances to or from the Union Registry in accordance with the ICE Futures Europe Regulations.
Unit of Trading	One lot of 1,000 Carbon Emission Allowances (EUA). Each EUA being an entitlement to emit one tonne of carbon dioxide equivalent gas, as further defined in the ICE Futures Europe Regulations.
Minimum Trading Size	1 lot
Quotation	Euro (€) and Euro cent (c) per metric tonne
Minimum Tick	€0.01 per tonne (i.e. €10 per lot)
Minimum Price Fluctuation	€0.01 per tonne
Maximum Price Fluctuation	There are no limits.
Contract Series	Up to 7 December, 6 quarterly and 2 monthly contracts or as otherwise determined and announced by the Exchange from time to time. Contracts will not be listed beyond December 2030.
Expiration Date	Last Monday of the contract month. However, if the last Monday is a Non-Business Day or there is a Non-Business Day in the 4 days following the last Monday, the last day of trading will be the penultimate Monday of the delivery month

## ANEXO 2 – Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia.



International Carbon Action Partnership  
ETS Detailed Information

1 | 8  
Last Update: 24 November 2020

### EU Emissions Trading System (EU ETS)

#### General Information

<p>Summary</p>	<p><b>Status:</b> ETS in force</p> <p><b>Jurisdictions:</b> Member states: 28 EU Member States and three European Economic Area-European Free Trade Association (EEA-EFTA) states: Iceland, Liechtenstein and Norway</p> <p>The European Union Emissions Trading System (EU ETS) is a cornerstone of the EU's policy to combat climate change and a key tool for cost-effectively reducing GHG emissions from the regulated sectors. The system covers ~45% of the EU's emissions, from the power sector, manufacturing industry, and aviation limited to flights within the European Economic Area. It is the oldest and largest ETS operating worldwide. Introduced in 2005, now approaching the end of the third trading phase, the EU ETS has gone through several reforms. The revision of the system's framework, completed in 2018, will be implemented with the start of the fourth trading phase in January 2021. In January 2020, the EU ETS became linked to the Swiss ETS, the first linking of this kind for both parties.</p>
<p>Year in Review</p>	<p>Following the adoption of the revised ETS Directive setting the cornerstones of the post-2020 policy framework, in 2019, the focus shifted towards implementing the agreed provisions ahead of the next trading phase (2021-2030). New implementing legislation on the carbon leakage list, free allocation rules, the Innovation Fund, auctioning, monitoring, reporting, verification and accreditation, and on the Union Registry was adopted in the past year.</p> <p>On 1 January 2019, the market stability reserve (MSR), the instrument to address the supply-demand imbalance of allowances in the EU ETS and improve its resilience against future shocks, became operational. In 2019, the MSR absorbed around 397 million allowances from auction volumes. From January to August 2020 another 265 million allowances are due to be placed in the reserve.</p> <p>Following final regulatory changes in the design of the Swiss ETS in late 2019, a link between the Swiss and EU ETS took effect on 1 January 2020, allowing regulated entities in both systems to use allowances from either ETS for compliance. The launch of the provisional link between the registries of the Swiss and EU emissions trading systems that will enable the transfer of allowances, initially postponed due to COVID-19, became operational as of 21 September 2020. Transfers between the registries are executed on pre-announced dates that are released at least one month in advance. The provisional solution will remain in effect until a direct link between both systems is established. Despite the provisional link not being operational until September 2020, EU and Swiss operators can already use allowances from either system for compliance in 2020.</p> <p>As part of the EU's Green Deal in line with the EU's commitment to reach carbon-neutrality by 2050, and as enshrined in the proposed European climate law, the Commission will review and propose to revise where necessary all relevant climate-related policy instruments by June 2021. This includes the EU ETS and a possible extension of emissions trading to new sectors. Moreover, discussions have started on introducing a carbon border adjustment mechanism for selected sectors to reduce the risk of carbon leakage and a</p>

## ANEXO 3 – Sistema de Comércio de Emissões da China (Xangai).



International Carbon Action Partnership  
ETS Detailed Information

1 | 5  
Last Update: 24 November 2020

### China - Shanghai pilot ETS

#### General Information

Summary	<p><b>Status:</b> ETS in force</p> <p><b>Jurisdictions:</b> Shanghai</p> <p>Shanghai was the second Chinese region, after Shenzhen, to start its pilot ETS in November 2013 and has concluded five compliance years so far. The pilot covers more than half of the city's emissions, including power, industry, and non-industrial sectors such as building, aviation, and shipping. It is the only pilot that has achieved almost 100% compliance rate continuously since its launch. In 2016 Shanghai expanded its ETS coverage by adding the shipping sector, as well as lowering the threshold of exiting power and industries (which were included in the 2013-2015 phase) to 10,000 tCO<sub>2</sub>/year.</p> <p>Shanghai is the most active among the Chinese pilots in terms of offset credits trading. It also pioneered allowance spot forward trading in China. In January 2017, the Shanghai Environmental and Energy Exchange and Shanghai Clearing House jointly launched the over-the-counter 'Shanghai Emission Allowance Forward' contract, with central counterparty clearing, as an innovative financial product that serves a purpose similar to carbon financial derivatives. Shanghai has also carried out various other carbon finance innovations such as repurchases, green bonds, carbon funds, carbon trusts, CCER mortgages, and allowance borrowing.</p> <p>In December 2017, Shanghai was selected to lead the development of the trading platform for the national ETS.</p>
Year in Review	<p>In June 2020, Shanghai published the "List of Entities under Shanghai Carbon Emission Allowance Management (2019 Version)" and the "Shanghai 2019 Carbon Emission Allowance Allocation Plan". A total of 313 entities are on the list, with 33 of them newly added. The total amount of the allowances is equivalent to 158 million tonnes of CO<sub>2</sub>e (including free allocation and reserves), the same level as 2018. In June 2020 the Shanghai pilot ETS revised the trading rules, re-regulating the market closing price.</p> <p>In 2020 the Shanghai pilot ETS also opened its auction to institutional investors for the first time.</p> <p>The Shanghai ETS completed its compliance work for 2019 in October 2020, reporting its 7th consecutive 100% compliance rate.</p>
Overall GHG emissions (excluding LULUCF)	<b>Emissions:</b> 297.7 MtCO <sub>2</sub> e (2012)
Overall GHG emissions by sector	No information available yet.
Overall GHG reduction target	<b>BY 2020:</b> 20.5% reduction in carbon intensity compared to 2015 levels. The total CO <sub>2</sub> emissions to be limited within 250 million tonnes.
Carbon Price	<i>Current Allowance Price (per t/CO<sub>2</sub>e):</i> CNY 40.46 (USD 5.86) (updated prices available <a href="#">here</a> )

## ANEXO 4 – Sistema de Comércio de Emissões da Califórnia.



International Carbon Action Partnership  
ETS Detailed Information

1 | 6  
Last Update: 24 November 2020

## USA - California Cap-and-Trade Program

## General Information

Summary	<p><b>Status:</b> ETS in force</p> <p><b>Jurisdictions:</b> California</p> <p>Initiated in 2012, the California Cap-and-Trade Program began its compliance obligation in January 2013. California has been part of the Western Climate Initiative since 2007 and formally linked its system with Québec's in January 2014 and with Ontario's in January 2018 (until the latter's termination in mid-2018).</p> <p>The California program covers sources responsible for approximately 80% of the state's GHG emissions. In 2017, legislation (Assembly Bill [AB] 398) was passed to provide direction on the cap-and-trade system post-2020 to help achieve California's climate goals.</p>																
Year in Review	<p>CARB did not commence any regulatory development on the California Cap-and-Trade Program in 2019. Amendments to the program pursuant to AB 398 went into effect in April 2019, though some (e.g., price ceiling, offsets-related limits) will not take effect until 2021.</p> <p>CARB also commenced the solicitation process for convening the Compliance Offsets Protocol Task Force called for by AB 398. This task force is charged with providing guidance to CARB in establishing new offset protocols for the cap-and-trade program with direct environmental benefits in the state while prioritizing disadvantaged communities, Native American or tribal lands, and rural and agricultural regions. In addition, in July 2019, the California legislature passed legislation to require the task force to consider new offset protocols for enhanced management or conservation of agricultural and natural lands as well as the enhancement and restoration of wetlands.</p>																
Overall GHG emissions (excluding LULUCF)	<b>Emissions:</b> 424 MtCO <sub>2e</sub> (2017)																
Overall GHG emissions by sector	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Sector Name</th> <th>MtCO<sub>2e</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Electricity Generation (In State)</td> <td>38.6</td> </tr> <tr> <td>Electricity Generation (Imports)</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Transportation</td> <td>174.3</td> </tr> <tr> <td>Industrial</td> <td>101.1</td> </tr> <tr> <td>Commercial</td> <td>23.3</td> </tr> <tr> <td>Residential</td> <td>30.4</td> </tr> <tr> <td>Agriculture &amp; Forestry</td> <td>32.4</td> </tr> </tbody> </table>	Sector Name	MtCO <sub>2e</sub>	Electricity Generation (In State)	38.6	Electricity Generation (Imports)	24	Transportation	174.3	Industrial	101.1	Commercial	23.3	Residential	30.4	Agriculture & Forestry	32.4
Sector Name	MtCO <sub>2e</sub>																
Electricity Generation (In State)	38.6																
Electricity Generation (Imports)	24																
Transportation	174.3																
Industrial	101.1																
Commercial	23.3																
Residential	30.4																
Agriculture & Forestry	32.4																
Overall GHG reduction target	<p><b>By 2020:</b> Return to 1990 GHG levels</p> <p><b>By 2030:</b> 40% reduction from 1990 GHG levels</p> <p><b>By 2045:</b> Achieve carbon neutrality</p>																
Carbon Price	<i>Current Allowance Price (per t/CO<sub>2e</sub>):</i> USD 16.84 (average auction price in 2019; updated prices available <a href="#">here</a> )																

## **B APÊNDICE B**

**Tabela B.1** – Critérios de Informação para todas as variações do modelo ARCH.

EUAs - ARMA(1,1)				
Modelos	AIC	BIC	SIC	HQ
GARCH(1,1)	<b>-4,4899</b>	<b>-4,4681</b>	<b>-4,4899</b>	<b>-4,4818</b>
GARCH(1,2)	-4,4888	-4,4639	-4,4888	-4,4796
GARCH(2,1)	-4,4888	-4,4639	-4,4888	-4,4796
GARCH(2,2)	-4,4877	-4,4597	-4,4877	-4,4774
EGARCH(1,1)	<b>-4,4910</b>	<b>-4,4662</b>	<b>-4,4911</b>	<b>-4,4819</b>
EGARCH(1,2)	-4,4900	-4,4620	-4,4901	-4,4797
EGARCH(2,1)	-4,4892	-4,4581	-4,4893	-4,4777
EGARCH(2,2)	-4,4881	-4,4539	-4,4881	-4,4754
TARCH(1,1)	-4,4876	<b>-4,4628</b>	-4,4877	<b>-4,4785</b>
TARCH(1,2)	-4,4867	-4,4587	-4,4867	-4,4763
TARCH(2,1)	<b>-4,4890</b>	-4,4579	<b>-4,4891</b>	-4,4775
TARCH(2,2)	-4,4879	-4,4537	-4,4880	-4,4752
CEAs - ARMA(2,2)				
Modelos	AIC	BIC	SIC	HQ
GARCH(1,1)	-3,2537	<b>-3,2100</b>	-3,2538	-3,2371
GARCH(1,2)	<b>-3,2583</b>	-3,2097	<b>-3,2585</b>	<b>-3,2398</b>
GARCH(2,1)	-3,2517	-3,2032	-3,2519	-3,2333
GARCH(2,2)	-3,2563	-3,2029	-3,2565	-3,236
EGARCH(1,1)	-3,2574	-3,2088	-3,2576	-3,2389
EGARCH(1,2)	-3,2673	-3,2139	-3,2675	-3,2470
EGARCH(2,1)	<b>-3,2761</b>	<b>-3,2179</b>	<b>-3,2764</b>	<b>-3,2540</b>
EGARCH(2,2)	-3,2745	-3,2114	-3,2748	-3,2505
TARCH(1,1)	-3,3171	-3,2685	-3,3173	-3,2986
TARCH(1,2)	<b>-3,3221</b>	<b>-3,2687</b>	<b>-3,3223</b>	<b>-3,3018</b>
TARCH(2,1)	-3,3148	-3,2566	-3,3151	-3,2927
TARCH(2,2)	-3,3181	-3,2550	-3,3185	-3,2942
CCAs ARMA(2,2)				
Modelos	AIC	BIC	SIC	HQ
GARCH(1,1)	-11,027	-10,991	-11,027	-11,014
GARCH(1,2)	-11,026	-10,986	-11,026	-11,011
GARCH(2,1)	<b>-11,031</b>	<b>-10,991</b>	<b>-11,031</b>	<b>-11,016</b>
GARCH(2,2)	-11,029	-10,985	-11,030	-11,013
EGARCH(1,1)	-11,018	-10,978	-11,018	-11,003
EGARCH(1,2)	-11,086	-11,041	-11,086	-11,069
EGARCH(2,1)	-11,153	-11,105	-11,153	-11,135
EGARCH(2,2)	<b>-11,164</b>	<b>-11,112</b>	<b>-11,165</b>	<b>-11,145</b>
TARCH(1,1)	-11,089	<b>-11,049</b>	-11,089	<b>-11,074</b>
TARCH(1,2)	<b>-11,089</b>	-11,045	<b>-11,090</b>	-11,073
TARCH(2,1)	-11,086	-11,038	-11,086	-11,068
TARCH(2,2)	-11,086	-11,034	-11,087	-11,067

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela B.2** – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as EUAs.

EUAs							
Estimativas				Qualidade do ajuste			
Especificação				Indicadores	GARCH	EGARCH	TARCH
<b>Média</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	AIC	-4,4899	<b>-4,4910</b>	-4,4890
Constante	0,0011	0,0009	0,0008	SBC	<b>-4,4681</b>	-4,4662	-4,4579
	(0,0164)	(0,0000)	(0,0409)	SIC	-4,4899	<b>-4,4911</b>	-4,4891
AR(1)	0,2406	0,2071	0,2535	HQ	-4,4818	<b>-4,4819</b>	-4,4775
	(0,3667)	(0,0000)	(0,0000)	ln (L)	3962,566	<b>3964,072</b>	3964,103
MA(1)	-0,3036	-0,2751	-0,3191				
	(0,2453)	(0,0000)	(0,0000)	ARCH (3)	1,737	1,778	1,025
					(0,1875)	( 0,1824)	(0,3113)
<b>Variância</b>	<b>GARCH</b>	<b>EGARCH</b>	<b>TARCH</b>	ARCH (5)	3,617	3,456	2,733
$\alpha_0$	0,0000	-0,1349	0,0008		( 0,2120)	(0,2301)	( 0,3497)
	(0,1214)	(0,0000)	(0,0402)	ARCH (7)	5,108	5,289	5,159
$\varepsilon_{t-1}^2$	0,0764		0,0688		(0,2138)	(0,1969)	(0,2324)
	(0,0000)		(0,0000)				
$\varepsilon_{t-2}^2$			0,0712				
			(0,0094)				
$h_{t-1}$	0,9213		0,8954				
	(0,0000)		(0,0000)				
$d_{t-1}\varepsilon_{t-1}^2$			0,2827				
			(0,0902)				
$d_{t-2}\varepsilon_{t-2}^2$			-0,6308				
			(0,0020)				
$ \varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}} $		-0,0273					
		( 0,0685)					
$\ln(h_{t-1})$		0,9813					
		(0,0000)					
$\varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}}$		0,1808					
		(0,0000)					

Notas:

1. Os valores em negrito correspondem aos melhores modelos segundo os Critérios de Informação.
2. Os valores entre parênteses indicam o  $p$ -valor.

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela B.3** – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as CEAs.

CEAs							
Estimativas				Qualidade do ajuste			
Especificação				Indicadores	GARCH	EGARCH	TARCH
<b>Média</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	AIC	-3,2583	-3,2761	<b>-3,3221</b>
Constante	0,0007 (0,2006)	0,0011 (0,0000)	0,0007 (0,0069)	SBC	-3,2097	-3,2179	<b>-3,2687</b>
AR(1)	1,2393 (0,0000)	1,2987 (0,0000)	1,1800 (0,0000)	SIC	-3,2585	-3,2764	<b>-3,3223</b>
AR(2)	-0,5531 (0,0000)	-0,6286 (0,0000)	-0,4850 (0,0000)	HQ	-3,2398	-3,2540	-3,3018
MA(1)	-1,3514 (0,0000)	-1,3617 (0,0000)	-1,2774 (0,0000)	ln (L)	1661,949	1673,001	<b>1695,3</b>
MA(2)	0,6035 (0,0000)	0,6427 (0,0000)	0,5185 (0,0000)	ARCH (3)	0,1591 (0,6900)	0,0655 (0,7979)	0,0518 (0,8200)
				ARCH (5)	0,1662 (0,9758)	0,0854 (0,9906)	0,0528 (0,9953)
				ARCH (7)	0,1833 (0,9981)	0,0877 (0,9996)	0,0568 (0,9999)
<b>Variância</b>	<b>GARCH</b>	<b>EGARCH</b>	<b>TARCH</b>				
$\alpha_0$	0,0001 (0,0013)	-0,1142 (0,0067)	0,0046 (0,0022)				
$\varepsilon_{t-1}^2$	0,5085 (0,0000)		1,0000 (0,0000)				
$\varepsilon_{t-2}^2$							
$h_{t-1}$	0,2783 (0,0039)		0,2970 (0,0018)				
$h_{t-2}$	0,2120 (0,0056)		0,2418 (0,0029)				
$d_{t-1}\varepsilon_{t-1}^2$			0,0417 (0,5239)				
$ \varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}} $		-0,0325 (0,8411)					
$ \varepsilon_{t-2}/\sqrt{h_{t-2}} $		0,3045 (0,0025)					
$\ln(h_{t-1})$		0,9630 (0,0000)					
$\varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}}$		2,0740 (0,0050)					
$\varepsilon_{t-2}/\sqrt{h_{t-2}}$		-0,8070 (0,0000)					

Notas:

1. Os valores em negrito correspondem aos melhores modelos segundo os Critérios de Informação.
2. Os valores entre parênteses indicam o  $p$ -valor.

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela B.4** – Resultados da estimação dos modelos e medidas da qualidade do ajuste para as CCAs.

CCAs							
Estimativas				Qualidade do ajuste			
Especificação				Indicadores	GARCH	EGARCH	TARCH
<b>Média</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	<b>ARMA</b>	AIC	-11,031	<b>-11,164</b>	-11,089
Constante	0,0000 (0,1584)	0,0000 (0,0371)	0,0000 (0,03933)	SBC	-10,991	<b>-11,112</b>	-11,045
AR(1)	1,3645 (0,0000)	1,3606 (0,48431)	1,3785 (0,9672)	SIC	-11,031	<b>-11,165</b>	-11,09
AR(2)	-0,5674 (0,0000)	-0,4898 (0,0000)	-0,5389 (0,1989)	HQ	-11,016	<b>-11,145</b>	-11,073
MA(1)	-0,4834 (0,0000)	-0,4450 (0,0000)	-0,4736 (0,8105)	ln (L)	7091,93	<b>7180,557</b>	7130,454
MA(2)	0,1980 (0,0026)	0,0800 (0,0000)	0,1097 (0,2378)	ARCH (3)	0,0165 (0,2104)	0,0074 (0,9312)	0,0128 (0,9097)
				ARCH (5)	0,0404 (0,2370)	0,0165 (0,9992)	0,0314 (0,9978)
				ARCH (7)	0,0583 (0,2271)	0,0255 (1,0000)	0,047 (0,9999)
<b>Variância</b>	<b>GARCH</b>	<b>EGARCH</b>	<b>TARCH</b>				
$\alpha_0$	0,0000 (0,8958)	-0,149 (0,0000)	0,0000 (0,5262)				
$\varepsilon_{t-1}^2$	0,3248 (0,0000)		0,6552 (0,0034)				
$\varepsilon_{t-2}^2$	0,1534 (0,0155)						
$h_{t-1}$	0,5207 (0,0039)		0,0936 (0,0000)				
$h_{t-2}$			0,5351 (0,0557)				
$d_{t-1}\varepsilon_{t-1}^2$			-0,0375 (0,3674)				
$ \varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}} $		-0,0240 (0,6483)					
$ \varepsilon_{t-2}/\sqrt{h_{t-2}} $		-0,1644 (0,0018)					
$\ln(h_{t-1})$		0,5463 (0,0000)					
$\ln(h_{t-2})$		0,4429 (0,0000)					
$\varepsilon_{t-1}/\sqrt{h_{t-1}}$		0,2620 (0,0000)					
$\varepsilon_{t-2}/\sqrt{h_{t-2}}$		-0,0381 (0,4687)					

Notas:

1. Os valores em negrito correspondem aos melhores modelos segundo os Critérios de Informação.

2. Os valores entre parênteses indicam o  $p$ -valor.

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela B.5** – Teste de Causalidade de Granger para a série de preços *spot* e futuro de EUAs.

Hipótese-nula	F	Pr(>F)
Futuro não causa <i>Spot</i>	0.591	0.4421
<i>Spot</i> não causa Futuro	0.4579	0.4987

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela B.6** – Testes de Raiz Unitária para as séries de retornos e preços *spot* e futuro de EUAs.

Variáveis	ADF		PP		KPSS	
	p	<i>p</i> -valor	t-ajustado	<i>p</i> -valor	LM-t	<i>p</i> -valor
Preço <i>Spot</i>	-2,1429	0,08206	-8,3803	0,6423	15,529	0,0000
Preço Futuro	0,3285	0,482	-7,8188	0,6736	14,871	0,0000
Retorno <i>Spot</i>	-29,7764	0,0000	-1847,5	0,0000	0,09894	0,1000
Retorno Futuro	-29,4497	0,0000	-1853,7	0,0000	0,12589	0,1000

Fonte: Elaboração Própria.