

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CAMPUS DE TOLEDO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - CCSA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ECONOMIA - PGE**  
**NÍVEL MESTRADO**

**CASSIANE GRIS BASSO**

**A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>, O CONSUMO DE ENERGIA E O CRESCIMENTO  
ECONÔMICO: UMA ANÁLISE PARA O BRASIL, 1990 - 2018**

TOLEDO – PR

2022

**CASSIANE GRIS BASSO**

**A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>, O CONSUMO DE ENERGIA RENOVÁVEL E O  
CRESCIMENTO ECONÔMICO: UMA ANÁLISE PARA O BRASIL, 1990 - 2018**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia do Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus Toledo, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Stamm.

TOLEDO – PR

2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Basso, Cassiane Gris

A emissão de CO2, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico: uma análise para o Brasil, 1990 - 2018. / Cassiane Gris Basso; orientador Cristiano Stamm. -- Toledo, 2022.

98 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2022.

1. Emissões de CO2. 2. Consumo de energia renovável. 3. Crescimento econômico. I. Stamm, Cristiano, orient. II. Título.

**CASSIANE GRIS BASSO**

**A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>, O CONSUMO DE ENERGIA RENOVÁVEL E O  
CRESCIMENTO ECONÔMICO: UMA ANÁLISE PARA O BRASIL, 1990 - 2018**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Teoria Econômica ao Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Economia, Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) – Campus Toledo, pela seguinte banca examinadora:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Cristiano Stamm (Orientador)  
UNIOESTE – Campus Toledo

---

Prof. Dr. Flávio Braga de Almeida Gabriel  
UNIOESTE – Campus Toledo

---

Prof. Dr. Alain Hernández Santoyo  
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) - Campus Varginha

Toledo – PR, 17 de março de 2022

Ao meu pai Carlos, à minha mãe Roseli e à  
minha irmã Beatriz.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à minha família, Carlos (pai), Roseli (mãe), Beatriz (irmã), por toda força e apoio.

De forma especial, agradeço ao meu orientador e professor, Dr. Cristiano Stamm, pelo incentivo, paciência e conhecimentos transmitidos, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para a minha formação.

Ao Curso de Mestrado em Economia da UNIOESTE - Campus Toledo, pela oportunidade.

Aos membros da Banca Examinadora, Prof. Dr. Flávio Braga de Almeida Gabriel, Prof. Dr. Paulo Henrique de Cezaro Eberhardt e Prof. Dr. Alain Hernández Santoyo pelas valiosas contribuições prestadas ao enriquecimento deste trabalho.

Aos Professores do Colegiado do Curso do Mestrado em Economia da UNIOESTE - *Campus* Toledo, pelos ensinamentos.

À Magali Rozangela Stempniak Orsi, secretária do PGE, pela assistência.

Aos colegas do Curso do Mestrado, pela amizade.

A todas as pessoas que passaram pelo meu caminho e, de formas diversas, ajudaram-me durante essa jornada, muito obrigada!

BASSO, Cassiane Gris. **A emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico: uma análise para o Brasil, 1990 – 2018**. 2022. 98p. Dissertação (Mestrado em Teoria Econômica) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) – Campus Toledo. Toledo, 2022.

## RESUMO

O crescimento econômico contribui para aumentar as emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto a energia renovável é benéfica ao meio ambiente. O objetivo desta pesquisa é investigar a relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o crescimento econômico (PIB) e o consumo de energia para o Brasil durante os anos de 1990 a 2018. Assim, foram utilizados dados anuais de acordo com a disponibilidade de dados do Banco Mundial, através dos Indicadores de Desenvolvimento Mundial, para variáveis como emissão de CO<sub>2</sub>, PIB, aquelas associadas aos dados da Agência Internacional de Energia para a variável consumo de energia renovável. Ademais, foi empregada a metodologia VECM, método frequentemente utilizado para séries temporais que trata todas as variáveis do sistema como endógenas e examina a interação entre elas. O estudo observou que as alterações no PIB provocaram um efeito diretamente proporcional nas emissões de CO<sub>2</sub>, bem como uma alteração positiva daquele provoca o mesmo movimento nas emissões de CO<sub>2</sub>. Enquanto isso, as alterações no consumo de energia renovável provocaram um efeito inversamente proporcional nas emissões de CO<sub>2</sub>, logo, uma alteração positiva no consumo de energia renovável induz a uma alteração negativa nas emissões de CO<sub>2</sub>. Estas considerações apontam a resposta ao problema de pesquisa sobre a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia e o crescimento econômico. Esta pesquisa contribui com a literatura existente sobre as variáveis e fornece uma perspectiva das emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de energia renovável e crescimento econômico para o Brasil no contexto atual.

**Palavras-chave:** Emissões de CO<sub>2</sub>. Consumo de energia renovável. Crescimento econômico.

BASSO, Cassiane Gris. **CO<sub>2</sub> emission, renewable energy consumption and economic growth: an analysis for Brazil, 1990 – 2018**. 2022. 98p. Master degree in Economic Theory –Western Paraná State University (UNIOESTE) – Campus of Toledo. Toledo, 2022.

### **ABSTRACT**

Economic growth contributes to increase CO<sub>2</sub> emissions; on the other hand, renewable energy is beneficial to the environment. This research aims to investigate the relationship among CO<sub>2</sub> emissions, economic growth (GDP) and energy consumption for Brazil from 1990 to 2018. Therefore, annual data were used according to the data availability from the World Bank, according to the World Development Indicators, for variables such as CO<sub>2</sub> emission, GDP, and those ones related to data from the International Energy Agency for the variable consumption of renewable energy. Furthermore, the VECM methodology was used, which is a method that has been often used for time series; it treats all variables as endogenous and examines the interaction among them. This study recorded that changes in GDP caused a directly proportional effect on CO<sub>2</sub> emissions, a positive change in GDP causes the same movement in CO<sub>2</sub> emissions. Meanwhile, changes in renewable energy consumption have an inversely proportional effect on CO<sub>2</sub> emissions, which meant that, a positive change in renewable energy consumption leads to a negative change in CO<sub>2</sub> emissions. These considerations point to the answer to the research problem about the relationship among CO<sub>2</sub> emission, energy consumption and economic growth. This research contributes to the existing literature on the variables and provides a perspective on CO<sub>2</sub> emissions, renewable energy consumption and economic growth for Brazil in the current context.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emissions. Renewable energy consumption. Economic growth.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resumo de estudos anteriores.....	40
Tabela 2 Variáveis selecionadas através da fundamentação empírica. ....	45
Tabela 3 Metodologia empregada. ....	57
Tabela 4 Teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF): em nível e em primeira diferença.....	60
Tabela 5 Teste de raiz unitária com quebra estrutural: em nível e em primeira diferença.....	61
Tabela 6 Teste de seleção de defasagem para o modelo VAR.....	61
Tabela 7 Teste de cointegração de Johansen.....	62
Tabela 8 Estimação de curto e longo prazo do modelo VECM .....	63
Tabela 9 Decomposição da variância da variável $\ln\text{CO}_2$ .....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Framework</i> Teórico.....	30
Figura 2 Variáveis Emissões de CO <sub>2</sub> lnCO <sub>2</sub> , Produto Interno Bruto lnPIB e Consumo de Energia Renovável lnCER.....	59
Figura 3 Raízes inversas do polinômio característico AR – VECM.....	65
Figura 4 Função de resposta da variável lnCO <sub>2</sub> ao impulso da variável lnPIB.....	65
Figura 5 Função de resposta da variável lnCO <sub>2</sub> ao impulso da variável lnCER.....	66

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ADF – Dickey-Fuller Aumentado

AIC – Critério de Informação de Akaike

AR – Autorregressivo

ARDL – Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas

BIC – Critério de Informação Bayesiano

CAK – Curva Ambiental de Kuznets

CER – Consumo de Energia Renovável

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESG – Environmental, Social and Governance

GEE – Gases de Efeito Estufa

GMM – Método Generalizado do Momento

GS2SLS – Método dos Mínimos Quadrados Generalizados de Dois Estágios

HQ – Hannan-Quinn

IEA – International Energy Agency

KT – Quilotons Métricos

MQO – Mínimos Quadrados Ordinários

PIB – Produto Interno Bruto

PJ – Petajoules

SC – Schwarz

STIRPAT – Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology

VAR – Vetores Autorregressivos

VECM – Modelo Vetorial de Correção de Erros

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1 CRESCIMENTO ECONÔMICO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL .....	15
2.2 ENERGIA E CRESCIMENTO ECONÔMICO .....	22
2.3 <i>ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE</i> (ESG) E O DESEMPENHO ECONÔMICO .....	28
2.4 ESQUEMA CONCEITUAL PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> , O CONSUMO DE ENERGIA, E O CRESCIMENTO ECONÔMICO .....	30
2.5 ESTUDOS EMPÍRICOS DA EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> , O CONSUMO DE ENERGIA, E O CRESCIMENTO ECONÔMICO .....	31
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	44
3.1 BASE DE DADOS .....	44
3.2 TEORIA ECONOMETRICA .....	45
<b>3.2.1 Teste da Raiz Unitária Dickey-Fuller Aumentado</b> .....	45
<b>3.2.2 Vetores Autorregressivos (VAR)</b> .....	48
<b>3.2.3 Teste de Cointegração de Johansen</b> .....	50
<b>3.2.4 Vetor de Correção de Erros (VECM)</b> .....	51
<b>3.2.5 Teste Jarque-Bera de Normalidade</b> .....	52
<b>3.2.6 Teste White de Heterocedasticidade</b> .....	53
<b>3.2.7 Teste LM de Autocorrelação</b> .....	54
<b>3.2.8 Teste de Estabilidade do Modelo</b> .....	54
<b>3.2.9 Função de Resposta ao Impulso</b> .....	54
<b>3.2.10 Análise da Decomposição da Variância</b> .....	56
3.3 MODELO ECONOMETRICO PROPOSTO .....	57
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	59
4.1 ESTIMAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO VETOR DE CORREÇÃO DE ERROS (VECM) .....	62
4.2 RESULTADO DA FUNÇÃO RESPOSTA AO IMPULSO .....	65
4.3 RESULTADO DA DECOMPOSIÇÃO DA VARIÂNCIA .....	67
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	68
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71
<b>ANEXOS</b> .....	79
<b>ANEXO A – Teste de raiz unitária</b> .....	80

<b>ANEXO B – Teste de raiz unitária .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO C – Teste de raiz unitária .....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO D – Teste de raiz unitária .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO E – Teste de raiz unitária .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO F – Teste de raiz unitária.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO G – Teste de raiz unitária com quebra estrutural.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO H – Teste de raiz unitária com quebra estrutural.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO I – Teste de raiz unitária com quebra estrutural .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO J – Teste de raiz unitária com quebra estrutural.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO K – Teste de raiz unitária com quebra estrutural.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO L – Teste de raiz unitária com quebra estrutural.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO M – Teste LM de autocorrelação para a defasagem do modelo VAR .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO N – Estimação do VECM.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO O – Teste LM de autocorrelação para a defasagem do VECM.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO P – Teste de heterocedasticidade .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO Q – Teste de normalidade.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO R – Resíduos das séries <math>\ln\text{CO}_2</math>, <math>\ln\text{PIB}</math> e <math>\ln\text{CER}</math>.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em conformidade com a preocupação da manutenção do crescimento econômico e em conjunto com a proteção ambiental, o trabalho de Grossman e Krueger (1995) e sua denominada Curva Ambiental de Kuznets (CAK) postulam uma relação em formato de U invertido entre PIB *per capita* e emissão de poluentes, análoga à relação em forma de U invertido entre desigualdade de renda e o crescimento, desenvolvida por Kuznets (1955). O crescimento econômico apresenta efeitos sobre o consumo de energia, todavia, há um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>, por isso, o investimento em energia renovável apresenta-se como fator de equilíbrio entre o crescimento econômico e a qualidade ambiental (RADMEHR; HENNEBERRY; SHAYANMEHR, 2021). O consumo de energia renovável contribui para o crescimento econômico e ainda reduz em grande parte as emissões de CO<sub>2</sub>, além de melhorar a situação ambiental e destacar a importância da introdução de novas tecnologias voltadas à eficiência energética (LEE, 2013).

Entre 1990 e 2019, as emissões brutas de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil tiveram aumento de 17%. O crescimento das emissões é devido, em grande parte, ao aumento do desmatamento e do uso de combustíveis fósseis na composição da matriz energética nacional. Em 2019, o Brasil ocupava o 6º lugar entre os maiores emissores de gases de efeito estufa, com 3,2% do total mundial. (SEEG, 2020). Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020), a matriz energética nacional apresentou transformações ao longo dos anos, entre elas as alterações no nível de participação de cada fonte. No ano de 2000, as fontes de energias não renováveis (petróleo, gás natural, carvão mineral e outras) detinham 59% de participação na oferta interna de energia. Em 2020, o Brasil passou a contar com uma presença significativa de fontes renováveis (hidráulica, biomassa, carvão vegetal, eólica, solar e outras) na matriz energética e estas fontes representaram 48,4% de toda oferta interna de energia.

A economia e a produção nacional sofreram transformações como aquelas em meados de 1970, o chamado “milagre econômico”, período de prosperidade da economia nacional, marcado pelo crescimento do PIB, pela inflação elevada (embora com tendência decrescente), pelos investimentos em infraestrutura, pela mecanização agrícola e pela produção de bens de consumo duráveis (LAGO, 1990). No início da década de 1980, a alta no preço internacional do petróleo provocou alta da inflação, queda no PIB e na taxa de investimento e visualizou-se uma tentativa de estabilização

da economia pelo Governo. Enquanto os anos de 1990 foram marcados pelo controle inflacionário, privatizações e recuperação do poder de compra e de produção. Já os anos de 2000 foram marcados pela crise financeira internacional e pela economia nacional desaquecida, com destaque para o desempenho negativo do setor industrial (GIAMBIAGI et al., 2016). Além disso, no início dos anos 2000, ocorreu uma queda na produção de energia das hidrelétricas, uma das principais fontes de energia renovável do país, reflexo do estresse hídrico (BEN, 2020). A década de 2010 foi marcada pela grande recessão da economia brasileira (2014-2016) com forte queda do nível de atividade econômica (OREIRO, 2017).

Embora a teoria econômica não estabeleça, explicitamente, a interação entre consumo de energia e crescimento econômico (FERREIRA NETO; CORRÊA; PEOBELLI, 2016), esta relação tem sido objeto de estudos desde o trabalho pioneiro da Kraft e Kraft (1978), enquanto os principais estudos empíricos estão associados ao debate sobre a relação entre degradação ambiental e crescimento econômico, apresentada por Grossman e Krueger (1991), Shafik (1994) e Panayotou (1993). É notável a literatura crescente sobre a ligação entre consumo de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e crescimento econômico. Estes estudos foram feitos para muitos países no mundo, no entanto, poucos estudos incluíram o Brasil em seu campo de aplicação como Paramati, Mo e Gupta (2017), Dong et al. (2018) e Ben Jebli, Farhani e Guesmi (2020), ou dedicado unicamente à análise dessa relação para o caso brasileiro (AMARANTE et al., 2021). Enquanto o estudo de Amarante et al. (2021) considera apenas dados de uma fonte de energia para a composição da variável de energia renovável, este estudo apresenta como diferencial quanto às diversas fontes de energia identificadas como renováveis.

Diante das considerações apresentadas, surge o questionamento: **qual a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável, e o crescimento econômico?**

Assim, perante o debate presente na literatura para outros países, este estudo visa agregar o conhecimento sobre a relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico para o Brasil. Nesta interação, é notória uma abordagem de crescimento sustentável, com práticas de responsabilidade social e corporativas cada vez mais valorizadas. Assim, surge um movimento que leva o crescimento econômico em consideração com os três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e governança, do termo em inglês *Environmental, Social and*

*Governance* (ESG), uma adoção de conduta empresarial benéfica ao meio ambiente, às instituições e à sociedade.

Vale destacar algumas contribuições importantes sobre o tema: i) Aumentar a literatura existente sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, ligado ao consumo de energia e ao crescimento econômico diante da baixa produção acadêmica dedicada ao estudo destas três variáveis interligadas; ii) Sobre essa relação, grande parte dos estudos anteriores consideraram dados relativos ao Brasil e o fazem em comparação com outros países. Este estudo adota apenas o Brasil como campo de aplicação; iii) O estudo anterior encontrado com aplicação especificamente para o Brasil considera apenas dados de uma fonte de energia para a composição da variável de energia renovável. Este estudo usa como diferenciais as diversas fontes de energia identificadas como renováveis para estimar o impacto do consumo de energia e do crescimento econômico nas emissões de CO<sub>2</sub>; iv) Identificar como estão relacionadas essas variáveis no contexto atual e auxiliar os formuladores de políticas para alcançar o equilíbrio entre as três variáveis visando ao crescimento econômico sustentável.

Portanto, o objetivo geral desse estudo é o de analisar a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico para o Brasil durante o período de 1990 a 2018 através da realização de testes econométricos e estimação de um modelo VAR para determinar as interações dinâmicas entre as séries.

Como objetivos específicos são propostos: i) Pesquisar a existência da relação de longo prazo entre as séries temporais de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de energia renovável e crescimento econômico; ii) Examinar o efeito do consumo de energia renovável na emissão de CO<sub>2</sub>; iii) Averiguar o efeito do crescimento econômico na emissão de CO<sub>2</sub>.

Este trabalho de dissertação está estruturado primeiramente, no capítulo 1, com a introdução, seguido pela fundamentação teórica no capítulo 2, a metodologia no capítulo 3, o capítulo 4 com a análise dos resultados e discussões, o capítulo 5 apresenta as considerações finais e, por último, as referências.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção destaca os conceitos teóricos sobre crescimento econômico, degradação ambiental e energia. A interação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental é discussão antiga no meio acadêmico e com a recente introdução de novas tecnologias voltadas para a geração de energia renovável, com destaque para a crescente importância destinada à sustentabilidade.

### 2.1 CRESCIMENTO ECONÔMICO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

Na literatura econômica, uma vertente faz distinção entre crescimento econômico e desenvolvimento, enquanto outra considera os dois termos como sinônimos. Na primeira corrente, o crescimento econômico geralmente é medido adotando renda *per capita* como indicador e sem envolver mudança estrutural e melhoria dos padrões de vida, enquanto o desenvolvimento econômico é um processo de transformação estrutural que envolve um aprimoramento constante do nível tecnológico e da capacidade produtiva de uma nação e resulta na melhora dos padrões de vida de sua população (BRESSER-PEREIRA, 2014).

Schumpeter (1982) afirma que o desenvolvimento econômico implica mudanças estruturais não asseguradas apenas através do crescimento econômico, retratado pelo aumento da população e da riqueza, com destaque para a importância da incorporação da inovação no processo de desenvolvimento econômico. Segundo Furtado (1967), o crescimento econômico está atrelado ao aumento de renda, logo, da expansão da produção e não implica necessariamente o progresso tecnológico nem o aumento da produtividade, fatores observados no desenvolvimento econômico.

Para a segunda vertente, as teorias e os modelos de crescimento aparecem voltados às concepções keynesiana e neoclássica, com o crescimento econômico ligado à acumulação de capital, impacto direto na renda e no desenvolvimento como consequência. O desenvolvimento econômico resulta da acumulação de capital e da incorporação de progresso técnico à produção, assim, o processo de crescimento da renda *per capita* implica mudança estrutural e melhoria dos padrões de vida (BRESSER-PEREIRA, 2006). Portanto, a distinção entre os dois termos não apresenta coerência na prática, são poucos os países em que há crescimento da renda *per capita* sem alguma mudança estrutural ou nos padrões de vida e mesmo em países em que

crescimento da renda por habitante não apresente desenvolvimento como consequência, a renda *per capita* permanece como indicador útil disponível de desenvolvimento. Para fins de definição deste estudo, o crescimento da economia será designado como um processo do desenvolvimento.

A teoria econômica apresenta modelos matemáticos de crescimento para retratar uma visão simplificada sobre a realidade do complexo processo de desenvolvimento. A teoria neoclássica do crescimento econômico apresenta o modelo matemático elaborado por Solow para explicar o crescimento econômico endógeno através da interação de variáveis de crescimento econômico no longo prazo. No modelo, a tendência do crescimento de longo prazo é determinada pela taxa de acumulação de dois fatores de produção, capital e trabalho, além do progresso tecnológico (SOLOW, 1956).

Em contraposição ao modelo de Solow, Lucas (1977) e Romer (1986) consideram crescimento econômico como resultado de forças endógenas. Lucas (1988) justificou sua consideração a partir da diferença no acesso às oportunidades tecnológicas e às falhas da convergência entre países. O autor incorporou o capital humano juntamente com ênfase na acumulação de capital físico e na mudança tecnológica como principais características do desenvolvimento econômico. Seu modelo admite que diferenças na acumulação do capital humano de cada país determinam a taxa de crescimento dos bens produzidos. A teoria de Romer (1986) considera o capital humano como um insumo na produção que aumenta a produtividade marginal e apresenta um modelo de equilíbrio competitivo com mudança tecnológica endógena, portanto, o crescimento de longo prazo é impulsionado principalmente pela acumulação de conhecimento.

Stern (1991) elencou três determinantes do aumento de renda presentes nas teorias de crescimento: (i) acumulação de capital, (ii) capital humano e (iii) investigação, desenvolvimento e inovação. Ademais, o autor adicionou outros três fatores: (iv) gestão e organização, (v) infraestrutura e (vi) a alocação da produção nos setores produtivos. Além de destacar a importância destes fatores, o autor ressalta a necessidade de compreensão do papel das relações internacionais no avanço tecnológico e de uma análise da distribuição de renda durante o processo de crescimento, além do papel da gestão governamental a partir de investimentos em infraestrutura no estímulo ao processo de crescimento.

Referência para estudiosos de economia, Maddison (1995) forneceu uma visão abrangente do crescimento ao identificar quatro principais influências que explicam a

viabilidade de grandes aumentos na produção *per capita*, que são: (i) o progresso tecnológico; (ii) a acumulação de capital físico; (iii) a melhoria no capital humano; e (iv) a eficiência na interação econômica, intelectual e empresarial. O autor também relata que a literatura sobre crescimento econômico ainda considera outros elementos, como: a economia de escala, a mudança estrutural e a relativa escassez ou abundância de recursos naturais.

O crescimento econômico, retratado pelo aumento da riqueza e expansão da produção, tem como principal indicador a renda *per capita* enquanto o desenvolvimento econômico envolve um processo de transformação estrutural e melhoria dos padrões de vida através da inovação tecnológica e aumento da produtividade além de outros fatores de produção, como capital e trabalho. Alguns autores incorporaram o capital humano como determinante na taxa de crescimento e no desenvolvimento econômico. Entretanto, a distinção entre crescimento e desenvolvimento não apresenta coerência na prática, pois, são poucos os países em que há crescimento da renda *per capita* sem alguma mudança estrutural ou nos padrões de vida.

Kuznets (1955) postula que, na fase inicial do crescimento econômico, a distribuição de renda aumentava com o nível de renda do país, mas a distribuição de renda torna-se mais igualitária à medida que o crescimento econômico continua, entretanto, existem outras variáveis que podem influenciar a desigualdade de renda, por exemplo, a estrutura econômica e social e as mudanças tecnológicas. A Curva de Kuznets, também conhecida como hipótese do U invertido de Kuznets, postula uma relação de U invertido entre a renda *per capita* e a desigualdade de renda, com correlação positiva em curto prazo, mas revertida em longo prazo (TAQUES; MAZZUTTI, 2010). Grossman e Krueger (1995), em formato semelhante ao apresentado por Kuznets (1955), apresentaram a denominada “Curva Ambiental de Kuznets” que estabelece uma relação entre degradação ambiental e crescimento econômico em forma de U-invertido, a qual indica que as relações entre crescimento e degradação ambiental não seguem necessariamente um padrão temporal. Assim, é possível afirmar que em certo estágio de crescimento, a degradação ambiental passaria a ter um comportamento decrescente.

Segundo Arrow et al (1995), toda atividade econômica depende de recursos ambientais, entretanto, esta base de recursos é finita e seu uso imprudente pode reduzir a capacidade de produção de materiais no futuro. Melhorias na gestão de recursos são capazes de permitir que o crescimento econômico e populacional aconteça apesar da

finitude da base de recursos ambientais. A geração de energia proveniente de recursos ambientais é dependente do nível tecnológico empregado, das preferências e da estrutura de produção e consumo. Panayotou (1993) observou a relação entre a degradação ambiental e o crescimento econômico e identificou que a degradação ambiental aumenta em um estágio inicial, mas diminui no curso do crescimento econômico com o aspecto de curva em formato de U invertido assim como a hipótese do comportamento da desigualdade de renda apresentada por Kuznets (1955).

Países desenvolvidos detêm tecnologia voltada à manutenção do crescimento econômico com controle e redução dos impactos ambientais de sua produção, enquanto países em fase inicial de crescimento optam pelo crescimento econômico ao preço da extração de seus recursos naturais. Os diferentes estágios da degradação ambiental apresentam relação com o crescimento econômico e uma EKC revela o comportamento de uma alteração na qualidade ambiental conforme ocorra mudança na economia de um país (DINDA, 2004). Desse modo, o crescimento econômico, sem mudança econômica estrutural ou tecnológica, resultaria em crescimento da poluição e outros impactos ambientais (STERN, 2004).

Embora algum nível de degradação ambiental acompanhe o crescimento econômico diante das mudanças estruturais nas fases iniciais do crescimento da economia, parte da inclinação da curva EKC pode ser suavizada com a eliminação de distorções políticas, internalização dos custos ambientais às atividades geradoras e incentivos à proteção ambiental (PANAYOTOU, 1993).

Economistas experts em crescimento e desenvolvimento econômico demonstraram preocupação com a continuidade da produção nos países juntamente com a evolução da atenção direcionada às questões ambientais (ÖZOKCU; ÖZDEMIRB, 2017). O debate entre a degradação ambiental e o crescimento econômico apresenta duas visões opostas. Na primeira, uma maior atividade econômica inevitavelmente leva à degradação e direciona para um possível colapso econômico e ambiental. Na segunda, a administração dos problemas ambientais é compensatória, uma vez que são vistos como uma consequência de crescimento econômico (SHAFIK, 1994). O aumento da consciência ambiental acompanhada de mudança estrutural, aplicação das regulamentações ambientais e inovações tecnológicas são alternativas para o nivelamento e o declínio gradual da degradação ambiental em níveis mais elevados de desenvolvimento (PANAYOTOU, 1993), principalmente em relação aos resíduos

sólidos e às emissões de carbono que dispõem de poucos incentivos visando ao abatimento de custos com a redução de emissões e o desperdício (SHAFIK, 1994).

Importante esclarecer que os custos e benefícios atribuídos a qualquer nível de qualidade ambiental variam conforme a tecnologia e a estrutura econômica do país (SHAFIK, 1994). Nos países em desenvolvimento, as condições ambientais são incomparavelmente piores do que nos países ditos desenvolvidos (BECKERMAN, 1992). Em níveis mais baixos de desenvolvimento, as estratégias de crescimento visam, em grande parte, à solução de questões primárias como a redução da pobreza. Contudo, o aumento da produtividade de setores baseados em recursos naturais, a diversificação com a introdução de novas tecnologias, aumento do nível educacional e consciência ambiental possibilitam condições para crescimento sustentável em longo prazo.

A natureza do crescimento entre economias emergentes e desenvolvidas difere uma da outra, o crescimento econômico acelerado faz com que as emissões diminuam e quando comparado com o crescimento econômico mais lento, ocorre o efeito oposto (SHAHBAZ; SINHA, 2018; SELDEN; SONG, 1994). Em níveis baixos de desenvolvimento, tanto a quantidade quanto a intensidade da degradação ambiental estão limitadas aos impactos da atividade econômica de subsistência. À medida que o desenvolvimento econômico acelera, as taxas de esgotamento de recursos começam a exceder as de regeneração e a geração de resíduos aumenta. Em níveis mais altos de desenvolvimento, a mudança estrutural do setor industrial e de serviços juntamente com o aumento da consciência ambiental da população, da aplicação de medidas ambientais, de regulamentos e de uma melhor tecnologia resulta em nivelamento e declínio gradual dessa degradação ambiental (PANAYOTOU, 1993).

Com o progresso no crescimento de países menos desenvolvidos e a expansão de suas populações, a quantidade de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera é crescente. Esses aumentos podem ser equilibrados com incentivos à proteção ambiental que exige redução nas emissões de CO<sub>2</sub> (TUCKER, 1995). As emissões de CO<sub>2</sub> são, em grande parte, resultantes da combustão de combustíveis fósseis que agridem o meio ambiente (ÖZOKCU; ÖZDEMIRB, 2017). Na maioria dos países, a melhoria ambiental tem exigido políticas e investimentos para reduzir a degradação (SHAFIK, 1994). Entretanto, para viabilizar a redução das emissões de países em desenvolvimento, originalmente preocupados com o imediatismo de necessidades primárias, os países desenvolvidos terão que estar dispostos a transferir tecnologia e riqueza como

instrumento de auxílio contra possíveis obstáculos ao desenvolvimento das nações menos desenvolvidas (TUCKER, 1995).

Outra opção para as economias de crescimento mais lento está na contribuição das mudanças tecnológicas para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> (STERN, 2004). Por exemplo, a industrialização e a modernização agrícola podem, a princípio, reduzir a qualidade ambiental nos estágios iniciais de desenvolvimento, mas essa tendência se inverte à medida que a economia continua a se desenvolver (SELDEN; SONG, 1994). O declínio da poluição depende diretamente da taxa de adoção de uma nova tecnologia sustentável e os subsídios para aumentar a adoção de projetos sustentáveis são ações em favor da qualidade ambiental (SMULDERS; BRETSCHEGER, 2000).

As inovações em tecnologia refletem no nível de emissões de poluentes, por isso, muitas empresas adotam tecnologias de produtos mais limpos porque são mais lucrativas e a abertura ao comércio tende a auxiliar na disponibilidade de tecnologias significativamente mais limpas nos países em desenvolvimento resultando em maior eficiência. Contudo, a regulamentação ambiental deve ser fortalecida (DASGUPTA et al., 2002). Kuznets (1955) ressalta que entender os padrões de crescimento populacional, da natureza e das mudanças tecnológicas é decisivo para o estudo do crescimento econômico das nações. Embora a proteção industrial e os investimentos em estrutura favoreçam o capital, a energia e as indústrias acentuam os níveis de emissão de poluentes, os países com regulamentação ambiental inexistente ou enfraquecida apresentam emissões industriais maiores do que os países que efetivamente controlam seus índices de poluição e a geração de resíduos (PANAYOTOU, 1993). Ao fazer das emissões de CO<sub>2</sub> um objeto de controle, a redução nas emissões poderia ser realizada por substituição de outros combustíveis menos poluentes (TUCKER, 1995).

A relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental tem sido objeto de debate entre os pesquisadores. Em seu estudo, Grossman e Krueger (1991) examinaram a relação entre o PIB, como indicador do crescimento econômico e a emissão de poluentes como indicador da qualidade ambiental para 42 países em diferentes períodos. Os resultados demonstram que a degradação ambiental pode ser reduzida pelo crescimento econômico. Além do trabalho de Grossman e Krueger (1991), existem outros estudos sobre o EKC com resultados similares, apoiando o crescimento econômico de forma a superar o problema de degradação ambiental.

Selden e Song (1994) investigaram a relação entre a degradação ambiental e o crescimento econômico para 30 países em três níveis de renda durante três períodos

diferentes: 1973-1975, 1979-1981 e 1982-1984. Os resultados apontaram para uma relação em U invertido da emissão de poluentes com o PIB, embora isto implique em uma eventual queda nas emissões agregadas desses poluentes em longo prazo. O trabalho indicou, com base nos padrões globais de crescimento da população e do PIB, um crescimento rápido e contínuo das emissões globais no curto prazo, verificado na trajetória das emissões de CO<sub>2</sub> (WORLD BANK DATA, 2021). Panayotou (1993) também testou empiricamente e apoiou a hipótese de uma relação em forma de U invertido entre a degradação ambiental e o desenvolvimento econômico.

Outros autores não confirmaram a existência de um padrão EKC crescimento econômico e a degradação ambiental. Kotroni, Kaika e Zervas (2020) investigaram a relação de curto e longo prazos entre o crescimento econômico, as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia durante o período de 1960 a 2014 na Grécia. Entretanto, embora para a teoria da Curva Ambiental de Kuznets (EKC), o crescimento econômico, em última análise, leva à degradação ambiental, os autores não confirmaram a presença de um padrão EKC para o tempo e espaço do estudo.

Özokcu e Özdemirb (2017) investigaram a relação entre renda, uso de energia e emissões de CO<sub>2</sub> em contexto da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) para dois modelos empíricos durante o período de 1980 a 2010. No primeiro modelo, os dados são analisados para 26 países da OCDE com níveis altos de renda, enquanto no segundo modelo, os dados são examinados para 52 países emergentes. Os resultados de ambos os modelos não suportaram a hipótese EKC, o que implica dizer que a degradação ambiental não pode ser resolvida automaticamente pelo crescimento econômico.

Gill, Viswanathana e Hassanb (2017) avaliaram a relevância da hipótese da EKC para a degradação ambiental em nível global a partir da análise de diferentes aspectos da EKC. Os autores discordam da trajetória do convencional da EKC para o crescimento econômico e a degradação ambiental. Recomendam que o crescimento econômico deve ser sustentável, menos destrutivo e sugerem a adoção de energias renováveis, visto que a energia de origem fóssil é o determinante mais importante da poluição.

O crescimento econômico elevou o consumo de combustíveis fósseis, um dos determinantes de impactos ambientais negativos, o que traz em pauta a continuação da produção em consonância com a proteção dos recursos naturais e seu uso sustentável. Os efeitos do crescimento econômico na degradação ambiental diferem entre os países, enquanto os países em desenvolvimento estão voltados para questões primárias e apresentam uso desenfreado de recursos naturais, os países desenvolvidos dispõem de

condições tecnológicas para o controle de suas emissões e em ações de aumento da eficiência e competitividade da produção. Os impactos ambientais que acompanham o crescimento econômico são vistos como efeitos passíveis de controle e podem ser contornados com o investimento em novas tecnologias que reduzem as emissões de poluentes, entre elas a substituição gradual da extração de combustíveis fósseis por fontes renováveis. Nota-se a importância de colaboração entre os países em diferentes estágios de desenvolvimento para promover uma transferência de tecnologia, diversificação de recursos energéticos e crescimento econômico em condições sustentáveis em nível global.

## 2.2 ENERGIA E CRESCIMENTO ECONÔMICO

O conceito referente à energia varia conforme o contexto em que está inserido, logo, entender a energia significa entender os recursos energéticos e processos de conversão de energia. Hinrichs e Kleinbach (2003) destacaram o princípio de que a energia é uma quantidade conservada, assim, a quantidade total de energia no universo é uma constante, apenas convertida e redistribuída de uma forma para outra, por exemplo, a energia eólica é transformada em energia elétrica. Entretanto, mesmo em um processo de conversão de energia, parte da entrada de energia é perdida sob formas não utilizáveis, de tal modo que a produção de energia útil é menor que a entrada de energia.

Em relação à evolução histórica, o uso de energia passou por transformações desde o uso do vapor, a energia proveniente de combustíveis fósseis, o desenvolvimento da energia nuclear até chegar às energias renováveis. Na antiguidade e idade média, é reconhecido o uso do vapor, da energia mecânica e da força dos ventos como formas energéticas. Nas idades moderna e contemporânea surgem os combustíveis fósseis (carvão e petróleo) utilizados em grande escala. Na década de 1960, a energia nuclear passa a ser utilizada como fonte primária da matriz energética. Na busca por um cenário sustentável quanto ao uso da energia e a partir de mudanças tecnológicas, é cada vez maior o uso de energia de fontes renováveis: eólica, solar, biomassa, biocombustível (FARIAS; SELLITTO, 2011).

A energia permeia todos os setores da sociedade, existe uma constante transformação de energia disponível para trabalho. O uso dos recursos energéticos, principalmente nos meios de transportes, serviços, na eletrificação residencial e nos meios de produção, livrou da dependência da força muscular como fonte de energia de

trabalho nos países industrializados. A energia primária provém de fontes encontradas diretamente na natureza, como petróleo, gás natural, carvão mineral, energia solar, eólica e hidráulica. Já a energia secundária é transformada a partir das fontes primárias por intermédio de processos tecnológicos, como eletricidade e derivados de petróleo (HINRICHS; KLEINBACH, 2003). As fontes de energia primária podem ser divididas em dois grupos: as renováveis e as não renováveis. As primeiras são repostas imediatamente pela natureza, como eólica, hidrelétrica e solar, enquanto as não renováveis não podem ser repostas pela natureza a um prazo útil, como petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear (GOLDEMBERG; LUCON, 2006).

Segundo Goldemberg e Lucon (2007), após o período do “milagre econômico”, ocorreu no Brasil uma forte desaceleração do PIB e da produção de energia primária. Entretanto, a partir de 1990, o aumento da produção de energia primária no Brasil tem acompanhado o crescimento do PIB. Embora o país utilize combustíveis fósseis na produção de energia primária, a matriz energética brasileira é, em sua maior parte, renovável, com destaque para a energia hidráulica (VICHI; MELLO, 2003).

Medidas de eficiência energética são indispensáveis para garantir que o consumo de energia cresça concomitantemente ao desenvolvimento e o uso de tecnologias modernas e eficientes reduzem os custos e os impactos ambientais. Além disso, a conservação dos recursos existentes com a promoção da eficiência energética diminui a necessidade de subsídios governamentais para a produção de energia (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Segundo Patterson (1996), eficiência energética é um termo genérico e, em geral, se refere ao uso de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou riqueza e se faz necessária uma série de indicadores para quantificar mudanças na eficiência energética. Entre os indicadores usados para monitorar as mudanças em eficiência energética, o autor apresenta o grupo de indicadores denominado econômico que mede as mudanças na eficiência energética em termos monetários. Já a intensidade energética é a relação entre a energia e o Produto Interno Bruto (PIB), este indicador de eficiência da economia pode ser calculado sob a ótica da oferta interna de energia e do consumo final energético. A menor intensidade energética da economia indica uma maior eficiência, portanto, menor consumo de energia diante de uma variação positiva do PIB (EPE, 2020).

Energia, meio ambiente e desenvolvimento econômico estão forte e intimamente conectados. A energia é necessária para a produção de bens e fornecimento de serviços

a partir dos recursos naturais. O desenvolvimento econômico requer um abastecimento adequado e confiável de energia, levando em consideração tanto as questões sociais como as tecnológicas com o uso planejado e eficiente dos recursos energéticos e a inserção de novas tecnologias (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

A importância da eficiência energética para os países está ligada à competitividade comercial, industrial e segurança energética, além de benefícios ambientais como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> (PATTERSON, 1996). A existência da grande dependência de combustíveis fósseis na matriz mundial e nacional faz pensar na necessidade de eficiência e diversificação energética com tendência ao incentivo e maior uso de energias renováveis, visto que as fontes não renováveis são suscetíveis ao esgotamento e a manutenção do crescimento econômico requer o uso de recursos energéticos.

A relação entre o consumo de energia e o crescimento econômico tem sido objeto de estudos desde o trabalho pioneiro da Kraft e Kraft (1978). De acordo com os autores, existe uma constante relação entre o consumo de energia e o crescimento econômico, mas, embora o nível de atividade econômica possa influenciar o consumo de energia, o nível de consumo de energia não tem influência na atividade econômica. A iniciativa para a introdução de mudanças tecnológicas para o consumo eficiente da energia visa promover ações de conservação, combate ao desperdício, aumento da competitividade nacional e o acompanhamento dos benefícios da eficiência energética para a sociedade.

Ozturk (2010) realizou um levantamento da literatura existente da relação entre consumo de energia e crescimento econômico que pode ser categorizado em quatro hipóteses. A primeira, hipótese de neutralidade, é apoiada pela ausência de uma relação entre consumo de energia e crescimento econômico, na qual o consumo de energia e o crescimento econômico são neutros em relação um ao outro. A segunda, hipótese de conservação, tem suporte quando uma alteração do crescimento econômico provoca um movimento direto no consumo de energia, ou seja, à medida que a economia cresce a demanda por energia de diferentes setores da economia aumenta. A terceira, hipótese de crescimento, sugere que o consumo de energia desempenha um papel importante no crescimento econômico, portanto, choques negativos no fornecimento de energia terão um impacto negativo sobre o crescimento econômico. A quarta, hipótese de *feedback*, implica que o consumo de energia e o crescimento econômico são interdependentes, determinados e afetados em conjunto e ao mesmo tempo.

A maior parte da literatura empírica que investigou a relação entre o uso de energia e o crescimento econômico produziu resultados conflitantes. Yang (2000) examinou a causalidade entre o consumo de energia e o PIB usando dados de Taiwan para o período de 1954 a 1997. Através da aplicação da técnica de Granger, o autor encontrou uma causalidade bidirecional entre consumo total de energia e PIB e, ainda, diferentes direções entre o PIB e vários tipos de consumo de energia. Stern (1991) examinou a relação entre PIB e uso de energia no período de 1947 a 1990 nos EUA. Os resultados mostraram que o uso de energia influencia no crescimento econômico e a energia é um fator limitante no crescimento na economia.

No outro extremo, Yu e Hwang (1984) examinaram a causalidade entre o PIB e o consumo de energia usando dados dos EUA para o período de 1947 a 1979. Aplicando a técnica de Sims, os autores não encontraram qualquer relação causal entre o crescimento econômico e o consumo de energia. Cheng (1999) analisou a relação entre o consumo de energia e o crescimento econômico na Índia usando dados anuais que cobrem o período de 1952 a 1995. Os resultados não apontaram uma relação entre essas variáveis.

Seguindo a linha de pensamento de que o crescimento econômico é determinante no que tange à demanda por energia (JORGENSEN; WILCOXEN, 1993) e que o consumo de energia apresenta duplo impacto no crescimento econômico e na degradação ambiental (SHAHBAZ; ZESHAN; AFZA, 2018), o uso de fontes e tecnologias de energia renovável surge como possibilidade de solução para a redução da degradação ambiental (DINCER, 2000). A introdução de fontes renováveis de energia favorece a diversificação na composição da distribuição de energia, com uma redução do impacto ambiental decorrente do crescimento da demanda econômica e a diminuição da dependência energética de combustíveis fósseis.

Fontes de energia como combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e o urânio são considerados finitos, enquanto fontes de energia renováveis como solar, eólica e hidrelétrica são consideradas sustentáveis em longo prazo (DINCER, 2000). A utilização de energia não renovável, principalmente de origem fóssil, é uma fonte de poluição ambiental, e as emissões de dióxido de carbono provenientes da queima de combustível fóssil são preocupações ambientais frequentes.

A introdução de um imposto sobre o uso de combustíveis fósseis surge como recurso para minimizar as emissões e motivar a substituição por fontes de energia renovável (JORGENSEN; WILCOXEN, 1993). Políticas de incentivo às energias

renováveis têm estimulado investimentos em inovação e tecnologias, aumentando a participação das energias renováveis no suprimento das demandas do setor de energia e gerando benefícios ambientais. Em movimento contrário, subsídios à produção de combustível fóssil agravam os problemas ambientais, uma vez que o combustível fóssil é determinante na degradação ambiental, e desmotivam investimento em energias renováveis (GILL; VISWANATHANA; HASSANB, 2017).

O desenvolvimento sustentável exige um fornecimento eficiente de recursos energéticos a um custo razoável e redução das externalidades sociais negativas (DINCER, 2000). O fortalecimento de pesquisas e tecnologias sobre energias renováveis, a eficiência energética e o investimento em infraestrutura dão suporte ao uso eficiente dos recursos naturais, garantindo padrões de consumo e de produção sustentáveis juntamente com o atendimento às necessidades dos países.

Em relação à conservação da energia, Daly (1990) apresentou dois princípios básicos para gestão de recursos renováveis e alcance do desenvolvimento sustentável. No primeiro, a taxa de consumo de recursos renováveis deve ser igual a sua taxa de recuperação. No segundo, a taxa de emissão de resíduos deve ser igual à capacidade de absorção do meio ambiente. Para a categoria de recursos não renováveis, o autor defende a exploração desse tipo de recursos de maneira quase sustentável, a taxa de consumo de recursos não renováveis deve ser limitada à taxa de aumento da oferta de recursos renováveis, com investimento constante para a substituição de um recurso não renovável por um renovável.

A manutenção do crescimento nos níveis de consumo de energia em países em desenvolvimento deve ser baseada no uso de tecnologias que promovam a redução dos desperdícios de energia, que minimizem as emissões de dióxido de carbono e que apresentem viabilidade econômica, sustentando a pesquisa para energias renováveis (BECKERMAN, 1992). O aprimoramento de tecnologias promove o desenvolvimento de novos produtos, com indústrias atentas às consequências de seus processos de produção (DINDA, 2004). A ênfase em tecnologias que aumentam a produtividade dos recursos está em conformidade com a promoção do desenvolvimento sustentável assim como a eficiência no uso dos recursos é desejável, tanto para renováveis quanto para não renováveis (DALY, 1990).

A energia contribui para a manutenção das atividades sociais e econômicas, essenciais para a promoção da sustentabilidade nos países em desenvolvimento (KAYGUSUZ, 2012). Contudo, enquanto o crescimento econômico e o consumo de

energia dos países em desenvolvimento estão aumentando exponencialmente, as mesmas respostas estão aumentando linearmente nos países desenvolvidos (MAGAZZINO, 2014). A demanda por energia está crescendo exponencialmente nos países desenvolvidos devido ao rápido crescimento populacional e à expansão econômica (KAYGUSUZ, 2012). Um maior crescimento econômico requer mais consumo de energia, assim, o consumo de energia eficiente é cada vez mais necessário (RAFINDADI; OZTURK, 2017).

Os países desenvolvidos precisam ampliar as tecnologias inovadoras para melhorar o uso de energia e outros recursos e, então, melhorar a eficiência energética, mesmo em condições de maior crescimento econômico. Os países em desenvolvimento, por sua vez, precisam introduzir tecnologia de eficiência de recursos (KAYA; YOKOBURI, 1997). Porém, como relatado por Kaygusuz (2012), a pobreza energética dificulta o desenvolvimento econômico concomitante com a sustentabilidade ambiental nos países em desenvolvimento.

Há influência mútua entre os níveis da atividade econômica e do consumo de energia na medida em que um nível de crescimento econômico leva a um nível de consumo de energia e vice-versa. Essa dependência indica a necessidade de diversificar as fontes de energia, com vistas ao crescimento econômico sustentável e para minimizar os problemas ambientais associados ao consumo excessivo de energia (MAGAZZINO, 2014). E, esse impacto do crescimento econômico, no consumo de energia pode ser transmitido por meio de incentivos à energia renovável (SEBRI; BEN SALHA, 2013). Rafindadi e Ozturk (2017) também enfatizam que a disposição da sociedade para a adoção da energia renovável dependerá da sofisticação, eficiência e confiabilidade da tecnologia, bem como da economia de uso e da aceitabilidade geral.

Nota-se a preocupação com a introdução de novas fontes de energia para diversificar a matriz energética nos países em diferentes estágios de desenvolvimento e é cada vez maior a cooperação para a transmissão de tecnologias de países desenvolvidos para os em desenvolvimento. Tais tecnologias reduzem desperdícios, aumentam a produtividade na geração de energia e visam à eficiência energética. A diminuição da dependência dos combustíveis fósseis surge como uma consequência dos incentivos aos investimentos em geração de energia de fontes renováveis. Os investimentos em energia renovável e a estipulação de metas de participação desta fonte na matriz energética, aliados à conscientização do uso sustentável dos recursos naturais nos diversos setores da economia, contribuem para o controle das externalidades

negativas causadas pelo crescimento econômico e colaboram com o desenvolvimento sustentável.

### 2.3 ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE (ESG) E O DESEMPENHO ECONÔMICO

Esta seção explora o debate crescente das ações empresariais sustentáveis em conjunto com o desempenho econômico. O desenvolvimento sustentável é entendido como aquele capaz de garantir o atendimento das necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias (WCED, 1987). Nos últimos anos, o caráter sustentável das empresas atraiu a atenção dos investidores que buscam realizar investimentos em empresas que apresentam resultados favoráveis à sociedade e com a transparência nas informações de ações voltadas para o meio ambiente e a comunidade, aliadas ao desempenho empresarial.

Os investidores estão em um processo de valorizar cada vez mais as práticas de responsabilidade social e corporativa realizadas por empresas (MIRALLES-QUIRÓS; MIRALLES-QUIRÓS; GONÇALVES, 2018) e adotaram os três pilares da sustentabilidade, são eles: o ambiental, o social e a governança (ESG<sup>1</sup>), como critério de pontuação (REHMAN et al., 2021). Este conjunto de boas práticas empresariais leva em consideração a individualidade das atividades operacionais, o ambiente em que a empresa está inserida e exige acompanhamento e aprimoramento contínuo.

Na prática, as ações de conservação do meio ambiente envolvem a gestão dos resíduos, a economia de água, proteção da biodiversidade, monitoramento da emissão de poluentes e a composição da matriz energética, já as ações sociais levam em consideração o respeito aos direitos humanos, às leis trabalhistas e ao investimento na qualidade de vida das comunidades. Por fim, as ações de governança incluem a ética e a transparência como princípios e a relação com fornecedores que adotam posturas sustentáveis.

Nesse sentido, pode se enfatizar que as ações ambientais englobam acesso sustentável aos recursos naturais, controle da emissão de poluentes, atenção às mudanças climáticas, segurança energética e alimentar, fatores cruciais para um crescimento econômico estável em longo prazo. Ações sociais envolvem o atendimento às necessidades básicas de sua população, como educação, alimentação e redução da

---

<sup>1</sup> Sigla em inglês Environmental, Social and Governance.

pobreza, investimento em capital humano e produtividade. E as ações de governança incorporam os sistemas de apoio à preservação dos direitos humanos, estabilidade institucional e inovação (THE WORLD BANK, 2021).

A presença de atitudes de ESG nas empresas é reconhecida como fator de investimento no mercado financeiro (LIMKRIANGKRAI; KOH; DURAND, 2016). Além dos critérios tradicionais, como avaliação dos riscos e taxa de retorno sobre o valor investido, os investidores enxergam nos indicadores de ESG um critério para análise e escolha de investimentos com foco na sustentabilidade aliada à rentabilidade dos seus títulos. Dessa forma, as abordagens de classificação são relevantes para empresas e investidores que incluam questões de ESG em seus processos de tomada de decisão (DORFLEITNER; HALBRITTER; NGUYEN, 2015). No Brasil, a Bolsa de Valores de São Paulo (Bovespa) criou o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE), em 2005, com o objetivo de induzir as empresas a adotarem melhores práticas de sustentabilidade visando à captação de investimentos.

Muitos são os estudos sobre a presença de práticas de ESG no desempenho das empresas atuantes no mercado financeiro, entretanto, com a produção de resultados contraditórios. Alguns estudos indicam que investimentos de ESG favorecem o desempenho econômico. Miralles-Quirós, Miralles-Quirós e Gonçalves (2018) concluíram que o mercado valoriza as práticas de governança social e corporativa em indústrias ambientalmente sensíveis (energia, produtos químicos, papel e celulose, mineração e fabricação de aço), enquanto as práticas ambientais são valorizadas em empresas não relacionadas às indústrias ambientalmente sensíveis. Garcia, Mendes da Silva e Orsato (2018) indicaram que a lucratividade dos ativos de empresas ambientalmente sensíveis está associada ao desempenho ambiental. Wang e Sarkis (2017) sugeriram que as ações de ESG influenciam positivamente nos resultados de desempenho financeiro empresarial.

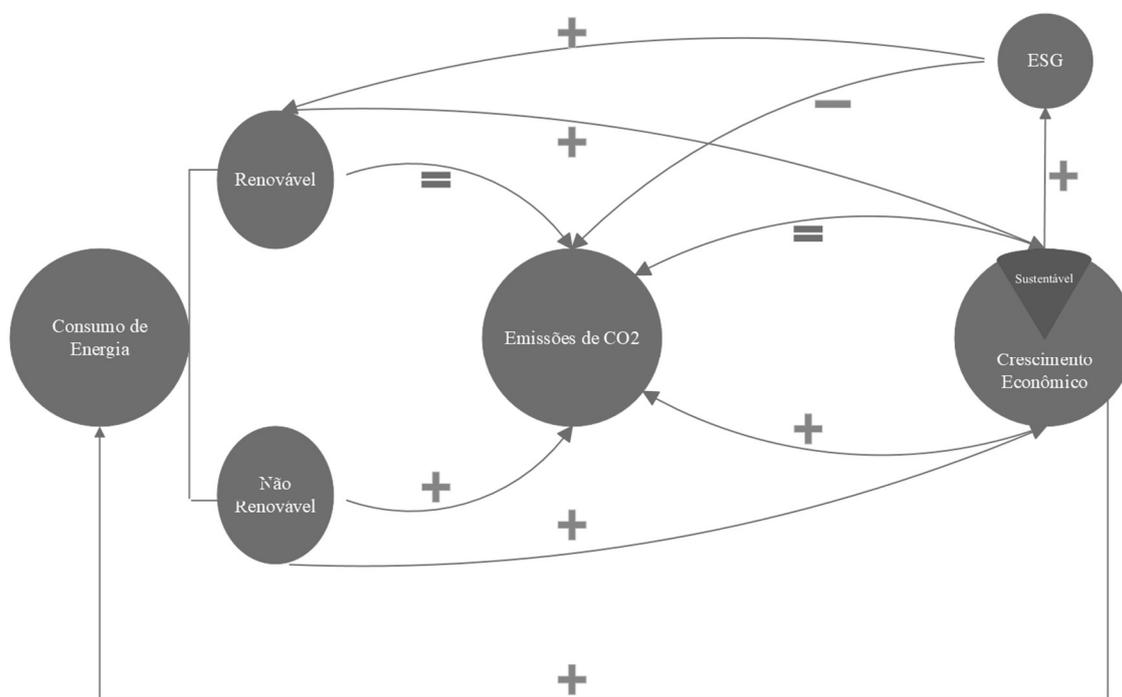
Outros autores encontraram resultados negativos, mas, para Cornell (2021), investimentos de ESG trazem benefícios sociais e podem atuar como uma proteção contra mudanças climáticas. Contudo, empresas com altas classificações de ESG trazem retornos esperados mais baixos para os investidores. Brammer et al. (2008) relataram uma associação negativa entre as práticas de ESG e o desempenho das empresas no mercado, as empresas atribuem o baixo retorno financeiro ao seu bom desempenho social e ambiental.

A prática de ESG pelas empresas tem evidenciado nos últimos anos uma mudança de paradigma nas relações entre as empresas e seus investidores, uma vez que estes estão mais atentos às novas oportunidades de criação de valor através da sustentabilidade. Para as empresas que investem nessas práticas, o olhar de longo prazo é uma característica que a torna mais resiliente, principalmente em momentos de crise. Apesar de ainda serem práticas muito recentes e incipientes, vale ressaltar o impacto positivo que elas podem representar na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a discussão entre energia, crescimento econômico e emissões de gases.

#### 2.4 ESQUEMA CONCEITUAL PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>, O CONSUMO DE ENERGIA, E O CRESCIMENTO ECONÔMICO

No decorrer deste capítulo discutiu-se sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia e o crescimento econômico, seus conceitos teóricos, desdobramentos e ligações mútuas. Neste contexto, este tópico traz uma síntese através de um *framework* teórico relacionando esses conceitos, conforme exposto na Figura 1.

**Figura 1** *Framework* Teórico



Fonte: elaborado pela autora.

O crescimento econômico requer um abastecimento adequado e confiável de energia (+), que por sua vez pode ser dividida em renovável e não renovável. O

consumo de energia proveniente de fontes não renováveis, como a queima de combustíveis fósseis, eleva as emissões de CO<sub>2</sub> (+) e também contribui para o crescimento econômico (+). No entanto, uma maior participação das fontes renováveis no consumo total de energia contribui para a diminuição do nível de emissão de poluentes (-) promovendo um crescimento econômico sustentável (+).

Cada vez mais os investidores incentivam a adoção de práticas de ESG. O crescimento econômico sustentável preza a manutenção do crescimento econômico e em conjunto com proteção ambiental, com o estímulo às práticas de ESG (+), a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> (-) e uma maior participação das fontes renováveis (+).

Os impactos ambientais que acompanham o crescimento econômico são vistos como efeitos passíveis de controle e podem ser contornados com o investimento em novas tecnologias que reduzem as emissões de poluentes, entre elas a substituição gradual da extração de combustíveis fósseis por fontes renováveis. A manutenção do crescimento nos níveis de consumo de energia em países em desenvolvimento deve ser baseada no uso de tecnologias que promovam a redução dos desperdícios de energia, que minimizem as emissões de dióxido de carbono e que apresentem viabilidade econômica, sustentando a pesquisa para energias renováveis.

## 2.5 ESTUDOS EMPÍRICOS DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>, O CONSUMO DE ENERGIA, E O CRESCIMENTO ECONÔMICO

A interação entre consumo de energia e crescimento econômico representa um assunto amplamente discutido em produções acadêmicas e apresenta como tendência mais recente o estudo destas variáveis juntamente com as emissões de CO<sub>2</sub>. Esta seção examina os estudos empíricos da relação entre emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de energia, e crescimento econômico com aplicação no Brasil, além de demais países e regiões, com o objetivo de averiguar a discussão proposta, os resultados encontrados, a evolução do tema e seus métodos.

A base de dados *Scopus* foi selecionada para a realização de uma pesquisa confiável e relevante visto que engloba diversas áreas do conhecimento, além de contar com revisão por pares e abrangência internacional (ELSEVIER, 2021). Definida a base de dados, a busca foi realizada no mês de abril de 2021 e ocorreu inicialmente por título, resumo e palavras-chave dos termos em inglês “*renewable energy*”, “*economic growth*” e “*CO<sub>2</sub> emission*”, com tradução para o português como “energia renovável”,

“crescimento econômico” e “emissão de CO<sub>2</sub>”, respectivamente. A delimitação empregada compreendeu o tipo de documento como somente artigos, os idiomas inglês e português, a área de estudo na categoria *Economics, Econometrics and Finance*, mas sem restrição temporal com o intuito de observar a quantidade total de artigos.

A busca resultou em um total de 42 artigos, ponto de partida para a análise da produção empírica. Após a leitura dos resumos, foram selecionados 24 artigos os quais apresentavam escopo teórico e dados metodológicos. Os artigos foram consultados quanto à classificação do Qualis Periódicos da CAPES e ao sistema de avaliação de periódicos científicos no Brasil, em seguida, verificou-se que, dos 24 artigos selecionados, treze deles apresentaram classificação A1 ou A2. Entre os artigos utilizados, nove não apresentam classificação no Qualis Periódicos, o que não diminuiu a confiabilidade dos artigos. Após esta seleção, foi realizada a leitura na íntegra de todos os artigos e sintetizadas as informações em forma de texto, trazendo os principais dados, os quais dão suporte para a seleção das variáveis e do método utilizado nesta dissertação. Os trabalhos estão apresentados por ordem cronológica, partindo inicialmente das contribuições mais antigas para as mais recentes.

Tiwari (2011) analisou a dinâmica do consumo de energia renovável, do crescimento econômico e das emissões de CO<sub>2</sub>. Para a análise, usou a abordagem de um Modelo de Vetores Autorregressivos (VAR) de três variáveis, o PIB, o consumo de energia renovável e as emissões de CO<sub>2</sub> para Índia ao longo do período de 1960 a 2009. O estudo revelou que um choque positivo no consumo de fonte de energia renovável aumenta o PIB e diminui as emissões de CO<sub>2</sub> e um choque positivo no PIB promove um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Também, Ben-Salha e Sebri (2014) examinaram as ligações de causalidade entre o crescimento econômico, o consumo de energia renovável, as emissões de CO<sub>2</sub> e o investimento doméstico na Tunísia entre 1971 e 2010, com aplicação do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) e as variáveis: o PIB, o investimento doméstico, as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia renovável. As considerações mostraram uma causalidade bidirecional entre o consumo de energia renovável e o PIB e que a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> diminui como uma reação a um aumento no consumo de energia renovável.

Com conclusões semelhantes, Zaghdoudi (2017), através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), mostrou que a energia renovável reduz as emissões de CO<sub>2</sub> em longo prazo. O autor examinou a relação casual entre os preços do

petróleo, a energia renovável, as emissões de dióxido de carbono e o crescimento econômico dos países da OCDE no período de 1990 a 2015. As variáveis utilizadas foram: as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável, a importação de petróleo bruto e o PIB.

Já os autores Balogh e Jámbor (2017), empregaram o Método dos Momentos Generalizados (GMM) em um conjunto de dados de painel composto por 168 países durante o período de 1990 a 2013 que compreende as emissões de CO<sub>2</sub>, o PIB, a produção de eletricidade a partir de fonte nuclear, a produção de eletricidade a partir do carvão, a produção de eletricidade renovável, o investimento estrangeiro direto, o turismo internacional e o valor adicionado do comércio, agricultura e indústria. Apesar do uso de métodos diferentes, os autores estabeleceram uma ligação entre as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e a energia renovável próxima ao relatado no trabalho de Zaghdoudi (2017). As conclusões confirmaram que as produções de energia nuclear e de energia renovável contribuem para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto a produção de eletricidade a partir do carvão age no sentido contrário.

Mahmoodi (2017) examinou a relação entre o crescimento econômico, a energia renovável e a emissão de CO<sub>2</sub> com base no Modelo de Vetor de Correção de Erros (VECM) para onze países em desenvolvimento no período de 2000 a 2014, usando como variáveis: a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB e a geração eletricidade renovável. As conclusões mostraram que o PIB provoca um aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e que a energia renovável impacta na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Os estudos de Paramati, Mo e Gupta (2017) também corroboram com Mahmoodi (2017) ao examinarem o efeito do crescimento do mercado de ações e do mercado investimento estrangeiro direto (IED) nas emissões de CO<sub>2</sub> e o impacto do consumo de energia renovável nas emissões de CO<sub>2</sub> e na produção econômica, de acordo com o modelo *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* (STIRPAT), para os países do G20 com dados anuais de 1991 a 2012 e as variáveis: as emissões de CO<sub>2</sub>, a eficiência energética, o investimento estrangeiro direto, o PIB, a formação bruta de capital fixo, a força de trabalho total, o consumo de energia não renovável, o consumo de energia renovável e a capitalização do mercado de ações. As conclusões sugeriram que o IED reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> nas economias em desenvolvimento, enquanto o crescimento do mercado de ações reduz nas economias desenvolvidas. Da mesma forma, o consumo de energia renovável reduz

substancialmente as emissões de CO<sub>2</sub> e aumenta a produção econômica em todos os painéis.

Ito (2017) examinou empiricamente a ligação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e não renovável e o crescimento econômico, com base no Método Generalizado dos Momento (GMM), usando dados em painel para 42 países desenvolvidos de 2002 a 2011, com as variáveis: as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia não renovável, PIB e o consumo de energia renovável. As conclusões sugeriram que o consumo de energia renovável contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e tem um efeito positivo no crescimento econômico no longo prazo, enquanto o consumo de energia não renovável apresenta um efeito negativo.

Seguindo essa direção, Bekhet e Othman (2018) analisaram a relação entre a energia renovável, as emissões de CO<sub>2</sub> e o crescimento econômico para o período de 1971 a 2015 na Malásia. Através do Modelo de Vetor de Correção de Erros (VECM) e das variáveis: a energia renovável, as emissões de CO<sub>2</sub> e o PIB, e da análise de causalidade de Granger, o estudo apontou que a energia renovável impacta na redução das emissões de CO<sub>2</sub>, assim como citado por Ito (2017).

Mbarek, Saidi e Feki (2018) examinaram a relação causal de longo prazo entre a energia renovável, as emissões de CO<sub>2</sub> e o crescimento econômico em quatro países do Mediterrâneo, França, Espanha, Itália e Turquia, no período de 1980 a 2012, através do Modelo de Vetor de Correção de Erros (VECM) e as variáveis: o PIB, o consumo de energia renovável, o consumo total de energia e as emissões de CO<sub>2</sub>. As considerações apontaram que o crescimento econômico impacta no aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> nos quatro países. Houve também um aumento entre o crescimento econômico e o consumo de energia renovável em curto e longo prazo e uma causalidade unidirecional das emissões de CO<sub>2</sub> ao consumo de energia renovável.

Embora utilizando métodos diferentes, os estudos de Mbarek, Saidi e Feki (2018), Ng et al. (2019), Zandi e Haseeb (2019) e Kang, Islam e Tiwari (2019) convergem em suas conclusões. Ng et al. (2019) examinaram a relação causal dinâmica entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o crescimento econômico, a produção de eletricidade de fontes renováveis e a produção de eletricidade de fontes não renováveis, através do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL), para 25 países da OCDE de 1990 a 2013. Utilizando as variáveis emissões de CO<sub>2</sub>, o PIB, a produção de eletricidade de fontes não renováveis e a produção de eletricidade de fontes renováveis, as conclusões apontam que a produção de eletricidade renovável provoca uma redução

nas emissões de CO<sub>2</sub> enquanto a produção de eletricidade não renovável apresenta efeito contrário. Além disso, uma causalidade unidirecional é encontrada do PIB para as emissões de CO<sub>2</sub>.

Em conformidade, Zandi e Haseeb (2019) examinaram o impacto da liberalização do comércio na emissão de dióxido de carbono. Os autores utilizaram dados em painel, para o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), de 105 países desenvolvidos e em desenvolvimento de 1990 a 2017 para as variáveis que representam a liberalização comercial, o consumo de energia, o consumo de energia renovável, o PIB e a emissão de CO<sub>2</sub>. As conclusões de longo prazo confirmaram que a utilização de energia renovável ajuda a reduzir a degradação ambiental, medida pela emissão de dióxido de carbono, em todos os países em desenvolvimento e desenvolvidos selecionados e evidenciaram uma causalidade unidirecional do crescimento econômico, representado pela variável PIB, à emissão de dióxido de carbono.

Nesse sentido, Kang, Islam e Tiwari (2019) examinaram as interações entre o consumo de energia renovável e não renovável, a emissão de CO<sub>2</sub> e o crescimento econômico na Índia durante 1965 a 2015 com dados trimestrais. Através da aplicação do Modelo de Vetores Autorregressivos (VAR) para as variáveis a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, a energia renovável e a não renovável os autores inferiram que a relação dinâmica entre as variáveis sofre mudanças ao longo do tempo, o consumo de energia renovável reduz os níveis de emissão de CO<sub>2</sub> e mantém o crescimento econômico, analisado pelo PIB.

Enquanto isso, Njoke, Wu e Tamba (2019) investigaram a relação entre o consumo de eletricidade, as emissões de CO<sub>2</sub> e o crescimento econômico nos Camarões para o período de 1971 a 2014 usando o Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) com as variáveis: o consumo de eletricidade, as emissões de CO<sub>2</sub> e o PIB. As conclusões indicaram uma causalidade unidirecional do crescimento econômico às emissões de CO<sub>2</sub> através da geração de eletricidade a partir de fontes de energia não renovável.

Dong, K., Dong X., e Dong, C. (2019) e Dong et al. (2018) examinaram os principais fatores que impactam na emissão de CO<sub>2</sub> e analisaram a eficácia das energias não renováveis e renováveis. O estudo empregou o *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* (STIRPAT), com a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, a população, a intensidade energética e a parcela de energia não renovável e renovável no consumo total final de energia como variáveis, para dados de 128 países entre 1990 e

2014. O estudo foi dividido em seis regiões conforme sua localização (América do Norte, América do Sul e Central, Europa e Eurásia, Oriente Médio, África e Ásia-Pacífico). As considerações sugeriram que a energia renovável pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto elevações no tamanho da população, do PIB, da intensidade energética e da energia não renovável aumentam significativamente os níveis de emissão de CO<sub>2</sub>.

Alguns autores realizaram uma seleção de países para estudar o impacto do crescimento econômico e do consumo de energia renovável nas emissões de CO<sub>2</sub>, como Majeed e Luni (2020), Dong, K., Dong, X., Jiang, Q. (2020) e Ben Jebli, Farhani e Guesmi (2020). Majeed e Luni (2020) investigaram como a energia renovável influencia na qualidade ambiental ao longo do período de 1990 a 2014 com um painel global de 131 países, classificados de acordo com seu nível de renda (alta renda, renda média alta, baixa renda média e baixa renda). Para a aplicação de dados em painel e o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), as variáveis utilizadas foram: a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, o consumo de energia renovável, a intensidade energética e a urbanização. As considerações finais sugeriram que a energia renovável melhora significativamente a qualidade ambiental, enquanto o crescimento econômico, analisado pela variável PIB, prejudica o meio ambiente.

Seguindo o caminho de Majeed e Luni (2020), Dong, K., Dong, X., Jiang, Q. (2020) analisaram o efeito do consumo de energia renovável nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para 120 países com quatro diferentes níveis de renda durante o período de 1995 a 2015. Utilizaram para o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) as seguintes variáveis: a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, o consumo de energia renovável e quatro variáveis de controle sendo o consumo de energia não renovável, a estrutura econômica, o nível de urbanização e abertura comercial. As considerações apontaram que o consumo de energia renovável provoca uma diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub> tanto no painel global quanto entre os subpainéis.

Nesta continuação, Ben Jebli, Farhani e Guesmi (2020) exploraram a relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o crescimento econômico, o consumo de energia renovável, o valor agregado industrial e o valor agregado de serviços, durante o período de 1990 a 2015, com dados anuais para as variáveis: a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, o consumo de energia renovável, o valor agregado de serviço e o valor agregado industrial. Os autores selecionaram 102 países classificados por quatro níveis de renda: baixa renda, renda média baixa, renda média alta e alta renda. Aplicando o Método Generalizado dos

Momentos (GMM) e o teste de causalidade de Granger, as considerações apontaram que, exceto para os países de renda média baixa, o consumo de energia renovável diminui as emissões de CO<sub>2</sub> em todos os países, mesmo em fase de crescimento econômico.

Shaari, Abidin e Karim (2020) examinaram os efeitos do consumo de energia renovável e do crescimento econômico sobre a emissão de CO<sub>2</sub> para nove países Balcãs selecionados de acordo com a renda usando dados que vão de 1990 a 2017. A partir do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) e inclusas as variáveis: a emissão de CO<sub>2</sub>, PIB, população e consumo de energia renovável. Os principais resultados mostraram que, em longo prazo, o consumo de energia renovável pode reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, o PIB pode aumentar a emissão de CO<sub>2</sub> em longo prazo. No curto prazo, os resultados mostraram que o PIB pode contribuir para aumentar a emissão de CO<sub>2</sub>. Ao contrário, um aumento no consumo de energia renovável pode ajudar a reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> no curto prazo.

Corroborando com as considerações de autores como Shaari, Abidin e Karim (2020), Ridzuan et al. (2021) investigaram as relações entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o crescimento econômico, o consumo de energia renovável e a produção de setores agrícolas na Malásia, entre 1978 e 2016, com dados anuais para a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, o consumo de energia renovável e a produção agrícola. As considerações extraídas a partir do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) apontaram que as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram significativamente devido ao crescimento no PIB e que o consumo de energia renovável impacta significativamente na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Seguindo o mesmo raciocínio do autor anterior, mas usando o Paquistão como campo de aplicação, Khan e Rehan (2020) examinaram a associação entre o consumo de energia, o crescimento econômico e a emissão de CO<sub>2</sub> usando dados anuais de 1965 a 2015 para as seguintes variáveis: emissão de CO<sub>2</sub>, PIB, consumo de carvão, gás natural e petróleo. As considerações baseadas na aplicação do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) indicaram que o consumo de energia e o PIB provocam um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> a curto e longo prazo, o que prejudica o meio ambiente, conclusões semelhantes às apresentadas no estudo de Ridzuan et al. (2021).

Através do uso de métodos diferentes, Neves, Marques e Patrício (2020), Salari, Javid e Noghanibehambari (2021) e Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021)

chegaram a conclusões parecidas. Neves, Marques e Patrício (2020) estudaram a degradação ambiental em dezessete países selecionados da União Europeia (UE) entre os anos de 1995 a 2017 com periodicidade anual, e ênfase na energia renovável, a partir do Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL) e por meio do estimador de Driscoll-Kraay para as seguintes variáveis: emissão de CO<sub>2</sub>, PIB, receita tributária ambiental real, investimento estrangeiro direto interno, número acumulado de políticas para o consumo de energia renovável, consumo e desperdício de energia renovável e consumo de energia primária. As considerações do trabalho indicaram que o PIB e o consumo de energia primária aumentaram as emissões de CO<sub>2</sub> tanto no curto quanto no longo prazo.

Nesse sentido, Salari, Javid e Noghanibehambari (2021) analisaram a relação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia e o crescimento econômico nos EUA, em nível estadual, durante 1997 e 2016. O estudo utilizou um modelo dinâmico com dados em painel e o Método Generalizado dos Momentos (GMM), incluindo como variáveis a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB e as energias: total, não renovável, renovável, industrial e residencial. Os autores concluíram que o consumo de energia não renovável promove um aumento na emissão de CO<sub>2</sub>, enquanto o consumo de energia renovável impacta na redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

Por fim, Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021) investigaram as ligações entre o crescimento econômico, as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia renovável para os países da União Europeia (UE), entre os anos de 1995 e 2014 com periodicidade anual, a partir do modelo de equações simultâneas em painel com uma análise espacial e Método dos Mínimos Quadrados Generalizados de Dois Estágios (GS2SLS). Os autores utilizaram como variáveis a emissão de CO<sub>2</sub>, o PIB, o consumo de energia renovável, a abertura comercial, a urbanização, o preço do óleo (petróleo e gás natural), a força de trabalho, o estoque de capital e o consumo de energia não renovável. As conclusões do trabalho indicaram a existência de uma conexão bidirecional entre o consumo de energia renovável e o PIB e, também, entre o PIB e a emissão de CO<sub>2</sub>.

Na sequência, um resumo dos trabalhos descritos é disposto na Tabela 1, com as informações sobre autores, ano de publicação, período e campo de aplicação, variáveis utilizadas, metodologia e principais conclusões, porém, ordenado por metodologia.

**Tabela 1** Resumo de estudos anteriores.

<b>Autores</b>	<b>Período</b>	<b>País/Região</b>	<b>Variáveis Utilizadas</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Principais Conclusões</b>
Ben-Salha e Sebri (2014)	1971 - 2010	Tunísia	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o investimento doméstico	ARDL	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Ng et al. (2019)	1990 - 2013	25 países da OECD	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, a produção de eletricidade de fontes não renováveis e a produção de eletricidade de fontes renováveis	ARDL	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Njoke, Wu e Tamba (2019)	1971 - 2014	Camarões	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB e o consumo de eletricidade	ARDL	PIB aumenta CO <sub>2</sub>
Neves, Marques e Patrício (2020)	1995 - 2017	17 países europeus	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, a receita tributária ambiental real, o investimento estrangeiro direto interno, o número acumulado de políticas para o consumo de energia renovável, o consumo e desperdício de energia renovável e o consumo de energia primária.	ARDL	PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Khan e Rehan (2020)	1965 - 2015	Paquistão	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de carvão, gás natural e petróleo.	ARDL	PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Ridzuan et al. (2020)	1978 - 2016	Malásia	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e a produção agrícola.	ARDL	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Shaari, Abidin e Karim (2020)	1990 - 2017	9 países balcânicos	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB e o consumo de energia renovável.	ARDL	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub>
Ito (2017)	2002 - 2011	42 países desenvolvidos	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável.	GMM	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Balogh e Jámbor (2017)	1990 - 2013	168 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, a produção de eletricidade a partir de fonte nuclear, a produção de eletricidade a partir do carvão, a produção de eletricidade renovável, o investimento estrangeiro direto, o turismo internacional e o valor adicionado do comércio, agricultura e indústria.	GMM	CER reduz CO <sub>2</sub> .

Continua

Ben Jebli, Farhani e Guesmi (2020)	1990 - 2015	102 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável, o valor agregado de serviço e o valor agregado industrial.	GMM	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Salari, Javid e Noghanibehambari (2021)	1997 - 2016	Estados Unidos	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB e as energias: total, não renovável, renovável, industrial e residencial.	GMM	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021)	1995 - 2014	21 países europeus	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável, o consumo de energia não renovável, a abertura comercial, a urbanização, o preço do óleo (petróleo e gás natural), a força de trabalho e o estoque de capital.	GS2SLS	PIB aumenta CO <sub>2</sub> e CER.
Zaghdoudi (2017)	1990 - 2015	OECD	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e a importação de petróleo bruto.	MQO	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Zandi e Haseeb (2019)	1990 - 2017	105 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável a liberalização comercial e o consumo de energia total.	MQO	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Dong, K., Dong, X., Jiang, Q. (2020)	1995 - 2015	120 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável, o consumo de energia não renovável, a estrutura econômica, o nível de urbanização e abertura comercial.	MQO	CER reduz CO <sub>2</sub> .
Majeed e Luni (2020)	1990 - 2014	131 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, a energia renovável, a intensidade energética e a urbanização.	MQO	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Paramati, Mo e Gupta (2017)	1991 - 2012	G20	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável, a eficiência energética, o investimento estrangeiro direto, a formação bruta de capital fixo, a força de trabalho total e a capitalização do mercado de ações.	STIRPAT	CER aumenta PIB e reduz CO <sub>2</sub> .

Continua

Dong et al. (2018)	1990 - 2014	128 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável, a população e a intensidade energética.	STIRPAT	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Dong, K., Dong X., e Dong, C. (2019)	1990 - 2014	128 países selecionados	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável, a população e a intensidade energética.	STIRPAT	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Tiwari (2011)	1960 - 2009	Índia	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável.	VAR	CER aumenta PIB e reduz CO <sub>2</sub> .
Kang, Islam e Tiwari (2019)	1965 - 2015	Índia	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável.	VAR	CER reduz CO <sub>2</sub> e mantém PIB.
Mahmoodi (2017)	2000 - 2014	11 países em desenvolvimento	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB e a geração eletricidade renovável.	VECM	CER reduz CO <sub>2</sub> ; PIB aumenta CO <sub>2</sub> .
Mbarek, Saidi e Feki (2018)	1980 - 2012	9 países mediterrâneos	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável e o consumo total de energia.	VECM	PIB aumenta CO <sub>2</sub> e CER.
Bekhet e Othman (2018)	1971 - 2015	Malásia	a emissão de CO <sub>2</sub> , o PIB, o consumo de energia renovável.	VECM	CER reduz CO <sub>2</sub> .

Fonte: dados compilados pela autora.

Notas: CER: consumo de energia renovável; CO<sub>2</sub>: emissões de CO<sub>2</sub>; PIB: Produto Interno Bruto. ARDL: Modelo Autorregressivo de Defasagens Distribuídas; GMM: Método Generalizado de Momentos; GS2SLS: Método dos Mínimos Quadrados Generalizados de Dois Estágios; MQO: Mínimos Quadrados Ordinários; STIRPAT: *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*; VAR: Modelo Vetorial Autorregressivo; VECM: Modelo Vetorial de Correção de Erros.

A revisão de literatura indicou que a relação entre as variáveis emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de energia, e crescimento econômico tem sido investigada em vários países, com a maior parte dos estudos concentrados nos anos 2020 e 2021. Entre os métodos aplicados, destaca-se a utilização dos modelos GMM e ARDL nos estudos mais atuais, entretanto, outros também são recorrentes na literatura como MQO e VAR/VECM.

Diante da crescente preocupação com a qualidade ambiental, a emissão de poluentes aparece como um indicador para a situação ambiental, a parcela de contribuição dos combustíveis fósseis nas emissões de CO<sub>2</sub> é cada vez mais retratada, estimulando investimentos em fontes de energia renovável para alteração na composição da matriz energética e minimização das emissões. A diferenciação dos efeitos sobre as emissões de CO<sub>2</sub> e o crescimento econômico entre energias de fonte renovável e não renovável é percebida nas publicações. Em suma, independentemente do método utilizado, os resultados apontam que o consumo de energia renovável favorece o crescimento econômico enquanto reduz as emissões de CO<sub>2</sub>.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, embora não localizado a partir do método de revisão de literatura empírica aplicada, foi encontrado o trabalho de Amarante et al. (2021), os quais apresentaram o Brasil como campo de aplicação específico e a utilização de apenas um tipo de energia para cada fonte renovável e não renovável. Contudo, optou-se por relatar os achados dos autores Amarante et al. (2021) que examinaram a relação causal entre o crescimento econômico, o consumo de energias renovável e não renovável e as emissões de CO<sub>2</sub> para o Brasil no período de 1997 a 2016. Para tanto, os autores utilizaram o Método Generalizado de Momentos (GMM) juntamente com o Modelo Vetorial Autorregressivo (VAR), para as seguintes variáveis: PIB, emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de combustíveis derivados de petróleo, consumo de etanol e abertura comercial. Os resultados apontaram que consumo de energia renovável aumenta o crescimento econômico e diminui as emissões de CO<sub>2</sub>.

A revisão da literatura de Amarante et al. (2021) é importante para deixar claro que o presente estudo apresenta como diferencial a utilização de uma combinação de tipos de energias categorizadas para a fonte de energia renovável, tornando o presente estudo mais abrangente em relação à questão fonte de energia.

### 3 METODOLOGIA

O presente estudo teve a finalidade de analisar a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o crescimento econômico e o consumo de energia renovável para o Brasil durante o período de 1990 a 2018 para determinar as interações dinâmicas entre as séries. O Modelo de Vetores Autorregressivos (VAR) foi escolhido diante do uso de dados através de séries temporais, juntamente com o Modelo de Vetor de Correção de Erros (VECM), uma vez que as séries são estacionárias em primeira diferença e cointegradas. Além disso, o Modelo de Vetores Autorregressivos (VAR) trata todas as variáveis como endógenas e examina as relações lineares entre cada variável e os valores defasados dela própria e de todas as demais variáveis, assim como utilizaram Mbarek, Saidi e Feki (2018) e Bekhet e Othman (2018).

#### 3.1 BASE DE DADOS

No estudo atual, foram utilizados dados anuais para o Brasil que correspondem ao período de 1990 a 2018, o período da amostra foi delimitado de acordo a disponibilidade de dados do Banco Mundial, a partir dos Indicadores de Desenvolvimento Mundial, para todas as variáveis - emissão de CO<sub>2</sub>, PIB, e com dados da Agência Internacional de Energia para a variável consumo de energia renovável. As variáveis utilizadas são as seguintes: emissão de CO<sub>2</sub>, PIB e consumo de energia renovável. A definição das variáveis utilizadas é apresentada a seguir:

i) Emissões de CO<sub>2</sub>: As emissões de dióxido de carbono são decorrentes da queima de combustíveis fósseis e fabricação de cimento, mas excluem emissões do uso da terra, como desmatamento. As emissões de dióxido de carbono, em grande parte subprodutos da produção e uso de energia, respondem pela maior parcela dos gases de efeito estufa, que estão associados ao aquecimento global e causam mudanças climáticas (THE WORLD BANK, 2021).

ii) Produto Interno Bruto - PIB: O PIB é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país e neste estudo é representado pelo crescimento econômico. Os dados estão em dólares americanos constantes de 2015.

iii) Consumo de energia renovável: O consumo de energia renovável é a parcela da energia renovável no consumo total de energia final. Fontes de energia renovável são consideradas sustentáveis em longo prazo e repostas pela natureza, entre elas a biomassa, geotermal, solar, eólica e hidráulica.

**Tabela 2** Variáveis selecionadas a partir da fundamentação empírica.

<b>Código</b>	<b>Variável</b>	<b>Fonte</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade de Medida</b>	<b>Fundamentação Empírica</b>
CO <sub>2</sub>	Emissões de CO <sub>2</sub>	World Bank Data, 2021	As emissões de dióxido de carbono geradas durante o consumo de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos e a queima de gás	Quilotons métricos	Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021); Salari, Javid e Noghanibehambari (2021); Majeed e Luni (2020); Kang, Islam e Tiwari (2019); Ito (2017); Mahmoodi (2017); Tiwari (2011)
PIB	Produto Interno Bruto	World Bank Data, 2021	O PIB é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país	US\$ a preços constantes de 2015	Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021); Salari, Javid e Noghanibehambari (2021); Majeed e Luni (2020); Kang, Islam e Tiwari (2019); Ito (2017); Mahmoodi (2017); Tiwari (2011)
CER	Consumo de energia renovável	<i>International Energy Agency</i> , 2021	O consumo de energia renovável é a parcela da energia renovável no consumo total de energia	Petajoules	Radmehr, Henneberry e Shayanmehr (2021); Salari, Javid e Noghanibehambari (2021); Majeed e Luni (2020); Kang, Islam e Tiwari (2019); Ito (2017); Mahmoodi (2017); Tiwari (2011)

Fonte: dados compilados pela autora.

As emissões de CO<sub>2</sub> estão medidas em quilotons métricos (KT), um múltiplo decimal da unidade da tonelada. A variável PIB foi calculada usando preços constantes (ano base 2015 = 100). O consumo de energia renovável está convertido em petajoules (PJ), unidade tradicionalmente usada para contabilizar energia de diferentes fontes, para fins de comparação, 1GWh equivale a 0,0036PJ (IEA, 2021)

### 3.2 TEORIA ECONOMETRICA

#### 3.2.1 Teste da Raiz Unitária Dickey-Fuller Aumentado

Uma série estacionária apresenta média e variância constantes ao longo do tempo, se uma série temporal é não estacionária, é possível apenas estudar seu comportamento pelo período de tempo em consideração (GUJARATI e PORTER, 2011). Para trabalhar com séries

temporais, a partir da realização de um processo estocástico, elas precisam ser estacionárias, uma vez que as inferências estatísticas terão validade somente se os resíduos da série temporal estimada forem estacionários (BUENO, 2012).

Segundo Gujarati e Porter (2011), um processo estocástico é estacionário se a média e a variância forem constantes ao longo do tempo e o valor da covariância entre os dois períodos de tempo depender apenas da distância, do intervalo ou da defasagem entre esses dois períodos, com essas propriedades:

$$\text{Média: } E(Y_t) = \mu \quad (1)$$

$$\text{Variância: } \text{var}(Y_t) = E(Y_t - \mu)^2 = \sigma^2 \quad (2)$$

$$\text{Covariância: } Y_k = E[(Y_t - \mu)(Y_{t+k} - \mu)] \quad (3)$$

em que  $Y_k$  é a covariância entre os valores de  $Y_t$  e  $Y_{t+k}$  na defasagem  $k$ , isto é, entre dois valores de  $Y$  separados por  $k$  períodos.

Para saber se uma série temporal é estacionária, são aplicados testes de estacionariedade, entre eles o teste de raiz unitária, um teste probabilístico que permite determinar se uma série é estacionária ou não além de sua ordem de integração.

Bueno (2012) apresenta o teste de raiz unitária de Dickey Fuller (DF) em que o erro é considerado um ruído branco. Para entender o teste, considere o seguinte modelo:

$$y_t = \phi y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4)$$

A tendência inicial é estimar esse modelo e usar um teste convencional de  $t$  sobre  $\phi$  tendo como hipótese nula  $H_0: \phi = 1$ . Em geral, os pacotes econométricos reportam os testes nos coeficientes contra a hipótese nula de serem iguais a zero. Então, pode-se alterar o teste subtraindo  $y_{t-1}$  de ambos os lados:

$$\Delta y_t = (\phi - 1)y_{t-1} + \varepsilon_t = \alpha y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

em que se define  $\alpha \equiv \phi - 1$ .

Assim,  $H_0: \phi = 1$  é equivalente a  $H_0: \alpha = 0$ .

Como frequentemente o erro não é considerado um ruído branco, Bueno (2012) apresenta o teste de raiz unitária de Dickey Fuller Aumentado (ADF) em que o erro é

considerado como um processo estacionário qualquer. Supondo que  $y_t$  seja um processo autorregressivo de ordem  $p$ , com raiz unitária:

$$y_t = \mu + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_{p-1} y_{t-p+1} + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (6)$$

O modelo é estimado com as variáveis autorregressivas; dessa forma, o desvio é corrigido do valor correto da estatística, ou seja, são encontrados os desvios de  $y_t$  em relação à sua "média", para deslocar a distribuição de  $\alpha$  em direção a zero, caso a hipótese nula seja aceita. Do ponto de vista prático, é preciso introduzir tantas variáveis autorregressivas quantas forem necessárias. Para entender o teste, adicione e subtraia  $\phi_p y_{t-p-1}$  à equação anterior:

$$\begin{aligned} y_t &= \mu + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_{p-1} y_{t-p+1} + \phi_p y_{t-p} + \phi_p y_{t-p+1} + \phi_p y_{t-p+1} + \varepsilon_t = \\ &= \mu + \phi_1 y_{t-1} + (\phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+1} - \phi_p y_{t-p+1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (7)$$

Utilizando o mesmo procedimento, desta vez com  $(\phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+2}$ :

$$\begin{aligned} y_t &= \mu + \phi_1 y_{t-1} + \dots + (\phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+2} - (\phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+2} + \\ &+ (\phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+1} - \phi_p \Delta y_{t-p+1} + \varepsilon_t = \mu + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \\ &+ (\phi_{p-2} + \phi_{p-1} + \phi_p) y_{t-p+2} - (\phi_{p-1} + \phi_p) \Delta y_{t-p+2} - \phi_p \Delta y_{t-p+1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (8)$$

Repetindo isso  $p$  vezes, obtém-se ao final:

$$\Delta y_t = \mu + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \lambda_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (9)$$

em que

$$a = -\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i\right); \lambda_i = -\sum_{j=1}^{p-1} \phi_{j+1} \quad (10)$$

Com a rejeição da hipótese nula conclui-se que a série não possui raiz unitária, ou seja, apresenta estacionariedade. Por outro lado, não rejeitar a hipótese nula significa admitir que a série possui uma raiz unitária. Portanto, recomenda-se a rejeição da hipótese nula.

### 3.2.2 Vetores Autorregressivos (VAR)

Sims (1980) desenvolveu o seu modelo VAR com a premissa de que há uma simultaneidade entre um conjunto de variáveis, qual seja, a de que todas elas devem ser tratadas como endógenas. De acordo com Bueno (2012), o modelo de vetor autorregressivo permite que se expressem modelos econômicos completos e se estimem os parâmetros desse modelo, entretanto, os modelos em VAR definem restrições entre as equações do modelo. De modo geral, pode-se expressar um modelo autorregressivo de ordem  $p$  por um vetor com  $n$  variáveis endógenas,  $X_t$ , conectadas entre si por meio de uma matriz  $A$ , conforme segue:

$$AX_t = B_0 + \sum_{i=1}^p V = B_i X_{t-i} + B\varepsilon_t \quad (11)$$

em que  $A$  é uma matriz  $n \times n$  que define as restrições contemporâneas entre as variáveis que constituem o vetor  $n \times 1$  ( $X_t$ );  $B_0$  é um vetor de constantes  $n \times 1$ ;  $B_i$  são matrizes  $n \times n$ ;  $B$  é uma matriz diagonal  $n \times n$  de desvios-padrão;  $\varepsilon_t$  é um vetor  $n \times 1$  de perturbações aleatórias não correlacionadas entre si contemporânea ou temporalmente.

Esse modelo é normalmente estimado em sua forma reduzida por causa da endogeneidade das variáveis, isto é, estima-se o seguinte modelo:

$$X_t = A^{-1}B_0 + \sum_{i=1}^p A^{-1}B_i X_{t-i} + A^{-1}B\varepsilon_t = \phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + e_t \quad (12)$$

em que  $\phi_i \equiv A^{-1}B_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, p$   $B\varepsilon_t \equiv Ae_t$

Também é possível assumir o seguinte modelo bivariado de ordem 1:

$$y_t = b_{10} - a_{12}z_t + b_{11}z_{t-1} + b_{12}z_{t-1} + \sigma_y \varepsilon_{yt}; \quad (13)$$

$$z_t = b_{20} - a_{21}y_t + b_{21}y_{t-1} + b_{22}z_{t-1} + \sigma_z \varepsilon_{zt}; \quad (14)$$

Segundo Bueno (2012), nesse modelo, as variáveis são mutuamente influenciadas umas pelas outras, tanto contemporaneamente como pelos seus valores defasados. Diante disso, o modelo não pode ser estimado diretamente, já que ambas as variáveis contemporâneas  $z_t$  e  $y_t$  são individualmente correlacionadas aos erros  $\varepsilon_{yt}$  ou  $\varepsilon_{zt}$ . O objetivo do VAR é desenvolver técnicas para evitar esse problema, objetivando-se encontrar a trajetória da variável de interesse perante um choque estrutural.

As hipóteses assumidas para esse modelo são:

- $y_t$  e  $z_t$  são ambos estacionários;
- $\varepsilon_{yt} \sim RB(0,1)$  e  $\varepsilon_{zt} \sim RB(0,1)$ ;
- $\varepsilon_{yt} \perp \varepsilon_{zt} \rightarrow Cov(\varepsilon_{yt}, \varepsilon_{zt}) = 0$ .

De acordo com Bueno (2012), para lidar com a dificuldade de especificação das defasagens do modelo, uma alternativa usual na literatura é escolher o modelo utilizando o critério de informação de Akaike, Schwarz ou Hannan-Quinn. O critério de informação é uma forma de encontrar o número ideal de parâmetros de um modelo e consiste em minimizar uma função baseada nos resíduos, penalizada pelo número de regressores. Bueno (2012) apresenta três principais critérios de informação. A estatística de Schwarz, denotada por BIC (*Bayesian Information Criterion*) ou SBC (*Schwarz Bayesian Criterion*), é dada por:

$$BIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}^2 + n \frac{\ln T}{T} \quad (15)$$

em que  $n = p + q$ , se o modelo não tem constante, e  $n = p + q + 1$ , se há constante no modelo,

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \hat{\varepsilon}_t^2}{T} \quad (16)$$

A estatística de Akaike, denotada por AIC (*Akaike Information Criterion*), é dada por:

$$AIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}^2 + n \frac{2}{T} \quad (17)$$

Por fim, a estatística de Hannan-Quinn, denotada por HQ, é dada por:

$$AIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}^2 + n \frac{2}{T} \ln \ln T \quad (18)$$

Quanto mais parâmetros forem estimados no mesmo período da amostra, menor será o erro estimado, mas isso será penalizado na segunda parcela da estatística. Por isso, deseja-se o menor AIC, HQ ou BIC possível. O uso do critério de informação (de qualquer tipo) para selecionar a defasagem ótima do modelo é largamente recomendado (BUENO, 2012).

### 3.2.3 Teste de Cointegração de Johansen

Os testes de cointegração de Johansen propõe definir o posto da matriz  $\phi$  e, assim, estimar os vetores de cointegração contidos na matriz  $\beta$ . A metodologia de Johansen permite a estimação do VECM simultaneamente aos vetores de cointegração. Por isso, propõe-se uma normalização aos vetores de cointegração, de forma a restringir as possibilidades que essas matrizes podem assumir (BUENO, 2012).

Para estabelecer o teste, Bueno (2012) introduz variáveis determinísticas ao modelo, uma vez que os valores críticos dependem da configuração dessas variáveis:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \delta' d_t + \varepsilon_t \quad (19)$$

em que  $d_t = [1, t]'$  é um vetor com variáveis determinísticas;  $\delta$  uma matriz de coeficientes cuja dimensão é compatível com  $d_t$ ;

Reescrevendo o modelo anterior na forma VECM, obtém-se:

$$\Delta X_t = \phi X_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Lambda_i \Delta X_{t-1} + \delta' d_t + \varepsilon_t \quad (20)$$

O primeiro teste é o do traço, que assume as seguintes hipóteses:

$$H_0: r = r^* \quad X \quad H_1: r > r^* \quad (21)$$

Assim,  $H_0$ : existem  $r^*$  vetores de cointegração e  $H_1$ :  $r > r^*$  vetores.

A estatística do teste é dada por:

$$\lambda_{tr}(r) = -T \sum_{i=r+1}^n \ln(1 - \hat{\lambda}_i) \quad (22)$$

O segundo teste é o de máximo autovalor, que assume as seguintes hipóteses:

$$H_0: r = r^* \quad X \quad H_1: r > r^* + 1 \quad (23)$$

Assim,  $H_0$ : existem  $r^*$  vetores de cointegração e  $H_1$ :  $r^* + 1$  vetores.

A estatística do teste é dada por:

$$LR(r) = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1}) \quad (24)$$

Bueno (2012) esclarece que é preciso determinar a ordem de defasagens dos componentes autorregressivos e o modelo de cointegração a ser testado. Para determinar a ordem de defasagem, é preciso combinar, simultaneamente, o melhor critério de informação à ausência de autocorrelação dos resíduos. Para determinar o modelo de cointegração, existem cinco possibilidades: ausência de intercepto e tendência tanto no vetor de cointegração quanto no nível de  $X_t$ ; existência de intercepto apenas no vetor de cointegração; existência de intercepto no vetor de cointegração e tendência linear no nível de  $X_t$ ; existência de intercepto no vetor de cointegração e tendência linear no vetor de cointegração e no nível; existência de intercepto e tendência linear no vetor de cointegração e tendência quadrática no nível.

### 3.2.4 Vetor de Correção de Erros (VECM)

De acordo com Bueno (2012), o modelo vetor de correção de erros (VECM) é uma versão mais completa do VAR. Esse modelo possui significado econômico, pois suas variáveis apresentam um componente de longo prazo e um de curto prazo. O modelo VAR com variáveis não estacionárias, mas diferenciadas, omite variáveis relevantes, enquanto o VECM corrige esse problema.

Bueno (2012) apresenta um modelo, o qual admite tratar de um VAR (3), depois enuncia-se o resultado para o caso de um VAR (p):

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \phi_3 X_{t-3} + e_t \quad (25)$$

A essa equação, some e subtraia  $\phi_3 X_{t-2}$ :

$$\begin{aligned} X_t &= \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \phi_3 X_{t-2} - \phi_3 X_{t-2} + \phi_3 X_{t-3} + e_t = \\ &= \phi_1 X_{t-1} + (\phi_2 + \phi_3) X_{t-2} + \phi_3 \Delta X_{t-2} + e_t \end{aligned} \quad (26)$$

Ao resultado anterior, some e subtraia  $(\phi_2 + \phi_3) X_{t-1}$ :

$$\begin{aligned}
X_t &= \phi_1 X_{t-1} + (\phi_2 + \phi_3) X_{t-1} - (\phi_2 + \phi_3) X_{t-1} + (\phi_2 + \phi_3) X_{t-2} - \phi_3 \Delta X_{t-2} + e_t = \\
&= (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) X_{t-1} - (\phi_2 + \phi_3) \Delta X_{t-1} - \phi_3 \Delta X_{t-2} + e_t
\end{aligned} \tag{27}$$

Finalmente, subtraia  $X_{t-1}$  de ambos os lados para obter a versão do VAR na forma VECM:

$$\begin{aligned}
X_t - X_{t-1} &= -X_{t-1} + (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) X_{t-1} - (\phi_2 + \phi_3) \Delta X_{t-1} - \phi_3 \Delta X_{t-2} + e_t = \\
\Delta X_t &= -[I - (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)] X_{t-1} - (\phi_2 + \phi_3) \Delta X_{t-1} - \phi_3 \Delta X_{t-2} + e_t = \\
&= \phi X_{t-1} + \sum_{i=1}^2 \Lambda_i X_{t-1} + e_t
\end{aligned} \tag{28}$$

O caso geral é derivado de forma semelhante e direta a partir do que foi feito anteriormente:

$$\Delta X_t = \phi X_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Lambda_i \Delta X_{t-1} + e_t \tag{29}$$

em que  $\Lambda_i = -\sum_{j=1+i}^p \phi_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, p-1$ .

Ainda segundo o autor, se há raiz unitária, então,  $\phi(I) = 0$  e  $\phi = \alpha\beta'$ , assim,  $\beta$  é a matriz que tem  $r$  vetores de cointegração e  $\alpha$  é a matriz de ajustamento, com  $r$  vetores de ajustamento. O modelo de correção de erros explica  $\Delta X_t$  por dois componentes: os fatores de curto prazo,  $\sum_{i=1}^{p-1} \Lambda_i \Delta X_{t-1}$ , e a relação de longo prazo  $\phi X_{t-1}$ , na presença de cointegração.

### 3.2.5 Teste Jarque-Bera de Normalidade

Segundo Bueno (2012), o teste de Jarque-Bera (JB) permite testar a presença de resíduos normais na regressão do modelo. Sob essa hipótese, a assimetria é igual a zero e a curtose é igual a três. Portanto, deve-se testar a hipótese conjunta:

$$H_0: E(\varepsilon_t^3) = 0 \wedge E(\varepsilon_t^4) = 3 \tag{30}$$

×

$$H_1: E(\varepsilon_t^3) \neq 0 \vee E(\varepsilon_t^4) \neq 3 \tag{31}$$

Para implementá-lo, usa-se a estatística

$$JB = \frac{T}{6} \left[ \frac{\sum_{t=1}^T (\widehat{\varepsilon}_t^s)^3}{T} \right]^2 + \frac{T}{24} \left[ \frac{\sum_{t=1}^T (\widehat{\varepsilon}_t^s)^4 - 3}{T} \right]^2 \xrightarrow{d} \chi_2^2 \quad (32)$$

A rejeição da hipótese nula indica não normalidade, entretanto, espera-se que os resíduos apresentem distribuição normal.

### 3.2.6 Teste White de Heterocedasticidade

Segundo Gujarati e Porter (2011), o teste de White permite verificar a presença de heterocedasticidade no modelo. Para ilustrar, os autores apresentam um modelo com três variáveis:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + u_i \quad (33)$$

Estime a regressão auxiliar:

$$\hat{u}_i^2 = \alpha_1 + \alpha_2 X_{2i} + \alpha_3 X_{3i} + \alpha_4 X_{2i}^2 + \alpha_5 X_{3i}^2 + \alpha_6 X_{2i} X_{3i} + v_i \quad (34)$$

Teste:

$$H_0: \alpha_1 = \dots = \alpha_6 = 0 \quad (35)$$

×

$$H_1: \alpha_j \neq 0 \quad (36)$$

Estatística de teste:

$$n R^2 \sim \chi_{gl}^2 \quad (37)$$

Rejeita-se a nula se o valor calculado exceder o valor tabelado. A rejeição da hipótese nula indica a presença de heterocedasticidade, entretanto, espera-se que o modelo seja homocedástico, ou seja, apresente variância constante dos resíduos.

### 3.2.7 Teste LM de Autocorrelação

De acordo com Bueno (2012), o teste LM para autocorrelação dos resíduos também é conhecido como teste de Breusch-Godfrey (BG). Para implementá-lo, regrida:

$$\widehat{\varepsilon}_t = \beta_1 \widehat{\varepsilon}_{t-1} + \beta_2 \widehat{\varepsilon}_{t-2} + \dots + \beta_h \widehat{\varepsilon}_{t-h} + u_t \quad (38)$$

Teste:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_h = 0 \quad (39)$$

×

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \text{ ou } \beta_2 \neq 0, \text{ ou } \dots \text{ ou } \beta_h \neq 0 \quad (40)$$

Pode-se mostrar que:

$$LM_h = T \times R^2 \xrightarrow{d} \chi_h^2 \quad (41)$$

Sob a hipótese nula. Rejeita-se a nula se o valor calculado exceder o valor tabelado. A rejeição da hipótese nula indica a presença de autocorrelação, entretanto, espera-se a ausência de autocorrelação nos resíduos.

### 3.2.8 Teste de Estabilidade do Modelo

De acordo com Lütkepohl (2005), a análise das raízes inversas do polinômio característico autorregressivo permite testar a estabilidade do modelo. Se todas as raízes do polinômio característico se encontrarem dentro do círculo unitário, o sistema será considerado estável, uma vez que todas as raízes devem ter módulo menor do que 1.

### 3.2.9 Função de Resposta ao Impulso

Segundo Bueno (2012), o modelo VAR permite identificar todos os parâmetros da forma estrutural apenas com a imposição de restrições adicionais. Diante disso, Sims (1980)

sugere um sistema recursivo através da imposição de que alguns coeficientes sejam iguais a zero, usando argumentos econômicos para definir quais deles são iguais a zero. Dessa forma, Sims impõe que o efeito feedback seja limitado.

Bueno (2012) sugere um modelo bivariado com a imposição de que  $a_{12} = 0$ , assim:

$$y_t = b_{10} + b_{11}y_{t-1} + b_{12}z_{t-1} + \varepsilon_{yt} \quad (42)$$

$$z_t = b_{20} + a_{21}y_t + b_{21}z_{t-1} + \varepsilon_{zt} \quad (43)$$

A restrição torna os parâmetros estruturais restantes identificáveis

$$\begin{aligned} A^{-1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -a_{21} & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \\ \begin{bmatrix} y_t \\ z_t \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -a_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{10} \\ b_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -a_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{t-1} \\ z_{t-1} \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -a_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_y & 0 \\ 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{yt} \\ \varepsilon_{zt} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (44)$$

com  $a_{12} = 0$ , os erros reduzidos ficam

$$\begin{bmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_y \varepsilon_{yt} \\ \sigma_z \varepsilon_{zt} - a_{21} \sigma_y \varepsilon_{yt} \end{bmatrix} \quad (45)$$

de modo que

$$var(e_1) = \sigma_y^2 \quad (46)$$

$$cov(e_1, e_2) = -a_{21} \sigma_y^2 \quad (47)$$

$$var(e_2) = \sigma_z^2 + a_{21}^2 \sigma_y^2 \quad (48)$$

As três equações combinadas com as demais equações a seguir permitem identificar os parâmetros estruturais do modelo.

$$\phi_{10} = b_{10} \quad (49)$$

$$\phi_{11} = b_{11} \quad (50)$$

$$\phi_{21} = -a_{21} b_{11} + b_{21} \quad (51)$$

$$\phi_{20} = b_{20} - b_{20} a_{21} \quad (52)$$

$$\phi_{12} = b_{12} \quad (53)$$

$$\phi_{22} = -a_{21}b_{12} + b_{22} \quad (54)$$

De acordo com Gujarati e Porter (2011), os coeficientes individuais nos modelos estimados VAR são, muitas vezes, difíceis de serem interpretados, diante disso, a função de resposta ao impulso é amplamente utilizada e delinea o impacto de choques nos termos de erro por vários períodos no futuro para descobrir como a variável dependente responde ao choque administrado a uma ou mais equações no sistema.

### 3.2.10 Análise da Decomposição da Variância

De acordo com Bueno (2012), a decomposição da variância permite analisar os resultados do modelo. Trata-se de uma forma de dizer qual porcentagem da variância do erro de previsão decorre de cada variável endógena ao longo do horizonte de previsão. Para entender a ideia, o autor apresenta um modelo com duas variáveis endógenas,  $y$  e  $z$ :

$$X_{t+h} = \bar{X} + \sum_{i=0}^{\infty} \psi_j \varepsilon_{t+h-i} \quad (55)$$

Calcule o erro de previsão:

$$X_{t+h} - E_t(X_{t+h}) = \sum_{i=0}^{h-1} \psi_j \varepsilon_{t+h-i} \quad (56)$$

Detalhando apenas  $y_{t+h}$ :

$$\begin{aligned} y_{t+h} - E_t(y_{t+h}) &= \psi_{0,11} \varepsilon_{yt+h} + \psi_{1,11} \varepsilon_{yt+h-1} + \dots + \psi_{1,11} \varepsilon_{yt+1} + \psi_{0,12} \varepsilon_{zt+1} + \\ &+ \psi_{1,12} \varepsilon_{zt+h-1} + \psi_{h-1,12} \varepsilon_{zt+1} \end{aligned} \quad (57)$$

Logo:

$$\sigma_h^2(h) = \sigma_y^2(\psi_{0,11}^2 + \psi_{1,11}^2 + \dots + \psi_{h-1,11}^2) + \sigma_z^2(\psi_{0,12}^2 + \psi_{1,12}^2 + \dots + \psi_{h-1,12}^2) \quad (58)$$

Por último, a variância do erro de previsão é decomposta em seus diversos elementos. No caso do modelo bivariado, a variância é decomposta em dois pedaços para cada período, dividindo-se ambos os lados por  $\sigma_y^2(h)$ :

$$1 = \frac{\sigma_y^2(\psi_{0,11}^2 + \psi_{1,11}^2 + \dots + \psi_{h-1,11}^2)}{\sigma_y^2(h)} + \frac{\sigma_z^2(\psi_{0,12}^2 + \psi_{1,12}^2 + \dots + \psi_{h-1,12}^2)}{\sigma_y^2(h)} \quad (59)$$

Segundo Margarido et al. (2007), a decomposição da variância permite verificar, em termos percentuais, qual efeito um choque não antecipado sobre determinada variável tem sobre as demais variáveis do modelo, ou seja, o modelo estimado tem como função prever o comportamento de uma variável específica além de determinar a relação entre as demais variáveis.

### 3.3 MODELO ECONOMETRICO PROPOSTO

A metodologia empregada para o atendimento de cada um dos objetivos específicos é apresentada na Tabela 3:

**Tabela 3** Metodologia empregada

<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Metodologias</b>
Analisar a existência da relação de longo prazo entre as séries temporais de emissão de CO <sub>2</sub> , crescimento econômico e consumo de energia renovável.	Realização de teste de cointegração
Analisar o efeito do consumo de energia renovável na emissão de CO <sub>2</sub> .	Estimação de um modelo VAR/VECM
Analisar o efeito do crescimento econômico na emissão de CO <sub>2</sub> .	Estimação de um modelo VAR/VECM

Fonte: dados compilados pela autora.

Inicialmente, as séries foram transformadas em logaritmos, estratégia apontada por Gujarati e Porter (2011) para interpretar as relações entre as variáveis como elasticidades, obter a taxa de crescimento da variável, para alcançar melhores propriedades de distribuição e para reduzir o problema de heterocedasticidade. Para esta pesquisa, a formação do modelo econométrico é baseada nas construções de Tiwari (2011), Bekhet e Othman (2018) e Shaari, Abidin e Karim (2020). A formação do modelo básico é apresentada na equação (60):

$$\ln CO2_t = \alpha_0 + \beta_1 \ln PIB_{t-i} - \beta_2 \ln CER_{t-i} + \varepsilon_t \quad (60)$$

em que o  $CO_2$  representa as emissões de  $CO_2$ ,  $PIB$  o Produto Interno Bruto como proxy do crescimento econômico,  $CER$  - o consumo de energia renovável,  $t$  - o intervalo de tempo (1990-2018),  $\ln$  - o logaritmo natural,  $\alpha_0$  - o intercepto,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  - são os coeficientes estimados e  $\varepsilon$  é o termo erro.

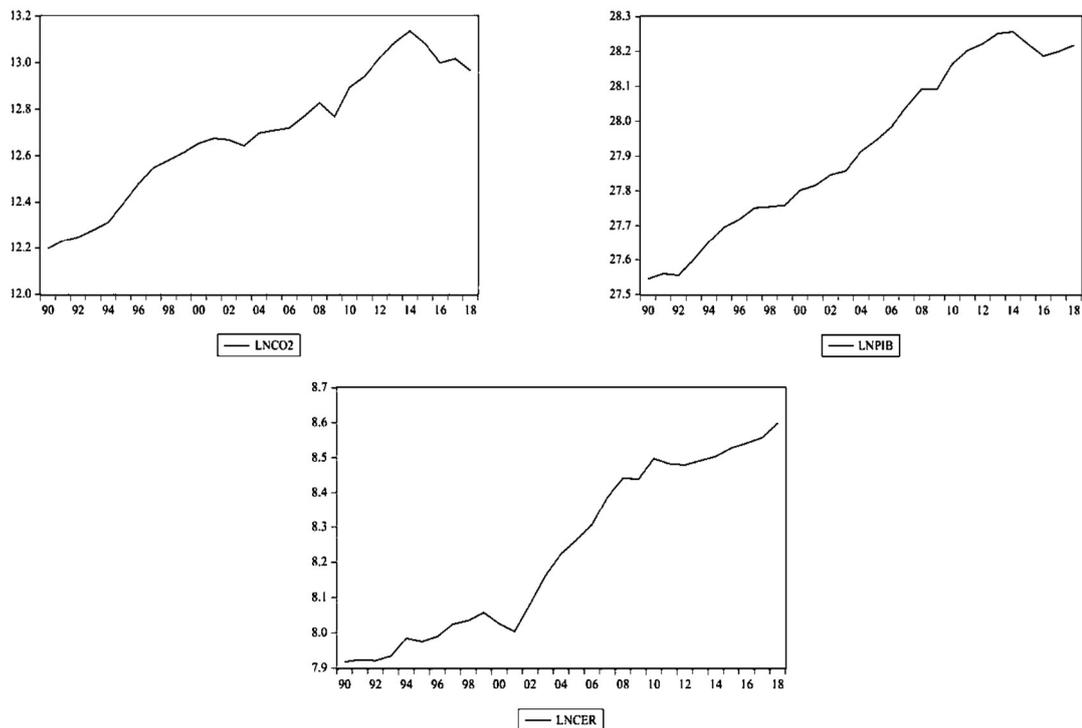
Com base nas conclusões dos trabalhos relacionados no levantamento empírico, apresenta-se o comportamento esperado das variáveis. A equação (60) examina os impactos no PIB, do consumo de energia renovável nas emissões de  $CO_2$ . Neste modelo, espera-se que o consumo de energia renovável contribuía significativamente para diminuir as emissões  $CO_2$ . Em relação ao efeito do PIB nas emissões de  $CO_2$ , espera-se uma relação positiva para o caso do Brasil.

Como estratégia metodológica adotou-se a estimação a partir do modelo VAR para investigar a relação entre o consumo de energia, a emissão de  $CO_2$  e o crescimento econômico. Adicionalmente, será realizada uma série de testes para verificar a confiabilidade do modelo, como testes de diagnóstico (correlação serial, heterocedasticidade e normalidade dos resíduos) e teste de estabilidade do modelo (raízes inversas do polinômio característico AR).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem o objetivo de analisar os efeitos do consumo de energia renovável e do crescimento econômico nas emissões de CO<sub>2</sub>. A Figura 2 mostra o comportamento das séries estudadas, já logaritmizadas, no período de 1990 a 2018.

**Figura 2** Variáveis Emissões de CO<sub>2</sub> lnCO<sub>2</sub>, Produto Interno Bruto lnPIB e Consumo de Energia Renovável lnCER



Fonte: elaboradas pela autora com dados da pesquisa.

Ao examinar o desempenho das séries lnCO<sub>2</sub>, lnPIB e lnCER, a Figura 2 indica a presença de raiz unitária, ou seja, comportamento não estacionário em razão de não apresentarem a média zero e a variância constantes ao longo do tempo e possível tendência estocástica.

Para a série lnCO<sub>2</sub>, é provável uma quebra estrutural no ano de 2008, pois apresenta queda naquele período. Segundo Giambiagi et al. (2016), com a crise financeira internacional de 2008, a economia nacional desaqueceu com destaque para o desempenho negativo do setor industrial, um dos principais emissores de poluentes. Já a série lnPIB indica uma provável quebra estrutural no ano de 2014, pois apresenta uma acentuada queda naquele período. Para

Oreiro (2017), o Brasil passou por uma grande recessão econômica entre os anos de 2014 a 2017, causada pela queda acentuada dos gastos de investimento ao longo do ano 2014. Esta desaceleração da economia brasileira no período pode ser atribuída a múltiplas causas: falhas na condução da política econômica, fatores políticos como a incerteza eleitoral de 2014, fatores internacionais como a queda no preço das *commodities* em 2014 e fatores institucionais como o avanço da operação Lava Jato (ROSSI e MELLO, 2017). Em relação à série lnCER, é notável uma possível quebra estrutural no ano de 2000, pois apresenta uma queda naquele período, reflexo da estiagem, provocada pelo fenômeno El Niño, houve, conseqüentemente, redução dos reservatórios das usinas hidroelétricas o que impactou na queda da produção de energia de hidrelétricas, uma das principais fontes de energia renovável do país (BEN, 2020).

A partir da Figura 2, realizou-se o teste de raiz unitária para verificar a estacionariedade das séries. A Tabela 4 mostra os resultados do teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF).

**Tabela 4** Teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF): em nível e em primeira diferença

Variáveis	Valores Críticos			Estatística t
	1%	5%	10%	
lnCO <sub>2</sub>	-4,323979	-3,580623	-3,225334	-0,856969
lnPIB	-4,374307	-3,603202	-3,238054	-2,403137
lnCER	-4,339330	-3,587527	-3,229230	-2,125475
D1.lnCO <sub>2</sub>	-4,339330	<b>-3,587527</b>	<b>-3,229230</b>	-4,221263
D1.lnPIB	-4,339330	<b>-3,587527</b>	<b>-3,229230</b>	-3,809908
D1.lnCER	-4,339330	<b>-3,587527</b>	<b>-3,229230</b>	-3,703869

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

O teste ADF nos mostra a presença de raiz unitária como hipótese nula, ou seja, não estacionária. O número de defasagens foi escolhido através do critério de Schwarz e o teste foi realizado com constante e tendência. O teste ADF mostrou que todas as variáveis não são estacionárias em nível, I (0), ao nível de significância de 5%, entretanto, apresentam estacionariedade em todas as séries em primeira diferença, I (1), no nível de significância de 5%.

Conforme a Figura 1, as séries lnCO<sub>2</sub>, lnPIB e lnCER apresentaram uma quebra estrutural, respectivamente em 2008, 2014 e 2000. Em virtude disso, foi estimado o teste de raiz unitária, de Dickey-Fuller Aumentado (ADF), com quebra estrutural, pois, conforme Bueno (2012), os testes comuns de raiz unitária podem levar a um viés ao não rejeitarem a

hipótese nula na presença de quebra estrutural. Neste teste, o número de defasagens também foi escolhido através do critério de Schwarz, assim como foi realizado com constante e tendência. Os resultados da estimação do teste de raiz unitária com quebra estrutural constam na Tabela 5.

**Tabela 5** Teste de raiz unitária com quebra estrutural: em nível e em primeira diferença

Variáveis	Valores Críticos			Estatística t	Quebra
	1%	5%	10%		
lnCO <sub>2</sub>	-4,808276	-4,206897	-3,900345	-0,958911	2008
lnPIB	-4,520000	-3,891034	-3,547241	-1,944375	2014
lnCER	-4,803793	-4,209655	-3,933448	-1,905959	2000
D1.lnCO <sub>2</sub>	-4,824286	<b>-4,214286</b>	<b>-3,911429</b>	-4,546309	2008
D1.lnPIB	<b>-4,534286</b>	<b>-3,902857</b>	<b>-3,558571</b>	-5,532210	2014
D1.lnCER	-4,797143	<b>-4,198571</b>	<b>-3,915714</b>	-4,336684	2000

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

O teste de raiz unitária ADF com quebra estrutural mostrou que todas as variáveis não são estacionárias em nível, I (0), no nível de significância de 5%, entretanto, apresentam estacionariedade em todas as séries em primeira diferença, I (1), no nível de significância de 5%, comprovando a existência de quebra estrutural nos períodos analisados.

Os resultados do teste de estacionariedade de ADF e do teste de raiz unitária ADF com quebra estrutural demonstraram que todas as séries são consideradas estacionárias em primeira diferença, ou seja, integradas de ordem I(1).

Após a constatação de séries estacionárias em primeira diferença, fez-se necessária a aplicação do teste de cointegração de Johansen para verificar a existência de cointegração entre as séries. Para tanto, foi realizado o teste de seleção de defasagem para o modelo VAR, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** Teste de seleção de defasagem para o modelo VAR

Defasagens	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	NA	2,19E-07	-6,821095	-6,674829	-6,780527
<b>1</b>	142,4486*	5,14E-10	-12,88436	<b>-12,29930*</b>	-12,72209
2	15,92751	4,52E-10*	-13,04922	-12,02537	-12,76525*
3	11,17203	4,86E-10	-13,07402*	-11,61137	-12,66835
4	5,723925	7,53E-10	-12,83102	-10,92957	-12,30364

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

Notas: LR: Estimador de Máxima Verossimilhança; FPE: Erro de Predição Final; AIC: Akaike; SC: Schwarz; HQ: Hannan-Quinn.

A escolha da defasagem do teste ocorreu através do critério de informação Schwarz (SC). O critério de seleção indicou a adoção de uma defasagem para o teste de cointegração de Johansen. Após a definição do número de defasagens para o modelo, foi realizado o teste LM de autocorrelação, e os resíduos do modelo não indicaram autocorrelação para uma defasagem no nível de significância de 5%, conforme Anexo M.

Em sequência, foi realizado o teste de cointegração de Johansen para verificar a existência de um ou mais vetores de cointegração, o teste foi estimado com presença de intercepto no vetor de cointegração e tendência linear, já que os gráficos mostraram tendência estocástica nas séries. Os resultados do teste de cointegração de Johansen estão expostos na Tabela 7.

**Tabela 7** Teste de cointegração de Johansen

$H_0$	$H_1$	Estatística	Valor crítico 5%	Prob.
<b>Teste do traço</b>				
$r = 0$	$r \geq 0$	30,1662	29,7970	0,0453
$r \leq 1$	$r \geq 1$	<b>8,4340</b>	<b>15,4947</b>	0,4202
<b>Teste do máximo valor</b>				
$r = 0$	$r = 0$	21,7322	21,1316	0,0411
$r \leq 1$	$r = 1$	<b>7,7604</b>	<b>14,2646</b>	0,4036

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

O teste do máximo autovalor e o teste do traço indicaram a presença de um vetor de cointegração no nível de 5% de significância, ou seja, as séries apresentam relação de longo prazo entre si. Desse modo, o modelo mais adequado para a estimação é o VECM, visto que as séries são estacionárias de ordem I (1) e são cointegradas.

#### 4.1 ESTIMAÇÃO E RESULTADOS DO MODELO VETOR DE CORREÇÃO DE ERROS (VECM)

O teste de cointegração de Johansen indicou que as séries apresentam relação de longo prazo entre si, desse modo, foi estimado o Modelo Vetor de Correção de Erros (VECM). A especificação utilizada na estimação obedeceu a seguinte ordem:  $\ln CO_2$ ,  $\ln PIB$  e  $\ln CER$ . O modelo foi estimado com uma defasagem, com intercepto e tendência linear, um vetor cointegrante e sem restrições.

Como as séries estão logaritmizadas, as análises da estimação do resultado dos parâmetros são interpretadas como elasticidade. Os valores em colchetes são os resultados da estatística  $t$  do modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** Estimação de curto e longo prazo do modelo VECM

Variáveis	Curto Prazo	Longo Prazo
lnCO <sub>2</sub>	-0,529915 -0,233630 [-2.26816]	1,000000
lnPIB	-0,065858 -0,131060 [-0.50252]	-2,398264 -0,162400 [-14.7677]
lnCER	-0,291037 -0,144680 [-2.01159]	1,324773 -0,162440 [8.15540]
C		43,377040

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

O primeiro objetivo específico deste trabalho foi analisar a existência da relação de longo prazo entre as séries temporais de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de energia renovável e crescimento econômico. Para tanto, a análise dos resultados da estimação foi realizada através da estatística *t* de *Student* e, para o presente modelo, o valor crítico para que a hipótese nula seja rejeitada é de 1,706 com nível de significância de 5%, a região de não rejeição da hipótese nula compreende o intervalo em -1,706 e 1,706, a aceitação da existência de relação explicativa entre as variáveis está condicionada à rejeição da hipótese nula. Os parâmetros do modelo de longo prazo normalizado para o VECM foram estatisticamente significativos a 5%, visto que a hipótese nula do teste *t* foi rejeitada, em razão de o resultado do teste se situar na região crítica. Dessa forma, pode-se inferir que oscilações no desempenho do crescimento econômico e do consumo de energia renovável impactam no comportamento das emissões de CO<sub>2</sub>.

O ajuste das variações de curto prazo para atingir o equilíbrio de longo prazo se dá pelo coeficiente  $\alpha$  -0,5299, logo, 52,99% dos desequilíbrios de curto prazo são corrigidos no período de um ano, dessa forma, são necessários dois anos para corrigir totalmente os desequilíbrios de curto prazo. A Equação (61) apresenta o resultado da estimação do modelo de longo prazo normalizado, com a inversão do sinal e em logaritmo:

$$\ln CO_2 = -43,37 + 2,39 \ln PIB - 1,32 \ln CER \quad (61)$$

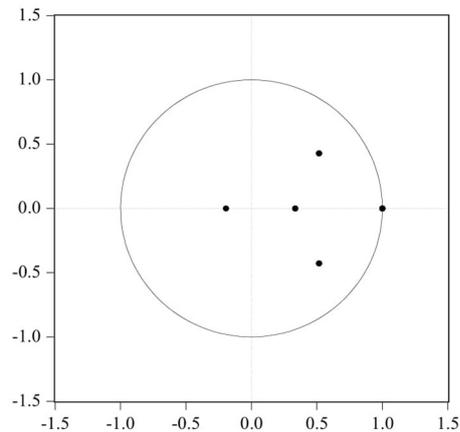
De acordo com Margarido (2004), a análise das estimativas dos coeficientes deve ser conduzida com o sinal invertido, visto que todas as variáveis permanecem do mesmo lado na equação de cointegração normalizada. As variáveis presentes na equação exibiram o resultado esperado conforme a literatura discutida neste estudo e a visualização do desempenho das séries permite a análise do efeito do consumo de energia renovável e do crescimento econômico nas emissões de CO<sub>2</sub>, ambos objetivos específicos do presente estudo.

Alterações no PIB provocaram um efeito diretamente proporcional nas emissões de CO<sub>2</sub>, como é esperado em países em desenvolvimento como o Brasil. Um aumento no PIB provoca o mesmo movimento nas emissões de CO<sub>2</sub>, assim como demonstrado nos estudos de Neves, Marques e Patrício (2020); Ridzuan et al. (2020) e Mbarek, Saidi e Feki (2018) em que o crescimento econômico aumenta as emissões de CO<sub>2</sub>. Enquanto isso, as alterações no consumo de energia renovável provocaram um efeito inversamente proporcional nas emissões de CO<sub>2</sub>, um aumento no consumo de energia renovável induz uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, assim como demonstrado nos estudos de Salari, Javid e Noghanibehambari (2021); Kang, Islam e Tiwari (2019) e Bekhet e Othman (2018) em que o aumento no consumo de energia renovável impactou na diminuição do nível de emissões de CO<sub>2</sub>. Um possível efeito da crescente preocupação com a qualidade ambiental é a valorização de investimentos com o ESG como critério de avaliação e conseqüentemente diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Após a estimação a partir do modelo VECM, foi executada uma série de testes para verificar a confiabilidade do modelo, como testes de diagnóstico (correlação serial, heterocedasticidade e normalidade dos resíduos) e teste de estabilidade do modelo (raízes inversas do polinômio característico AR). Em relação à autocorrelação, é possível dizer que ela não foi encontrada no modelo, não foi rejeitada a hipótese nula do teste de autocorrelação, conforme demonstrado no Anexo O; sendo assim, o modelo não é correlacionado.

Da mesma forma ocorreu com o teste de heterocedasticidade, não foi rejeitada a hipótese nula do teste de heterocedasticidade, de acordo com o Anexo P, sendo assim, o modelo é homocedástico. Sobre a normalidade dos resíduos, a partir da análise do resultado do teste de Jarque-Bera, não foi rejeitada a hipótese nula do teste de normalidade dos resíduos conforme Anexo Q; sendo assim, o modelo apresenta distribuição normal dos resíduos. Ademais, foi realizada a análise visual dos resíduos das variáveis, de acordo com o Anexo R, os resíduos não apresentam tendência, indicando que não estão correlacionados.

**Figura 3** Raízes inversas do polinômio característico AR – VECM



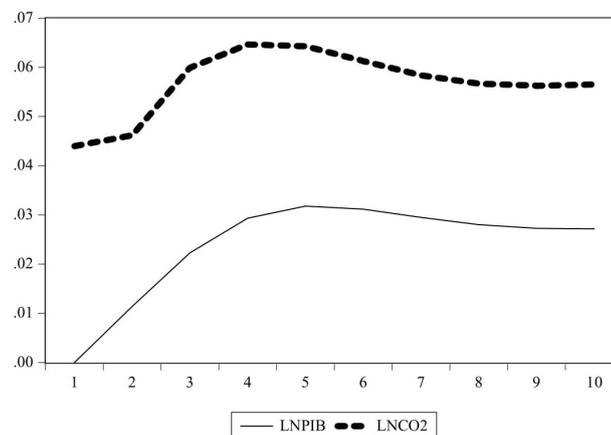
Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

Por último, foi realizado o teste de estabilidade do modelo e os resultados exibiram as raízes menores ou iguais a um, sendo o modelo classificado como estável, conforme demonstrado na Figura 3. A partir dos resultados verificados nos testes de diagnóstico e de estabilidade do modelo, é possível afirmar que o modelo de regressão exibe estimadores eficientes e não-viesados, apresentando, assim, resultados não espúrios.

#### 4.2 RESULTADO DA FUNÇÃO RESPOSTA AO IMPULSO

Através da função resposta ao impulso, é possível verificar como cada variável responde diante de um choque advindo de outra variável em um período. A Figura 4 mostra a reação da variável  $\ln\text{CO}_2$  diante de um choque na variável  $\ln\text{PIB}$ .

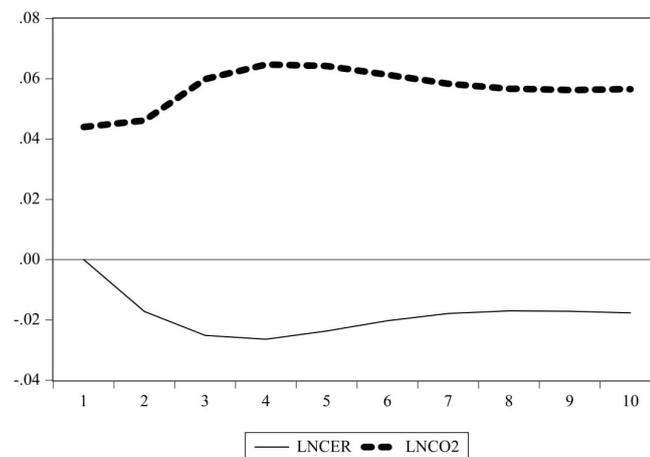
**Figura 4** Função de resposta da variável  $\ln\text{CO}_2$  ao impulso da variável  $\ln\text{PIB}$



Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

Um choque positivo na variável  $\ln\text{PIB}$  provoca um deslocamento positivo na trajetória da variável  $\ln\text{CO}_2$ , apresentando uma relação diretamente proporcional e o efeito do choque é prolongado. É notável o aumento nas emissões de  $\text{CO}_2$  quando acontece o choque positivo no crescimento econômico e este impacto é considerável, apesar da reação não demorar muito para acontecer, a variável  $\ln\text{CO}_2$  mantém uma estabilidade no seu valor assumido após o choque, distante de seu valor anterior ao choque na variável  $\ln\text{PIB}$ . A Figura 5 mostra a reação da variável  $\ln\text{CO}_2$  diante de um choque na variável  $\ln\text{CER}$ .

**Figura 5** Função de resposta da variável  $\ln\text{CO}_2$  ao impulso da variável  $\ln\text{CER}$



Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

Um choque negativo na variável  $\ln\text{CER}$  provoca um deslocamento positivo na trajetória da variável  $\ln\text{CO}_2$ , evidenciando uma relação inversamente proporcional, e o efeito do choque é prolongado. Assim, é notável um aumento acentuado nas emissões de  $\text{CO}_2$  quando acontece uma diminuição no consumo de energia renovável. Em busca da redução nas emissões de  $\text{CO}_2$ , o uso de energias renováveis apresenta-se como alternativa, em detrimento das energias originárias de combustíveis fósseis.

Pode-se inferir que o consumo de energia renovável favorece à manutenção da qualidade ambiental pela redução nas emissões de  $\text{CO}_2$ , enquanto o crescimento econômico eleva a degradação do meio ambiente pelo aumento nas emissões de  $\text{CO}_2$ . Esses resultados estão de acordo com a literatura empírica, por exemplo, nos estudos de Ridzuan et al. (2020), Kang, Islam e Tiwari (2019) e Bekhet e Othman (2018), os quais enfatizam que o crescimento econômico está ligado ao aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  e exige maior demanda de energia. Logo, a energia renovável tem um efeito negativo significativo nas emissões de  $\text{CO}_2$ , dessa forma, a energia renovável é um dos elementos importantes a serem considerados para

melhorar a qualidade ambiental em conjunto com a manutenção do crescimento econômico. Em um estudo recente, El-Karimi (2021) chegou à uma conclusão semelhante para o caso da Alemanha, a redução no uso de fontes não renováveis de energia não prejudicaria significativamente o PIB, e o estímulo às energias renováveis seria benéfico para o crescimento econômico.

### 4.3 RESULTADO DA DECOMPOSIÇÃO DA VARIÂNCIA

A análise da decomposição da variância, por meio da decomposição de *Cholesky*, correspondeu a um período de 10 anos e consistiu em avaliar os determinantes da variável  $\ln\text{CO}_2$ , conforme Tabela 9.

**Tabela 9** Decomposição da variância da variável  $\ln\text{CO}_2$

Períodos	Desvio Padrão	$\ln\text{CO}_2$	$\ln\text{PIB}$	$\ln\text{CER}$
1	0,0440	100,0000	0,0000	0,0000
2	0,0670	90,5425	2,8798	6,5778
3	0,0960	83,1260	6,8083	10,0657
4	0,1223	79,1694	9,9568	10,8738
5	0,1437	77,3107	12,0995	10,5899
6	0,1606	76,4676	13,4611	10,0714
7	0,1743	76,1089	14,2881	9,6030
8	0,1862	75,9622	14,7867	9,2511
9	0,1971	75,8895	15,1017	9,0088
10	0,2076	<b>75,8284</b>	<b>15,3238</b>	<b>8,8478</b>

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

No primeiro período, verificou-se que a variável  $\ln\text{CO}_2$  foi influenciada por ela mesma em 100% e, no decorrer dos anos, começa a receber a influência do  $\ln\text{PIB}$  e do  $\ln\text{CER}$ . Os resultados indicam que, após um período de 10 anos, 75,82% das emissões de  $\text{CO}_2$  são explicadas por seu choque inovador, enquanto as parcelas de 15,32% e 8,85% do crescimento econômico e consumo de energia renovável explicam as emissões de  $\text{CO}_2$ , respectivamente. Os resultados da decomposição mantiveram-se na mesma proporção dos resultados encontrados na análise da função resposta ao impulso apresentados nas Figuras 4 e 5 estão de encontro com a estimação de Bekhet e Othman (2018) em que o crescimento econômico e o consumo de energia renovável exercem influência semelhante sobre as emissões de  $\text{CO}_2$  para o caso da Malásia.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a relação entre o consumo de energia e o crescimento econômico represente um tópico bem documentado na literatura, o estudo destas variáveis juntamente com as emissões de CO<sub>2</sub> apresenta-se como tendência mais recente. Isso pode ser parcialmente explicado devido à crescente preocupação com os efeitos do crescimento econômico na degradação ambiental. Deste modo, pretendeu-se, por meio das evidências empíricas obtidas, inferir se o crescimento econômico induz a um maior nível de emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto o consumo de energia renovável tende a diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a qualidade ambiental.

A relevância da investigação parte de uma abordagem de crescimento sustentável seguindo um movimento que leva o crescimento econômico em consideração com os três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e governança, do termo em inglês *Environmental, Social and Governance* (ESG), uma adoção de conduta empresarial benéfica ao meio ambiente, às instituições e à sociedade. A cobrança por parte dos consumidores para que grandes empresas adotem práticas de ESG contribui de maneira indireta para a diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub>.

A literatura empírica essencialmente focada na interação entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico no Brasil é relativamente escassa. Diante disso, este estudo teve como objetivo principal verificar a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico para o Brasil durante o período de 1990 a 2018 a partir da realização de testes econométricos e da estimação do Modelo Vetor de Correção de Erros (VECM) para determinar as interações dinâmicas entre as séries. Além disso, pretendeu-se estimar o impacto do consumo de energia renovável e do crescimento econômico nas emissões de dióxido de carbono.

Metodologicamente, foi verificada a estacionariedade das séries e a cointegração entre as variáveis, a estimação de um modelo VECM e a verificação de sua confiabilidade a partir de testes de diagnóstico e estabilidade. Por fim, foi realizada a análise da função resposta ao impulso e da decomposição da variância.

Em cumprimento aos objetivos do presente estudo, a estimação dos coeficientes angulares demonstrou uma relação estatisticamente significativa a 5%, logo, com 95% de probabilidade de ser verdadeira, entre as séries  $\ln\text{CO}_2$ ,  $\ln\text{PIB}$  e  $\ln\text{CER}$ , cumprindo o objetivo geral de analisar a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia renovável e o crescimento econômico para o Brasil. Os resultados indicaram uma relação de longo prazo

entre as séries temporais de emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de energia renovável e crescimento econômico.

Ademais, foi observado que o crescimento econômico provoca um efeito diretamente proporcional nas emissões de CO<sub>2</sub>, como é esperado em países em desenvolvimento como o Brasil, ou seja, quanto maior o crescimento econômico, maiores os níveis das emissões de CO<sub>2</sub>. O crescimento econômico tende a elevar o consumo de combustíveis fósseis, um dos determinantes de impactos ambientais negativos, como as emissões de CO<sub>2</sub>, entretanto, os impactos ambientais que acompanham o crescimento econômico são vistos como efeitos passíveis de controle e podem ser contornados com o investimento em novas tecnologias que reduzem as emissões de poluentes, entre elas a substituição gradual da extração de combustíveis fósseis por fontes renováveis.

Em movimento contrário, o consumo de energia renovável impacta significativa e negativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, ou seja, um aumento do consumo de energia renovável é capaz de diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>. Conforme demonstrado no estudo, a introdução de novas fontes de energia para diversificar a matriz energética nos países em diferentes estágios de desenvolvimento promove uma diminuição na emissão de poluentes. Os investimentos em energia renovável e a estipulação de metas de participação desta fonte na matriz energética, aliados à conscientização do uso sustentável dos recursos naturais nos diversos setores da economia, contribuem para o controle das externalidades negativas causadas pelo crescimento econômico, bem como colaboram com o desenvolvimento sustentável.

Os resultados apresentaram-se conforme esperado na literatura discutida neste estudo e responderam ao problema de pesquisa. O progresso no crescimento de países menos desenvolvidos favorece o aumento na quantidade de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera, todavia, esta situação desfavorável ao meio ambiente pode ser contornada com investimentos em novas tecnologias que reduzem as emissões de poluentes, entre elas a substituição gradual da extração de combustíveis fósseis por fontes renováveis.

Finalmente, este estudo fornece uma perspectiva das emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de energia renovável e crescimento econômico para o Brasil no contexto atual. Portanto, uma mudança gradual na fonte de energia, ou seja, de não renovável para renovável, é aconselhável. Os formuladores de políticas públicas podem usar vários instrumentos, como incentivos fiscais, para encorajar uma maior participação das fontes de energia renováveis, visando a um crescimento econômico sustentável.

Vale destacar a limitação desta pesquisa, em relação à disponibilidade de dados, não foram encontradas informações sobre o consumo de energia renovável para período anteriores

ao estudado. Para trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão do consumo de energia não renovável na interação entre as séries, de forma a compreender e analisar estatisticamente o impacto desta variável.

## REFERÊNCIAS

- AMARANTE, J. C. A. et al. A relação entre crescimento econômico, consumo de energias renovável e não renovável e emissões de CO<sub>2</sub>: evidências empíricas para o Brasil. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2021.
- ARROW, K. et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. **Ecological Economics**, v. 268, p. 520–521, 1995.
- BALOGH, J. M.; JÁMBOR, A. Determinants of CO<sub>2</sub> emission: a global evidence. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 7, p. 217-226, 2017.
- BECKERMAN, W. Economic growth and the Environment: whose growth? whose environment? **World Development**, v. 20, n. 4, p. 481-496, 1992.
- BEKHET, H. A.; OTHMAN, N. S. The role of renewable energy to validate dynamic interaction between CO<sub>2</sub> emissions and GDP toward sustainable development in Malaysia. **Energy Economics**, v. 72, p. 47–61, 2018.
- BEN JEBLI, M.; FARHANI, S.; GUESMI, K. Renewable energy, CO<sub>2</sub> emissions and value added: Empirical evidence from countries with different income levels. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 53 p. 402–410, 2020.
- BEN SALHA, O.; SEBRI, M. A multivariate analysis of the causal flow between renewable energy consumption and GDP in Tunisia. **Munich Personal RePEc Archive**, Paper n. 52572, 2014.
- BRAMMER, S.; BROOKS, C.; PAVELIN, S. Corporate social performance and stock returns: UK evidence from disaggregate measures. **Financial Management**, p. 97 – 116, 2006.
- BRESSER-PEREIRA, L. C. **Conceito histórico de desenvolvimento econômico**. Trabalho originalmente preparado para curso de desenvolvimento econômico na Fundação Getúlio Vargas. Versão de 2 de março de 2006.
- BRESSER-PEREIRA, L. C. **Desenvolvimento, progresso e crescimento econômico**. Lua Nova, São Paulo, v. 93, p. 33-60, 2014.
- BUENO, R. DE L. DA S. **Econometria de séries temporais**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- CHENG, B. S. Causality Between energy consumption and economic growth in India: an application of cointegration and error-correction modeling. **Indian Economic Review**, v. 34, p. 39-49, 1999.
- CORNELL, B. ESG preferences, risk and return. **Eur. Financial Management**, p. 1-8, 2020.
- DALY, H. E. Toward some operational principles of sustainable development. **Ecological Economics**, v. 2 p. 1-6, 1990.

DASGUPTA, S. et al. Confronting the environmental Kuznets curve. **Journal of Economic Perspectives**, v. 16, n. 1, p. 147–168, 2002.

DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 4, n. 2, p. 157–175, 2000.

DINDA, S. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. **Ecological Economics**, v. 49, n. 4, p. 431–455, 2004.

DONG, K., et al. CO<sub>2</sub> emissions, economic and population growth, and renewable energy: Empirical evidence across regions. **Energy Economics**, v. 75, p. 180-192, 2018.

DONG, K.; DONG X.; DONG, C. Determinants of the global and regional CO<sub>2</sub> emissions: What causes what and where? **Applied Economics**, p. 1-14, 2019.

DONG, K.; DONG X.; JIANG, Q. How renewable energy consumption lower global CO<sub>2</sub> emissions? Evidence from countries with different income levels. **The World Economy**, v. 43, p. 1665–1698, 2020.

DORFLEITNER, G.; HALBRITTER, G.; NGUYEN, M. Measuring the level and risk of corporate responsibility – An empirical comparison of different ESG rating approaches. **Journal of Asset Management**, v. 16, n. 7, p. 450–466, 2015.

EL-KARIMI, M. Investigating the causal linkage among economic growth and renewable and non-renewable energy consumption: cases of Germany, the UK and France. **OPEC Energy Review**, v. 45, p. 414-437, 2021.

ELSEVIER. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br>. Acessado em 08/06/2021. ELSEVIER, 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Atlas da eficiência energética Brasil 2019**. Disponível em: [www. https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes](http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes). Acessado em 16/06/2021. EPE, 2020.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, 106p, jan./jun., 2011.

FERREIRA NETO, A. M.; CORRÊA, W. L. R.; PEROBELLI, F. S. Consumo de energia e crescimento econômico: uma análise do Brasil no período 1970-2009. **Análise Econômica**, Porto Alegre, ano 34, n. 65, p. 181-204, 2016.

FURTADO, C. **Teoria e política do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1967.

GARCIA, A. S.; MENDES-DA-SILVA, W.; ORSATO, R. J. **Corporate sustainability, capital markets, and ESG performance**. Individual Behaviors and Technologies for Financial Innovations, p. 287–309, 2018.

- GILL, A. R.; VISWANATHANA, K. K.; HASSANB, S. The Environmental Kuznets curve (EKC) and the environmental problem of the day. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1636-1642, 2017.
- GIAMBIAGI, F. et al. **Economia brasileira contemporânea**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n.72, p. 6-15, dez./fev., 2006-2007.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**. v. 21, 2007.
- GROSSMAN, G; KRUEGER. A. Environmental impacts of a north american free trade agreement. **National Bureau of Economic Research**, Working Paper, n. 3914, 1991.
- GROSSMAN, G; KRUEGER. A. Economic growth and the environment. **Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. 2ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2020.
- International Energy Agency. **World Energy Balances**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>. Acessado em: 18/11/2021. IEA, 2021.
- WORLD BANK. **Sovereign ESG Data Framework**. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/esg/framework.html>. Acessado em: 18/11/2021. WORLD BANK, 2021.
- ITO, K. CO<sub>2</sub> emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries. **International Economics**, v. 151, p. 1–6, 2017.
- JORGENSON, D. W., WILCOXEN, P. J. Energy the environment, and economic growth. In: **Handbook of Natural Resource and Energy Economics**, v. 3, p. 1267-1349, 1993.
- KANG, S. H.; ISLAM, F.; TIWARI, A. K. The dynamic relationships among CO<sub>2</sub> emissions, renewable and non-renewable energy sources, and economic growth in India: evidence from time-varying Bayesian VAR model. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 50 p. 90–101, 2019.
- KAYA, Y.; YOKOBURI, K. **Environment, energy, and economy: strategies for sustainability**. Tokyo: United Nations University Press, 1997.
- KAYGUSUZ, K. Energy for sustainable development: a case of developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 1116–1126, 2012.

- KHAN, M. I.; REHAN, M. The relationship between energy consumption, economic growth and carbon dioxide emissions in Pakistan. **Financial Innovation**, v. 6, p.1-13, 2020.
- KOTRONI, E.; KAIKA, D.; ZERVAS, E. Environmental Kuznets curve in Greece in the period of 1960-2014. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 10, p. 364-370, 2020.
- KRAFT, J.; KRAFT, A. On the relationship between energy and GNP. **Journal of Energy and Development**, v. 3, n. 2, p. 401–403, 1978.
- KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **The American Economic Review**, v. 45, n. 1 p. 1-28, 1955.
- LAGO, L. A. C. do. A retomada do crescimento e as distorções do “milagre”: 1967-1973. In: ABREU, M. de P. (Org.), **A ordem do progresso: cem anos de política econômica republicana, 1889/1989**. Rio de Janeiro: Campus, 1990. p. 233-294.
- LEE, J. W. The contribution of foreign direct investment to clean energy use, carbon emissions and economic growth. **Energy Policy**, v. 55, p. 483–489, 2013.
- LIMKRIANGKRAI, M.; KOH, S.; DURAND, R. B. Environmental, Social, and Governance (ESG) profiles, stock returns, and financial policy: Australian evidence. **International Review of Finance**, 2016.
- LUCAS, R. E. **Understanding Business Cycles**. Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy, v.5, p. 7-29, 1977.
- LUCAS, R. E. On the mechanics of economic development. **Journal of Monetary Economics**, v. 22, p. 3–42, 1988.
- LÜTKEPOHL, H. **New introduction to multiple time series analysis**. Berlin: Springer, 2005.
- MADDISON A. **Monitoring the world economy 1820-1992**. Paris: OECD, 1995.
- MAGAZZINO, C. Energy consumption and GDP in Italy: cointegration and causality analysis. **Environment, Development and Sustainability**, v. 17, p. 137-153, 2014.
- MAHMOODI, M. The relationship between economic growth, renewable energy, and CO<sub>2</sub> emissions: evidence from panel data approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 7, p. 96-102, 2017.
- MAJEED, M., T.; LUNI, T. Renewable energy, circular economy indicators and environmental quality: a global evidence of 131 countries with heterogeneous income groups. **Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences**, v. 14, p. 866-912, 2020.
- MARGARIDO, M. A. **Teste de co-integração de Johansen utilizando o SAS**. Agricultura São Paulo, São Paulo, v. 51, n. 1, p. 87-101, jan./jun., 2004.

MARGARIDO, M. A. et al. Análise dos Efeitos Preço e Câmbio sobre os Preços da Farinha de Trigo na Cidade de São Paulo: uma aplicação de modelos de séries de tempo. **Pesquisa e Debate**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 251-281, 2007.

MBAREK, M. B.; SAIDI, K.; FEKI, R. How effective are renewable energy in addition of economic growth and curbing CO<sub>2</sub> emissions in the long run? A panel data analysis for four Mediterranean countries. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 9, p. 754–766, 2016.

MEINSHAUSEN, M. et al. Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling. **Geoscientific Model Development**, v. 10, p. 2057–2116, 2017.

MIRALLES-QUIRÓS, M. M.; MIRALLES-QUIRÓS, J. L.; GONÇALVES, L. M. N. The value relevance of environmental, social, and governance performance: the Brazilian case. **Sustainability**, v. 10, n. 574, p. 1-15, 2018.

NEVES, S. A.; MARQUES, A. C.; PATRÍCIO, M. Determinants of CO<sub>2</sub> emissions in European Union countries: Does environmental regulation reduce environmental pollution? **Economic Analysis and Policy**, v. 68, p. 114–125, 2020.

NG, C. et al. The impact of electricity production from renewable and non-renewable sources on CO<sub>2</sub> emissions: evidence from OECD countries. **International Journal of Business and Society**, v. 20, n. 1, p. 365-382, 2019.

NJOKE, M. L.; WU, Z.; TAMBA, J. G. Empirical analysis of electricity consumption, CO<sub>2</sub> emissions and economic growth: evidence from Cameroon. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, p. 63-73, 2019.

OREIRO, J. L. A grande recessão brasileira: diagnóstico e uma agenda de política econômica. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p.75–88, 2017.

ÖZOKCU, S.; ÖZDEMIRB, O. Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 639–647, 2017.

OZTURK, I. A literature survey on energy-growth nexus. **Energy Policy**, v. 38, p. 340-349, 2010.

PANAYOTOU, T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. Geneva: International Labour Office, Technology and Employment Programme, 1993.

PARAMATI, S.R.; MO, D.; GUPTA, R. The effects of stock market growth and renewable energy use on CO<sub>2</sub> emissions: Evidence from G20 countries. **Energy Economics**, v. 66, p. 60-371, 2017.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.

RADMEHR, R.; HENNEBERRY, S. R.; SHAYANMEHR, S. Renewable energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, and economic growth nexus: a simultaneity spatial modeling

analysis of EU countries. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 57, p.13-27, 2021.

RAFINDADI, A. A., OZTURK, I. Impacts of renewable energy consumption on the German economic growth: evidence from combined cointegration test. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1130–1141, 2017.

REHMAN, R. U. et al. The integration of conventional equity indices with environmental, social, and governance indices: evidence from emerging economies. **Sustainability**, v. 13, n. 676, p. 1-27, 2021.

RIDZUAN, N. H. A. et al. Effects of agriculture, renewable energy, and economic growth on carbon dioxide emissions: Evidence of the environmental Kuznets curve. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 160, 2020.

ROMER, P. M. Increasing returns and long-run growth. **Journal of Political Economy**, v. 94, n. 5, p. 1002-1037, 1986

SALARI, M.; JAVID, R. J.; NOGHANIBEHAMBARI, H. The nexus between CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in the U.S. **Economic Analysis and Policy**, v. 69, p. 182–194, 2021.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. São Paulo: Abril Cultural, 1982.

SEBRI, M.; BEN SALHA, O. On the causal dynamics between economic growth, renewable energy consumption, CO2 emissions and trade openness: Fresh evidence from BRICS countries. MPRA, **Working Paper**, n. 52535, 2013.

SEEG. [Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa]. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. Disponível em: [www.seeg.eco.br/documentos-analiticos](http://www.seeg.eco.br/documentos-analiticos). Acessado em 16/06/2021. SEEG, 2020.

SELDEN, T. M.; SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 27, p. 147–162. 1994.

SHAARI, M. S.; ABIDIN, N. Z.; KARIM, Z. A. The impact of renewable energy consumption and economic growth on CO<sub>2</sub> emissions: new evidence using panel ARDL study of selected countries. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 10, n. 6, p. 617-623, 2020.

SHAFIK, N. Economic development and environmental quality: an econometric analysis. **Oxford Economic Papers**, v. 46, p. 757 – 773, 1994.

SHAHBAZ, M.; SINHA, A. Environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> emissions: a literature survey. **Journal of Economic Studies**, v. 46, p. 106-168, 2018.

- SHAHBAZ, M.; ZESHAN, M.; AFZA, T. Is energy consumption effective to spur economic growth in Pakistan? New evidence from bounds test to level relationships and Granger causality tests. **Economic Modelling**, v. 29, p. 2310-2319, 2012.
- SIMS, C. A. Macroeconomics and reality. **Econometrica**, v. 48, p. 1-48, 1980.
- SMULDERS, J. A.; BRETSCHEGER, L. Explaining environmental Kuznets curves: how pollution induces policy and new technologies. Tilburg University, v. 95, 2000.
- SOLOW, R. M. A contribution to the theory of economic growth. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 70, n. 1, p. 65-94, 1956.
- STERN, N. The Determinants of Growth. **The Economic Journal**, v. 101, n. 404, p. 122-133, 1991.
- STERN, D. I. The rise and fall of the environmental Kuznets curve. **World Development**, v. 32, n. 8, p. 1419–1439, 2004.
- TAQUES, F. H.; MAZZUTTI, C. C. de T. P. de C. Qual a relação entre desigualdade de renda e nível de renda *per capita*? testando a hipótese de Kuznets para as unidades federativas brasileiras. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 35, 2010.
- TIWARI, A. K. A structural VAR analysis of renewable energy consumption, real GDP and CO2 emissions: evidence from India. **Economics Bulletin**, v. 31, n.2, p. 1793–1806, 2011.
- TUCKER, M. Carbon dioxide emissions and global GDP. **Ecological Economics**, v. 15, p. 215-223, 1995.
- VICHI, F. M.; MELLO, L. F. A questão energética no Brasil. In: HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. 3ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- WANG, Z.; SARKIS, J. Corporate social responsibility governance, outcomes, and financial performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 1607-1616, 2017.
- WCED. Our common future. **World Commission on Environment and Development**. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- WORLD BANK. **Sovereign ESG data framework**. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/esg/framework.html>. Acessado em: 18/11/2021. WORLD BANK, 2021.
- YANG, H-Y. A note on the causal relationship between energy and GDP in Taiwan. **Energy Economics**, v. 22, p. 309-317, 2000.
- YU, E. S. H; HWANG, B-K. The relationship between energy and GNP. **Energy Economics**, 1984.
- ZAGHDOUDI, T. Oil prices, renewable energy, CO<sub>2</sub> emissions and economic growth in OECD countries. **Economics Bulletin**, v. 37, n. 3, p. 1844-1850, 2017.

ZANDI, G.; HASEEB, M. The role of trade liberalization in carbon dioxide emission: evidence from heterogeneous panel estimations. **International Journal of Financial Research**, v. 10, n. 5, p. 228-240, 2019.

**ANEXOS**

### ANEXO A – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: LNCO2 has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.856969	0.9473
Test critical values:           1% level	-4.323.979	
5% level	-3.580.623	
10% level	-3.225.334	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable:

D(LNCO2)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:21

Sample (adjusted): 1991 2018

Included observations: 28 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNCO2(-1)	-0.123180	0.143740	-0.856969	0.3996
C	1.557.240	1.754.788	0.887424	0.3833
@TREND("1990")	0.002262	0.004862	0.465294	0.6457
R-squared	0.120766	Mean dependent var		0.027460
Adjusted R-squared	0.050427	S.D. dependent var		0.047985
S.E. of regression	0.046760	Akaike info criterion		-3.186.630
Sum squared resid	0.054662	Schwarz criterion		-3.043.894
Log likelihood	4.761.282	Hannan-Quinn criter.		-3.142.994
F-statistic	1.716.922	Durbin-Watson stat		1.582.037
Prob(F-statistic)	0.200127			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO B – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: LNPIB has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 3 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-2.403.137	0.3691
Test critical values:           1% level	-4.374.307	
5% level	-3.603.202	
10% level	-3.238.054	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNPIB)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:25

Sample (adjusted): 1994 2018

Included observations: 25 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNPIB(-1)	-0.481769	0.200475	-2.403.137	0.0266
D(LNPIB(-1))	0.568594	0.239807	2.371.051	0.0285
D(LNPIB(-2))	0.356966	0.249244	1.432.192	0.1683
D(LNPIB(-3))	0.448221	0.248268	1.805.394	0.0869
C	1.323.918	5.496.659	2.408.586	0.0263
@TREND("1990")	0.013776	0.006142	2.242.704	0.0370
R-squared	0.374787	Mean dependent var		0.024680
Adjusted R-squared	0.210257	S.D. dependent var		0.026273
S.E. of regression	0.023348	Akaike info criterion		-4.471.059
Sum squared resid	0.010357	Schwarz criterion		-4.178.529
Log likelihood	6.188.824	Hannan-Quinn criter.		-4.389.924
F-statistic	2.277.930	Durbin-Watson stat		2.243.466
Prob(F-statistic)	0.088031			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO C – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: LNCER has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-2.125.475	0.5094
Test critical values:		
1% level	-4.339.330	
5% level	-3.587.527	
10% level	-3.229.230	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNCER)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:27

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNCER(-1)	-0.222608	0.104733	-2.125.475	0.0445
D(LNCER(-1))	0.364075	0.188152	1.935.008	0.0654
C	1.750.021	0.816131	2.144.288	0.0428
@TREND("1990")	0.006587	0.003092	2.130.172	0.0441
R-squared	0.230423	Mean dependent var		0.024978
Adjusted R-squared	0.130043	S.D. dependent var		0.031251
S.E. of regression	0.029148	Akaike info criterion		-4.096.903
Sum squared resid	0.019541	Schwarz criterion		-3.904.927
Log likelihood	5.930.819	Hannan-Quinn criter.		-4.039.819
F-statistic	2.295.514	Durbin-Watson stat		2.040.048
Prob(F-statistic)	0.104545			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO D – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: D(LNCO2) has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.221.263	0.0130
Test critical values:                   1% level	-4.339.330	
5% level	-3.587.527	
10% level	-3.229.230	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNCO2,2)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:25

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNCO2(-1))	-0.879448	0.208338	-4.221.263	0.0003
C	0.050320	0.022608	2.225.776	0.0357
@TREND("1990")	-0.001785	0.001217	-1.466.810	0.1554
R-squared	0.429685	Mean dependent var		-0.003139
Adjusted R-squared	0.382158	S.D. dependent var		0.060984
S.E. of regression	0.047935	Akaike info criterion		-3.133.482
Sum squared resid	0.055147	Schwarz criterion		-2.989.500
Log likelihood	4.530.201	Hannan-Quinn criter.		-3.090.669
F-statistic	9.040.995	Durbin-Watson stat		1.980.479
Prob(F-statistic)	0.001184			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO E – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: D(LNPIB) has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.809.908	0.0316
Test critical values:		
1% level	-4.339.330	
5% level	-3.587.527	
10% level	-3.229.230	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNPIB,2)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:26

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNPIB(-1))	-0.741715	0.194680	-3.809.908	0.0009
C	0.028602	0.012668	2.257.793	0.0333
@TREND("1990")	-0.000700	0.000644	-1.087.843	0.2875
R-squared	0.377585	Mean dependent var		9.90E-05
Adjusted R-squared	0.325717	S.D. dependent var		0.030860
S.E. of regression	0.025340	Akaike info criterion		-4.408.410
Sum squared resid	0.015411	Schwarz criterion		-4.264.428
Log likelihood	6.251.353	Hannan-Quinn criter.		-4.365.596
F-statistic	7.279.736	Durbin-Watson stat		2.009.947
Prob(F-statistic)	0.003380			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO F – Teste de raiz unitária

---

Null Hypothesis: D(LNCER) has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.703.869	0.0394
Test critical values:                   1% level	-4.339.330	
5% level	-3.587.527	
10% level	-3.229.230	

\*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNCER,2)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:27

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNCER(-1))	-0.726726	0.196207	-3.703.869	0.0011
C	0.015563	0.013579	1.146.112	0.2630
@TREND("1990")	0.000196	0.000773	0.253807	0.8018
R-squared	0.363713	Mean dependent var		0.001298
Adjusted R-squared	0.310689	S.D. dependent var		0.037593
S.E. of regression	0.031211	Akaike info criterion		-3.991.644
Sum squared resid	0.023379	Schwarz criterion		-3.847.662
Log likelihood	5.688.719	Hannan-Quinn criter.		-3.948.831
F-statistic	6.859.415	Durbin-Watson stat		1.953.290
Prob(F-statistic)	0.004404			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO G – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: LNCO2 has a unit root  
Trend Specification: Trend and intercept  
Break Specification: Trend and intercept  
Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2008

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 0 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.958911	>= 0.50
Test critical values:		
1% level	-4.808.276	
5% level	-4.206.897	
10% level	-3.900.345	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.655172$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: LNCO2

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:29

Sample (adjusted): 1991 2018

Included observations: 28 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNCO2(-1)	0.860594	0.145380	5.919.615	0.0000
C	1.748.025	1.771.579	0.986705	0.3345
TREND	0.003273	0.005704	0.573742	0.5720
INCPTBREAK	0.061238	0.041808	1.464.731	0.1571
TRENDBREAK	-0.009718	0.005615	-1.730.946	0.0975
BREAKDUM	-0.021174	0.055948	-0.378461	0.7087
R-squared	0.975726	Mean dependent var		1.271.278
Adjusted R-squared	0.970209	S.D. dependent var		0.265956
S.E. of regression	0.045904	Akaike info criterion		-3.137.124
Sum squared resid	0.046358	Schwarz criterion		-2.851.651
Log likelihood	4.991.973	Hannan-Quinn criter.		-3.049.852
F-statistic	1.768.646	Durbin-Watson stat		1.925.738
Prob(F-statistic)	0.000000			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO H – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: LNPIB has a unit root  
Trend Specification: Trend and intercept  
Break Specification: Trend and intercept  
Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2014

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 0 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.944.375	>= 0.50
Test critical values:		
1% level	-4.520.000	
5% level	-3.891.034	
10% level	-3.547.241	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.862069$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: LNPIB

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:30

Sample (adjusted): 1991 2018

Included observations: 28 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNPIB(-1)	0.728194	0.139791	5.209.158	0.0000
C	7.491.287	3.841.478	1.950.105	0.0640
TREND	0.009118	0.004358	2.092.079	0.0482
INCPTBREAK	-0.094944	0.034881	-2.721.894	0.0125
TRENDBREAK	0.006168	0.011125	0.554406	0.5849
BREAKDUM	0.062515	0.030157	2.072.995	0.0501
R-squared	0.994658	Mean dependent var		2.794.115
Adjusted R-squared	0.993444	S.D. dependent var		0.234978
S.E. of regression	0.019026	Akaike info criterion		-4.898.605
Sum squared resid	0.007964	Schwarz criterion		-4.613.133
Log likelihood	7.458.047	Hannan-Quinn criter.		-4.811.333
F-statistic	8.192.625	Durbin-Watson stat		2.070.067
Prob(F-statistic)	0.000000			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO I – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: LNCER has a unit root  
 Trend Specification: Trend and intercept  
 Break Specification: Trend and intercept  
 Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2000

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 1 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.905.959	>= 0.50
Test critical values:           1% level	-4.803.793	
5% level	-4.209.655	
10% level	-3.933.448	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.37931$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: LNCER

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:31

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LNCER(-1)	0.779423	0.115730	6.734.820	0.0000
D(LNCER(-1))	0.327232	0.192593	1.699.087	0.1048
C	1.748.875	0.913583	1.914.304	0.0700
TREND	0.004840	0.004597	1.052.906	0.3049
INCPTBREAK	0.021406	0.023373	0.915840	0.3707
TRENDBREAK	0.000582	0.004860	0.119842	0.9058
BREAKDUM	-0.076163	0.030575	-2.491.025	0.0216
R-squared	0.989912	Mean dependent var		8.256.774
Adjusted R-squared	0.986886	S.D. dependent var		0.237363
S.E. of regression	0.027182	Akaike info criterion		-4.154.119
Sum squared resid	0.014777	Schwarz criterion		-3.818.162
Log likelihood	6.308.061	Hannan-Quinn criter.		-4.054.222
F-statistic	3.271.051	Durbin-Watson stat		2.615.554
Prob(F-statistic)	0.000000			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO J – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: D(LNCO2) has a unit root

Trend Specification: Trend and intercept

Break Specification: Trend and intercept

Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2008

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 0 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.546.309	< 0.025
Test critical values:		
1% level	-4.824.286	
5% level	-4.214.286	
10% level	-3.911.429	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.642857$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNCO2)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:29

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNCO2(-1))	-0.006765	0.221447	-0.030550	0.9759
C	0.051674	0.027803	1.858.615	0.0772
TREND	-0.002095	0.002654	-0.789147	0.4388
INCPTBREAK	0.065175	0.046315	1.407.195	0.1740
TRENDBREAK	-0.008560	0.006026	-1.420.376	0.1702
BREAKDUM	-0.015275	0.058128	-0.262787	0.7953
R-squared	0.226248	Mean dependent var		0.027206
Adjusted R-squared	0.042021	S.D. dependent var		0.048880
S.E. of regression	0.047842	Akaike info criterion		-3.048.686
Sum squared resid	0.048066	Schwarz criterion		-2.760.722
Log likelihood	4.715.726	Hannan-Quinn criter.		-2.963.059
F-statistic	1.228.096	Durbin-Watson stat		2.071.756
Prob(F-statistic)	0.330985			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO K – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: D(LNPIB) has a unit root  
Trend Specification: Trend and intercept  
Break Specification: Trend and intercept  
Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2014

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 0 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-5.532.210	< 0.01
Test critical values:		
1% level	-4.534.286	
5% level	-3.902.857	
10% level	-3.558.571	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.857143$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNPIB)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:30

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNPIB(-1))	-0.110676	0.200765	-0.551269	0.5873
C	0.026596	0.010129	2.625.663	0.0158
TREND	0.000716	0.000721	0.994065	0.3315
INCPTBREAK	-0.127202	0.037444	-3.397.111	0.0027
TRENDBREAK	0.020363	0.009358	2.176.037	0.0411
BREAKDUM	0.072067	0.034414	2.094.149	0.0486
R-squared	0.488968	Mean dependent var		0.024367
Adjusted R-squared	0.367294	S.D. dependent var		0.026211
S.E. of regression	0.020849	Akaike info criterion		-4.709.866
Sum squared resid	0.009129	Schwarz criterion		-4.421.902
Log likelihood	6.958.319	Hannan-Quinn criter.		-4.624.239
F-statistic	4.018.666	Durbin-Watson stat		2.109.368
Prob(F-statistic)	0.010266			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO L – Teste de raiz unitária com quebra estrutural

---

Null Hypothesis: D(LNCER) has a unit root

Trend Specification: Trend and intercept

Break Specification: Trend and intercept

Break Type: Innovational outlier

Break Date: 2000

Break Selection: User-specified break

Lag Length: 0 (Automatic - based on Schwarz information criterion, maxlag=6)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.336.684	< 0.05
Test critical values:		
1% level	-4.797.143	
5% level	-4.198.571	
10% level	-3.915.714	

\*Perron (1989, 1993) asymptotic one-sided p-values ( $\lambda=0.357143$ ).

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(LNCER)

Method: Least Squares

Date: 12/06/21 Time: 09:31

Sample (adjusted): 1992 2018

Included observations: 27 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(LNCER(-1))	0.184105	0.188138	0.978562	0.3389
C	0.008093	0.022498	0.359717	0.7227
TREND	0.001312	0.004464	0.293967	0.7717
INCPTBREAK	0.029101	0.024423	1.191.538	0.2467
TRENDBREAK	-0.003312	0.004677	-0.708106	0.4867
BREAKDUM	-0.081420	0.032303	-2.520.537	0.0199
R-squared	0.312336	Mean dependent var		0.024978
Adjusted R-squared	0.148606	S.D. dependent var		0.031251
S.E. of regression	0.028835	Akaike info criterion		-4.061.295
Sum squared resid	0.017461	Schwarz criterion		-3.773.332
Log likelihood	6.082.749	Hannan-Quinn criter.		-3.975.669
F-statistic	1.907.630	Durbin-Watson stat		2.430.050
Prob(F-statistic)	0.135857			

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO M – Teste LM de autocorrelação para a defasagem do modelo VAR

---

VAR Residual Serial Correlation LM Tests

Date: 12/06/21 Time: 09:34

Sample: 1990 2018

Included observations: 28

Null hypothesis: No serial correlation at lag h

Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	1.607.175	9	0.0654	1.959.111	(9, 46.4)	0.0664
2	4.527.962	9	0.8734	0.489698	(9, 46.4)	0.8740
3	6.988.224	9	0.6383	0.775009	(9, 46.4)	0.6399
4	3.670.778	9	0.9317	0.393552	(9, 46.4)	0.9321

Null hypothesis: No serial correlation at lags 1 to h

Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	1.607.175	9	0.0654	1.959.111	(9, 46.4)	0.0664
2	2.153.189	18	0.2534	1.252.313	(18, 45.7)	0.2633
3	3.035.264	27	0.2985	1.159.704	(27, 38.6)	0.3310
4	3.304.799	36	0.6098	0.850941	(36, 30.3)	0.6809

\*Edgeworth expansion corrected likelihood ratio statistic.

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

---

## ANEXO N – Estimação do VECM

---

Vector Error Correction Estimates  
 Date: 12/06/21 Time: 09:37  
 Sample (adjusted): 1992 2018  
 Included observations: 27 after adjustments  
 Standard errors in ( ) & t-statistics in [ ]

Cointegrating Eq:	CointEq1		
LNCO2(-1)	1.000.000		
LNPIB(-1)	-2.398.264 (0.16240) [-14.7677]		
LNCER(-1)	1.324.773 (0.16244) [ 8.15540]		
C	4.337.704		
Error Correction:	D(LNCO2)	D(LNPIB)	D(LNCER)
CointEq1	-0.529915 (0.23363) [-2.26816]	-0.065858 (0.13106) [-0.50252]	-0.291037 (0.14468) [-2.01159]
D(LNCO2(-1))	-0.123786 (0.28883) [-0.42858]	-0.317962 (0.16202) [-1.96252]	-0.340813 (0.17886) [-1.90547]
D(LNPIB(-1))	0.169645 (0.64782) [ 0.26187]	0.650622 (0.36339) [ 1.79040]	-0.088944 (0.40117) [-0.22171]
D(LNCER(-1))	-0.081163 (0.36765) [-0.22076]	-0.023421 (0.20623) [-0.11357]	0.401840 (0.22767) [ 1.76497]
C	0.028767 (0.01281) [ 2.24482]	0.018781 (0.00719) [ 2.61262]	0.027963 (0.00794) [ 3.52366]

---

Continua

R-squared	0.314975	0.250380	0.357303
Adj. R-squared	0.190425	0.114085	0.240449
Sum sq. resids	0.042555	0.013390	0.016319
S.E. equation	0.043981	0.024671	0.027236
F-statistic	2.528.904	1.837.047	3.057.691
Log likelihood	4.880.151	6.441.086	6.174.046
Akaike AIC	-3.244.556	-4.400.805	-4.202.997
Schwarz SC	-3.004.586	-4.160.835	-3.963.027
Mean dependent	0.027206	0.024367	0.024978
S.D. dependent	0.048880	0.026211	0.031251
Determinant resid covariance (dof adj.)		2.44E-10	
Determinant resid covariance		1.32E-10	
Log likelihood		1.921.625	
Akaike information criterion		-1.290.093	
Schwarz criterion		-1.203.704	
Number of coefficients		18	

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

## ANEXO O – Teste LM de autocorrelação para a defasagem do VECM

---

VEC Residual Serial Correlation LM Tests

Date: 12/06/21 Time: 09:37

Sample: 1990 2018

Included observations: 27

Null hypothesis: No serial correlation at lag h

Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	7.314.333	9	0.6044	0.813844	(9, 41.5)	0.6064
2	6.033.839	9	0.7365	0.661656	(9, 41.5)	0.7380

Null hypothesis: No serial correlation at lags 1 to h

Lag	LRE* stat	df	Prob.	Rao F-stat	df	Prob.
1	7.314.333	9	0.6044	0.813844	(9, 41.5)	0.6064
2	1.580.352	18	0.6063	0.866510	(18, 40.1)	0.6177

\*Edgeworth expansion corrected likelihood ratio statistic.

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

---

### ANEXO P – Teste de heterocedasticidade

---

VEC Residual Heteroskedasticity Tests (Levels and Squares)

Date: 12/06/21 Time: 09:38

Sample: 1990 2018

Included observations: 27

Joint test:

Chi-sq	df	Prob.
5.279.450	48	0.2941

Individual components:

Dependent	R-squared	F(8,18)	Prob.	Chi-sq(8)	Prob.
res1*res1	0.260256	0.791595	0.6168	7.026.925	0.5337
res2*res2	0.362029	1.276.808	0.3149	9.774.795	0.2812
res3*res3	0.330289	1.109.660	0.4018	8.917.814	0.3493
res2*res1	0.264424	0.808827	0.6038	7.139.447	0.5217
res3*res1	0.222536	0.644026	0.7316	6.008.484	0.6463
res3*res2	0.260280	0.791693	0.6168	7.027.569	0.5337

---

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO Q – Teste de normalidade

---

VEC Residual Normality Tests

Orthogonalization: Cholesky (Lutkepohl)

Null Hypothesis: Residuals are multivariate normal

Date: 12/06/21 Time: 09:38

Sample: 1990 2018

Included observations: 27

Component	Skewness	Chi-sq	df	Prob.*
1	-0.601171	1.626.328	1	0.2022
2	0.381026	0.653315	1	0.4189
3	-0.375395	0.634147	1	0.4258
Joint		2.913.790	3	0.4051

Component	Kurtosis	Chi-sq	df	Prob.
1	2.514.908	0.264729	1	0.6069
2	2.222.007	0.680932	1	0.4093
3	2.295.758	0.557951	1	0.4551
Joint		1.503.612	3	0.6814

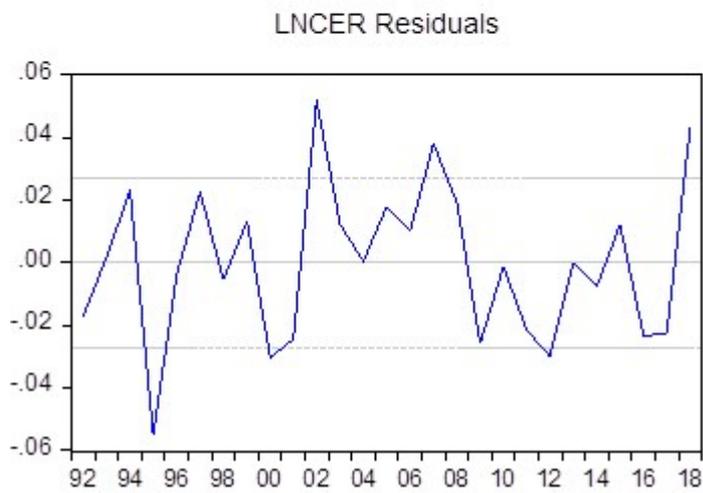
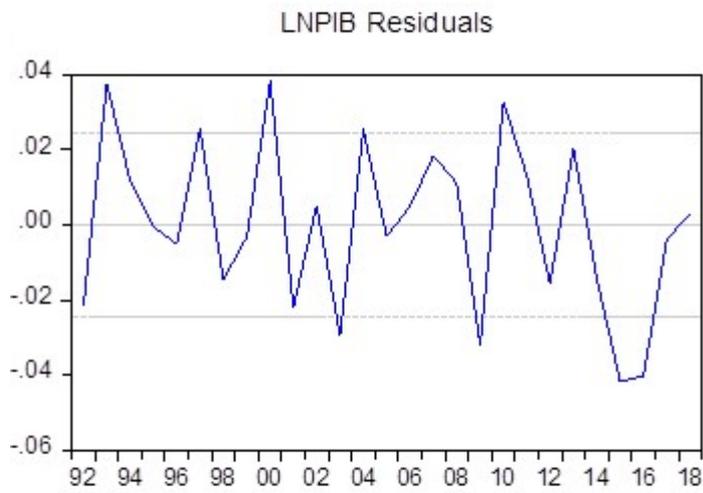
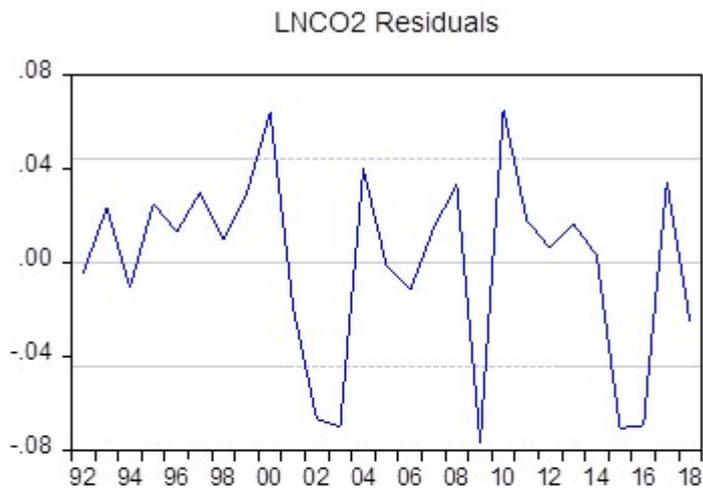
Component	Jarque-Bera	Df	Prob.
1	1.891.057	2	0.3885
2	1.334.247	2	0.5132
3	1.192.098	2	0.5510
Joint	4.417.402	6	0.6204

---

\*Approximate p-values do not account for coefficient estimation

Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.

### ANEXO R – Resíduos das séries $\ln\text{CO}_2$ , $\ln\text{PIB}$ e $\ln\text{CER}$



Fonte: elaborado pela autora com dados da pesquisa.