

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS

PIETRO WITT GASPARIN

**O AQUECIMENTO GLOBAL E AS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA
PELO SETOR DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA**

Porto Alegre

2022

PIETRO WITT GASPARIN

**O AQUECIMENTO GLOBAL E AS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA
PELO SETOR DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Ciências Econômicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Sabino da Silva Porto Júnior

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Gasparin, Pietro

O AQUECIMENTO GLOBAL E AS EMISSÕES DE GASES DO
EFEITO ESTUFA PELO SETOR DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS
DA AMÉRICA / Pietro Gasparin. -- 2022.

86 f.

Orientador: Sabino da Silva Porto Júnior.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade
de Ciências Econômicas, Curso de Ciências Econômicas,
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. SARIMA. 2. Aquecimento Global. 3.
Externalidades. 4. Gases do Efeito Estufa. 5.
Econometria. I. Porto Júnior, Sabino da Silva, orient.
II. Título.

PIETRO WITT GASPARIN

**UMA ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA PELO SETOR
DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de
Graduação em Ciências Econômicas da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Ciências Econômicas.

Aprovada em: Porto Alegre, ____ de _____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sabino da Silva Porto Júnior – Orientador

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Flávio Tosi Feijó

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Fernando Boeira Sabino da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a minha mãe, Leila, e ao meu pai Michel por me dar o apoio emocional e financeiro desde o início de minha jornada acadêmica, que mesmo a momentos em que não pude estar presente junto com as famílias devido a provas e trabalhos, sempre me demonstraram apoio incondicional. Quero agradecer também a minha madrasta Raquel Pontes e meu padrasto Hugo Sebben que me apoiaram sempre.

Aos amigos da vida, não tenho palavras o suficiente para agradecê-los, quando me mudei para Porto Alegre foram minha fonte de conforto, diversão e acolhimento, agradeço a eles por fazerem de Porto Alegre minha casa e meus dias mais felizes. Em especial, Otávio Parraga por ser meu mentor e suporte durante todo o caminho do TCC, Otávio Lessa por ser um amigo incondicional e me ajudando em meus momentos mais difíceis e aos outros amigos do grupo o nome não pode ser citado em um trabalho acadêmico pela formalidade exigida de tal documento.

Aos amigos da faculdade, preciso agradecer por estarem ao meu lado nessa jornada que muitos sonham em ter, e infelizmente poucos vêm a concluir, o caminho foi sinuoso e cheio de desafios, mas graças a vocês o caminho se tornou mais alegre. Em especial quero agradecer a Gabrielle Santos por me auxiliar e incentivar ao longo desse último semestre da faculdade, sempre apoiando um ao outro durante o processo do TCC.

Quero agradecer também Guilherme Elias e Luka Tassano, que dividiram o apartamento comigo metade do ano de 2022 e que sempre foram meu apoio no dia a dia, nos dias mais difíceis que eu mais precisava deles, eles sempre estiveram lá.

Por fim, quero agradecer aos professores e discentes da faculdade que me deram a estrutura para realizar e completar meus estudos. Em especial o professor Sabino Porto que me orientou ao longo desse trabalho e também aos professores que compõem a banca.

*"You may shoot me with your words,
You may cut me with your eyes,
You may kill me with your hatefulness,
But still, like air, I'll rise."*

- Maya Angelou, 1978

RESUMO

O aquecimento global é um tema amplamente debatido entre as grandes nações no mundo (NISBET e MYERS, 2007). Buscamos neste trabalho compreender primeiramente como o fenômeno do aquecimento global ocorre, quais são suas principais influências e suas principais consequências. Com isso, poderemos entender uma abordagem econômica sobre o assunto, nesse caso optamos pela abordagem microeconômica das externalidades, com essa visão, entenderemos primeiramente como as externalidades negativas afetam os mercados competitivos, tanto no âmbito da oferta e demanda, quanto na ótima da firma, afetando suas curvas de custo e alterando a tomada de decisão, gerando assim ineficiências de mercado. Havendo a compreensão das externalidades, analisamos o aquecimento global sob a ótica das externalidades. Por fim, iremos estimar um modelo econométrico SARIMA e prever as emissões de gás carbônico feitas pelo setor de energia dos Estados Unidos da América. Com o modelo econométrico conseguimos ver que as recentes políticas que incentivaram o uso de energias mais limpas resultaram em um achatamento da curva das emissões de gás carbônico pelos Estados Unidos da América. E por consequência, a previsão do nosso modelo demonstrou que a tendência é de queda para as emissões pelo setor de energia dos Estados Unidos da América.

Palavras-chave: Aquecimento Global, Externalidades e Modelagem SARIMA

ABSTRACT

Global warming is a widely debated topic among major nations in the world (NISBET and MYERS, 2007). We seek in this work to first understand how the phenomenon of global warming occurs, what are its main influences and its main consequences. With this, we will be able to understand an economic approach on the subject, in this case we opted for the microeconomic approach of externalities, with this view, we will first understand how negative externalities affect competitive markets, both in the scope of supply and demand, and in the optimal of the firm, affecting their cost curves and altering decision making, thus generating market inefficiencies. Having understood the externalities, we analyze global warming from the perspective of externalities. Finally, we will estimate an econometric model and predict the carbon dioxide emissions made by the energy sector in the United States of America. With the econometric model SARIMA we can see that recent policies that have encouraged the use of cleaner energy have resulted in a flattening of the curve of carbon dioxide emissions by the United States of America. As a result, our model's forecast showed that emissions from the US energy sector are on a downward trend.

Keywords: Global Warming, Externalities and SARIMA Modeling

LISTA DE ABREVIACOES

AIC	Akaike Information Criterion
EIA	Energy Information Administration
EUA	Estados Unidos da América
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MMT	Million Metric Tonnes (de gás carbônico)
RF	Radiative Forcing
US	United States
USA	United States of America

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 AQUECIMENTO GLOBAL	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 RESUMO DO FENÔMENO	5
2.3 MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DO AQUECIMENTO GLOBAL	8
2.3.1 Mudança na matriz energética dos EUA	11
3 MERCADOS COMPETITIVOS E EXTERNALIDADES	14
3.1 PADRÃO DE EMISSÕES VS TAXAS POR EMISSÃO	21
3.2 AQUECIMENTO GLOBAL E EXTERNALIDADES	23
4 METODOLOGIA E BASE DE DADOS	28
4.1 INTRODUÇÃO	28
4.2 BOX-JENKINS	28
4.2.1 Estacionariedade	29
4.3 MODELO SARIMA	30
4.4 BASE DE DADOS	32
5 MODELAGEM	35
5.1 INTRODUÇÃO	35
5.2 MODELAGEM	35
5.2.1 Estacionariedade	37
5.3 DEFINIÇÃO DO MODELO	41
6 RESULTADOS	43
6.1 INTRODUÇÃO	43
6.2 ACURÁCIA DO MODELO	45
6.3 PREVISÃO	47
7 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	52
ANEXOS	57

1 INTRODUÇÃO

Bill Gates em seu livro *How to Avoid a Climate Disaster* diz que existem dois números importantes quando falamos de mudança climática. O primeiro é 51 bilhões e o segundo é zero; 51 bilhões é a quantidade de gases do efeito estufa que a humanidade joga em média na atmosfera anualmente; e zero é a quantidade que devemos almejar para que os efeitos do aquecimento global parem de ser agravados pela humanidade.¹

O aquecimento global é um assunto que vem sendo amplamente debatido na sociedade e nas ciências modernas. Mesmo que ainda haja diversos céticos, que atrele as variações de temperatura aos ciclos naturais da terra. A corrente amplamente aceita pelos campos científicos é que as emissões de gases, como carbono, expelidos pela humanidade na atmosfera acarretarão em aumentos cada vez mais drásticos das temperaturas médias do planeta, resultando assim em consequências climáticas de teor irreversível. Todavia, ainda há quem atrele as variações de temperatura aos ciclos naturais da terra.²

Tecnologias atualmente disponíveis de energias sustentáveis como eólica e solar são suficientes para termos uma diminuição considerável nas emissões de gás carbônico. Infelizmente tais métodos não estão sendo inseridos em um ritmo necessário para o alcance dos níveis de emissões necessários para o combate do aquecimento global. Além de que tais métodos dependem de fatores, como vento e sol, que não necessariamente estão presentes a todo momento. Sendo assim, é necessário que compreendamos o fenômeno do aquecimento global para que sejam desenvolvidas novas tecnologias mais eficientes.³

Tendo em vista a preocupação emergente com o aquecimento global, a ciência econômica terá sua própria visão sobre o fenômeno. Uma abordagem que possui base teórica sólida no campo microeconômico é a abordagem das externalidades. Nessa abordagem interpreta-se que alguns agentes econômicos, ao produzir seus bens para a sociedade, terão impactos, positivos ou negativos sobre outros agentes econômicos que não os relacionados à produção daquele bem. Por exemplo, uma planta carbonífera ao produzir energia, irá emitir gases nocivos à saúde humana na atmosfera, afetando a população ao redor da planta. Como resultado, múltiplos agentes, com exceção da própria planta, serão afetados pela produção da mesma. Dessa forma, famílias da região poderão desenvolver mais doenças respiratórias

¹ GATES, Bill. *How to Avoid a Climate Disaster*. Nova Iorque: p. 8-22, 2021

² M.L. Khandekar, T.S. Murty e P. Chittiababu. *The Global Warming Debate: A Review of the State of Science*. Pure appl. geophys. 162, 1557–1586 (2005). <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2683-x>

³ GATES, Bill. *How to Avoid a Climate Disaster*. Nova Iorque: p. 40-53, 2021

como consequência da queda na qualidade do ar, resultando em um aumento de custo nos sistemas de saúde da região.⁴

Sendo assim, é possível entender que o aquecimento global, ocasionado pelas emissões de gás carbônico na atmosfera, podem ter sua interpretação econômica por meio da externalidade, gerando diversos impactos em múltiplos agentes econômicos que não os emissores originais.

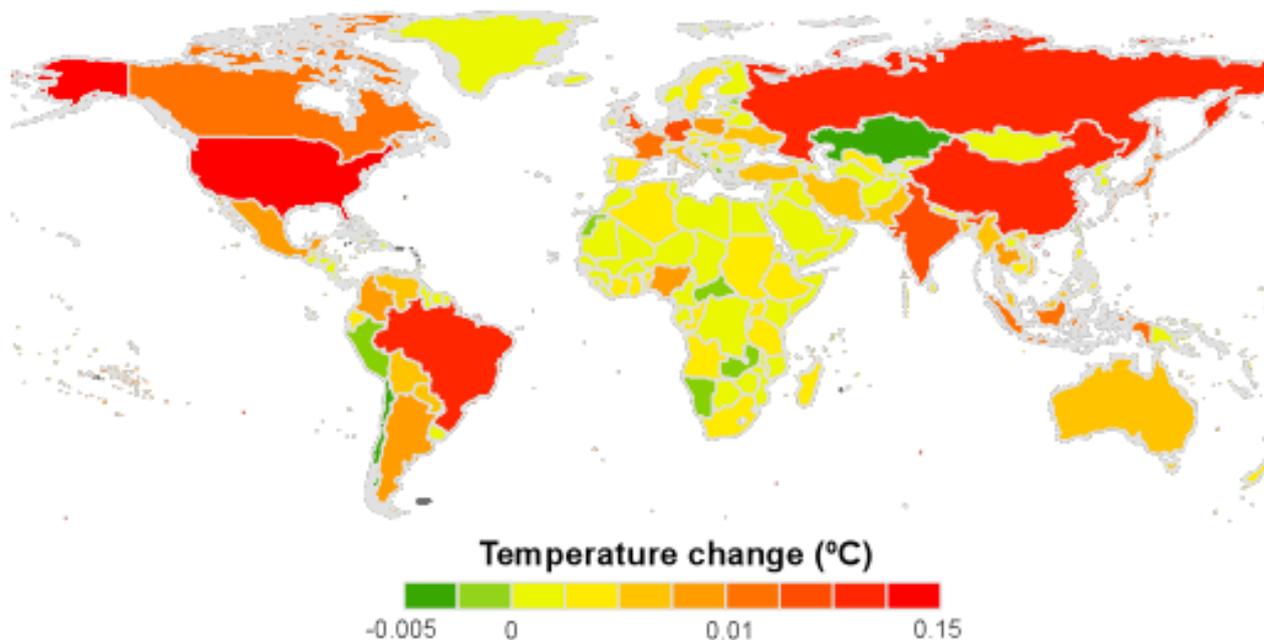
Compreendendo o impacto sócio-econômico do aquecimento global, indiretamente causado pelas emissões de gases do efeito estufa, vemos que é necessário encontrar formas de solucionar ou amenizar o problema. Sendo os Estados Unidos da América (EUA) um dos principais responsáveis pelo aumento da temperatura média do planeta, se torna indispensável analisá-lo como peça chave do cenário mundial.⁵ Na Figura 1 pode-se ver a contribuição de cada país para o aumento de temperatura da terra e na tabela 1 podemos identificar com os números os países que mais contribuíram para esse aumento de temperatura média do planeta, os valores da terceira demonstram o aumento de temperatura média global relacionado aquele país. Por mais que na figura os Estados Unidos, representado em vermelho, possa parecer ter o mesmo impacto que outros países, ao analisarmos a tabela, vemos que ele fica em primeiro no ranking de contribuições de maneira isolada, contribuindo mais que o dobro que o segundo maior contribuidor, a China.⁶

⁴ TIETENBERG, Thomas. *Environmental and Natural Resource Economics*. p.61-69, Nova Iorque, 2003

⁵ NISBET, Matthew; MYERS, Teresa. **Twenty Years of Public Opinion about Global Warming**. The Public Opinion Quarterly, v. 71, n. 3, p. 444-470, 2007.

⁶ MATTHEWS, Damon H. et. al. **National contributions to observed global warming**. Environmental Research Letters, v. 9, n. 1, p. 014010, 2014.

Figura 1 - Sistema de Energia terrestre



Fonte: National contributions to observed global warming, 2014.

Tabela 1 - Países que mais influenciaram no aumento da temperatura média do planeta em °C

Rank	Country	Total
1	United States	0.151
2	China	0.063
3	Russia	0.059
4	Brazil	0.049
5	India	0.047
6	Germany	0.033
7	United Kingdom	0.032
8	France	0.016
9	Indonesia	0.015
10	Canada	0.013
11	Japan	0.013
12	Mexico	0.010
13	Thailand	0.009
14	Columbia	0.009
15	Argentina	0.009
16	Poland	0.007
17	Nigeria	0.007
18	Venezuela	0.007
19	Australia	0.006
20	Netherlands	0.006

Fonte: National contributions to observed global warming, 2014.

Buscamos por meio deste trabalho, analisar o comportamento dos EUA em relação às emissões de gases estufa, focando em, por meio de ferramentas econométricas, prever qual

caminho está sendo traçado para os próximos anos. Por fim, procura-se para onde estamos caminhando em relação ao meio ambiente, e se as decisões e medidas tomadas para conter o avanço do aquecimento global vem surtindo efeito nos setores e países que importam.

O objetivo deste trabalho é estimar um modelo SARIMA, amplamente utilizado na ciência econômica, utilizando a metodologia *Box-Jenkins* para a previsão das emissões de gás carbônico pelo setor de energia dos Estados Unidos da América. Apresentaremos também o conceito de externalidades para compreendermos a relevância econômica do fenômeno do aquecimento global, fenômeno o qual apresentaremos e discutiremos a sua situação atual. Isso será feito ao longo de quatro capítulos, o primeiro sendo dedicado ao entendimento do fenômeno, o segundo ao conceito de externalidades e como o aquecimento global pode ser inserido dentro desse contexto, por fim os últimos dois terão o foco na metodologia empírica utilizada e a modelagem em si.

2 AQUECIMENTO GLOBAL

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estudaremos o aquecimento global. Brevemente revisaremos estudos sobre o fenômeno, a fim de entender suas tendências históricas, assim como suas principais causas e suas consequências.

2.2 RESUMO DO FENÔMENO

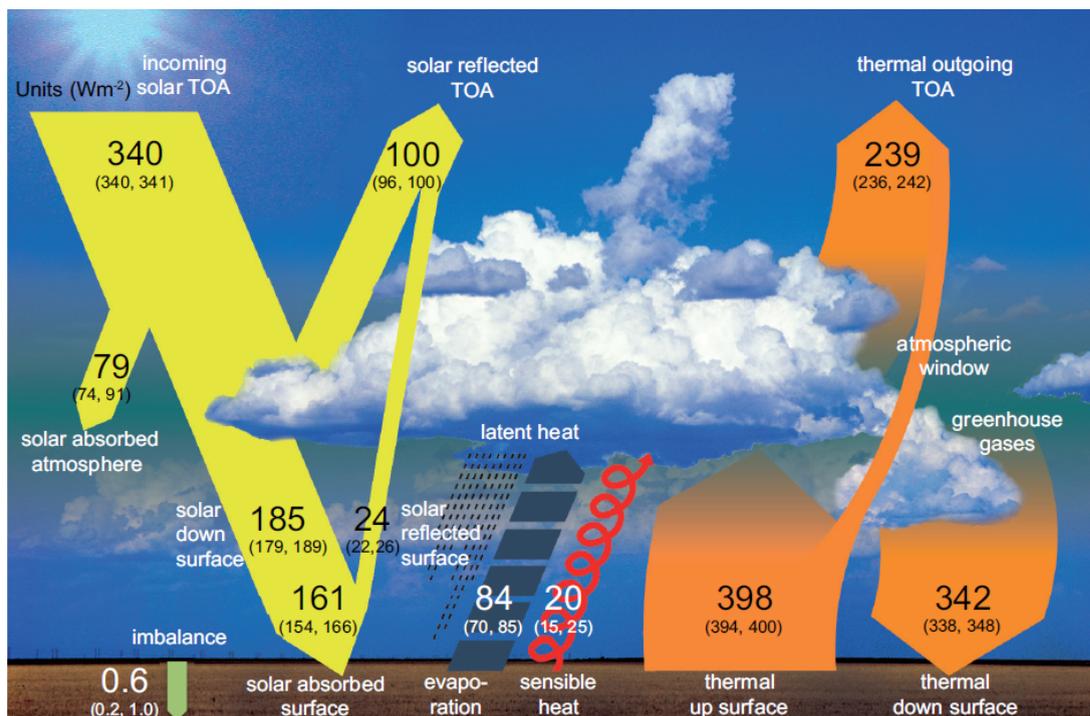
O termo “efeito estufa” se resume a uma série de gases da atmosfera terrestre que possuem as propriedades de manter a temperatura da Terra estável. A energia proveniente dos raios solares chega ao planeta Terra e é parcialmente absorvida pela atmosfera e superfície, com ambas refletindo parcialmente essa energia.⁷ Na Figura 2 temos a visualização desse efeito, as linhas amarelas representam a energia provinda dos raios solares, e as linhas laranjas demonstram a energia que o próprio planeta expete para o sistema. Podemos ver que chegam em média do sol 340 Wm^2 (Watts por metro quadrado), por sua vez a atmosfera reflete 100 Wm^2 e absorve 79 Wm^2 , posteriormente a superfície terrestre absorve 161 Wm^2 dos 185 Wm^2 restantes, e refletirá 24 Wm^2 . As linhas laranjas indicam a troca de energia que ocorre dentro do próprio sistema termal da Terra. É de suma importância ressaltar que os gases do efeito estufa são responsáveis por grande parte da energia retida no sistema, e que, se não houvesse essa retenção de calor, o planeta seria inabitável, nesse caso o efeito estufa não deve ser “vilanizado”, ele é necessário para a habitabilidade do planeta.⁸ Entretanto, com o aumento artificial, por meio da intervenção humana, dos gases da atmosfera, o efeito estufa se torna mais forte, retendo mais energia que o habitual, acarretando um aumento na energia total retida pelo sistema, ocasionando a subida da temperatura média do planeta.

⁷ National Geographic. **What is global warming, explained.**

<<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/global-warming-overview>> acesso em: 11 ago. 2022.

⁸ KHANDEKAR, M.L.; MURTY, T.S.; CHITTIBABU, P. **The Global Warming Debate: A Review of the State of Science.** v. 162, p. 1557-1586, 2005.

Figura 2 - Sistema de Energia terrestre



Fonte: IPCC AR5

Por mais que o aquecimento global seja um assunto constantemente debatido em 2022, o efeito estufa é um efeito conhecido desde quando Joseph Fourier calculou que a terra seria muito mais fria caso não possuísse atmosfera.⁹ Entretanto, com a queima de combustíveis fósseis, o efeito estufa vem aumentando ano após ano, implicando consequências permanentes ao planeta terra. Contudo, para o compreendermos com plenitude, é necessário entender que alguns efeitos naturais do planeta também conseguem expelir gases do efeito estufa na atmosfera. Erupções vulcânicas, por exemplo, são responsáveis por 2% da adição de gases do efeito estufa para a atmosfera. Outros efeitos naturais também aumentam os níveis dos gases do efeito estufa no sistema, mas o impacto da humanidade para o agravamento do aquecimento global é consideravelmente maior que os efeitos naturais. E o aumento de gases do efeito estufa não só afetam a temperatura da terra, mas também afetam eventos climáticos. Dessa forma, além de desequilibrar diversos ecossistemas, tornam mais

⁹ James Fleming em seu artigo “Joseph Fourier, the ‘greenhouse effect’, and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures” apresenta o trabalho de Joseph Fourier sobre o efeito estufa que em 1824 busca medir o impacto de uma série de variáveis na temperatura do planeta, descobrindo assim, mesmo que de maneira superficial, o efeito estufa, esses resultados são apresentados por Fourier em seu artigo “Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires”, o artigo do Fleming foi utilizado para essa dissertação no lugar do original, pois só foi encontrado uma versão em francês e de difícil leitura pelo caráter específico do texto, se tratando de um artigo sobre física.

constantes tempestades intensas, secas e inundações, causando diversos danos tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente.¹⁰

Passamos a compreender que a atmosfera terrestre, formada por múltiplos gases, é responsável por parte crucial da retenção de calor no planeta e que a composição dessa atmosfera vem sendo alterada pela humanidade com suas elevadas emissões de múltiplos gases do efeito estufa. Um último aspecto a ser levantado é porque o foco de múltiplos trabalhos que abordam o tema aquecimento global, inclusive este, se dá sobre o gás carbônico e não outros gases como o metano e o vapor de água, que também estão presentes na atmosfera e possuem função crucial para a retenção de calor.¹¹

Muitos dos gases que compõem a atmosfera são responsáveis pela retenção da temperatura, entretanto o maior responsável por isso é o gás carbônico (TIETENBERG, 2003); por mais que outras moléculas, como a de metano por exemplo, possuam uma capacidade de captação térmica por molécula maior, elas não são tão abundantes na atmosfera.

Em 2013, o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mediu, por meio de gases do efeito estufa presos no gelo dos polos em conjuntura com modelos matemáticos, a Força Radiativa (radiative forcing ou RF) de cada variável que influencia no aquecimento global. RF mede o crescimento, ou a diminuição, marginal que cada variável possui na absorção de Watts por metro quadrado.¹²

Na Figura 3, podemos ver os resultados dessa pesquisa que mediu a influência humana no aquecimento global por meio de emissões de gases do efeito estufa entre 1750 e 2011. A RF é medida por quantos Watts aquela substância consegue absorver por metro quadrado, um RF positivo significa um aquecimento médio da superfície da terra, enquanto um RF negativo indica um esfriamento médio da temperatura.

¹⁰ National Geographic. **What is global warming, explained.**

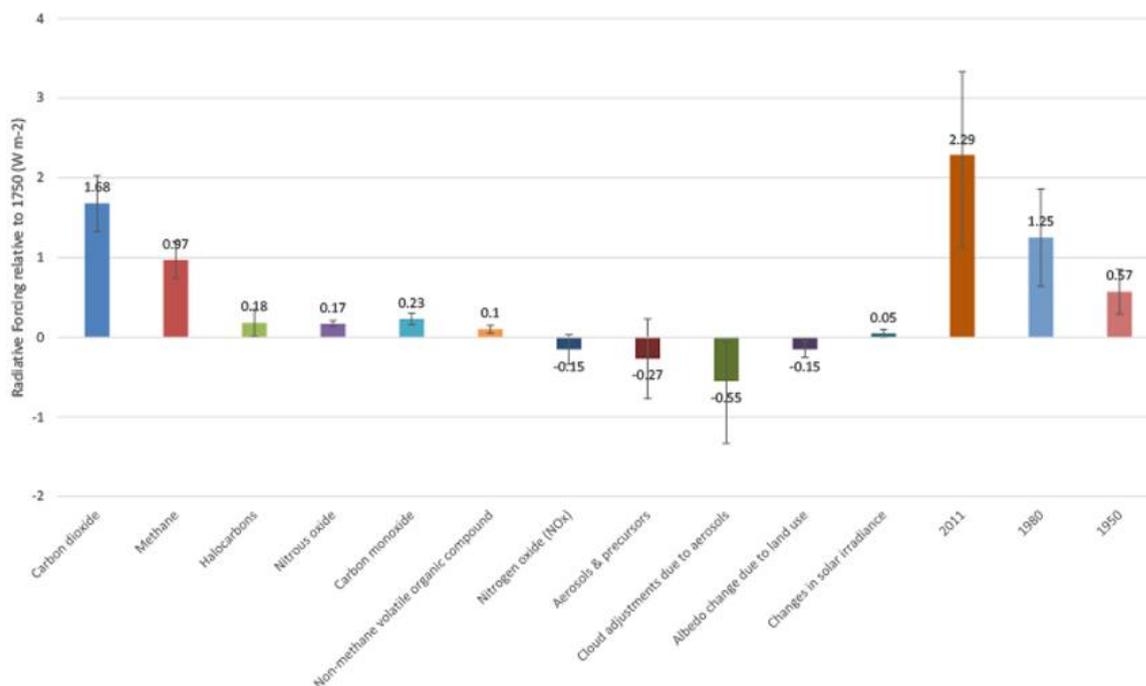
<<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/global-warming-overview>> acesso em: 11 ago. 2022.

¹¹ Union of Concerned Scientists. **Why Does CO₂ Get Most of the Attention When There are so Many Other Heat-Trapping Gases?.**

<<https://www.ucsusa.org/resources/why-does-co2-get-more-attention-other-gases#:~:text=In%20total%2C%20CO2%20has.less%20abundant%20in%20the%20atmosphere>> acesso em: 11 ago. 2022.

¹² MYHRE, Gunnar et al. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013

Figura 3 - Influência climática entre 1750 e 2011



Fonte: Union of Concerned Scientists com dados do IPCC

Além do gás carbônico ser o fator que mais retém energia na superfície da terra, há outro fato relevante que o coloca como o centro do debate sobre o aquecimento global. O gás carbônico permanece na atmosfera por mais tempo que outros gases do efeito estufa emitidos pela humanidade. Por exemplo, o gás metano demora aproximadamente uma década para sair da atmosfera, e o monóxido de nitrogênio aproximadamente um século. Já o gás carbônico emitido hoje ficará por mais de 1000 anos retido na atmosfera, 40% ainda estará na nossa atmosfera depois de 100 anos e 20% ainda estará presente depois de 1000 anos, segundo a *Union of Concerned Scientists* de Cambridge.¹³ Sendo assim, ao pensarmos em políticas públicas e medidas de intervenção contra o aquecimento global, é de suma importância que tenhamos ênfase na diminuição, e na captação de gás carbônico.

2.3 MEDIDAS PARA MITIGAÇÃO DO AQUECIMENTO GLOBAL

É importante, por sua vez, compreender as possíveis medidas que podem ser tomadas para o controle das emissões de gases do efeito estufa. Todavia, as múltiplas medidas que podem ser tomadas, possuem um impasse para o tomador de decisão. Quando um governo

¹³ *Union of Concerned Scientists* com base em Ask The Experts. The IPCC Fifth Assessment Report, Carbon Management, v. 5, n.1, p. 17-25, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/cmt.13.80>

decide diminuir suas emissões de gás carbônico, ou decide introduzir um programa de captação de gás carbônico, os benefícios dessas ações irão transbordar as fronteiras físicas do país, enquanto esse mesmo será responsável pelos seus custos por completo (TIETENBERG, 2003).

Sendo assim, podemos considerar 4 estratégias para lidar com o aquecimento global: (1) engenharia climática, (2) adaptação, (3) mitigação e (4) prevenção. O primeiro se trata de medidas como emitir partículas na atmosfera que possuem o efeito inverso ao de gases do aquecimento global, no caso emitir gases que realizaram o efeito de “esfriamento global”. Adaptação seria a população humana desenvolver maneiras de sobreviver em um planeta mais quente, por exemplo deixar de habitar cidades costeiras ou desenvolver uma agricultura mais adaptada a temperaturas maiores. O terceiro consiste na tentativa de desenvolver estratégias para aumentar a capacidade de absorção de gases do efeito estufa pelo planeta terra. Por fim, a última estratégia consiste em reduzir as emissões dos gases nocivos; com isso, daremos ênfase às duas últimas pois são melhores desenvolvidas (TIETENBERG, 2003).

Para prevenção, podemos ter uma abordagem bem simples, segundo o economista focado em desenvolvimento sustentável Tom Tietenberg, grande parte das emissões de gás carbônico feitas pela humanidade, são referentes à queima de combustível fóssil para produção de energia. Sendo assim, pode haver tanto uma mudança na matriz energética dos países, quanto uma redução na utilização de energia, diminuindo assim a quantidade de energia necessária a ser produzida pelo sistema. Quando tratamos sobre mitigação, o método mais comentado é o reflorestamento, pois ao diminuir o ritmo do desmatamento e aumentar o ritmo de reflorestamento, podemos melhorar a capacidade de absorção de gás carbônico pelo ecossistema terrestre. Entretanto, para essas medidas serem tomadas há um grande custo econômico e um social atrelado, tanto referente à mudança na estrutura energética para produção de energia mais limpa, quanto ao padrão de consumo da população para redução do uso de energia. Até mesmo o processo de reflorestamento demonstram um empecilho de política pública.¹⁴

Essa complicada balança entre o investimento e o retorno se dá porque o problema do aquecimento global se trata, como o próprio nome diz, de uma preocupação global. Enquanto os custos para as mudanças necessárias para remediá-lo são atreladas a ações específicas de nações, os benefícios dos cuidados com o meio ambiente irão transpassar as fronteiras. Sendo

¹⁴ TIETENBERG, Tom. **Environmental and Natural Resource Economics**. 5ª Edição. Editora: Addison Wesley Longman, 2000.

assim, países que decidem, por conta própria, reduzir suas emissões, se expondo a custos maiores atrelados às estratégias sendo utilizadas.

Uma medida já utilizada e discutida para a diminuição nas emissões de gás carbônico na atmosfera é a taxação sobre a gasolina. Aplicando uma taxa em cima de um produto que possui uma taxa de emissão atrelada a ele reduzirá seu consumo e por sua vez reduzirá a emissão, sendo assim é comumente utilizada como parte do pacote de mitigação (STERNER et al. 1992).

Contudo, é importante que coloquemos um asterisco nas taxas de gasolina utilizadas atualmente. Uma taxa de carbono, criada exclusivamente para reduzir as emissões do gás, teria que refletir os danos causados pelas emissões, por outro lado, a receita proveniente de taxas na gasolina está atrelada a gastos com a construção de infraestrutura relacionada com a mobilidade de veículos que utilizam a própria gasolina, como rodovias, pedágios e estacionamentos. Com isso, a receita oriunda dessa medida acarretará em mais emissões, pois torna mais viável a utilização de veículos a combustão. Esse fenômeno é consequência de uma motivação muito mais financeira do que ambiental na taxação da gasolina (TIETENBERG, 2003).

Para que possamos observar a transição para um sistema econômico mais sustentável, diversas novas tecnologias devem ser desenvolvidas. Com a aplicação de taxas ambientais, focadas em minimizar as emissões de seus respectivos agentes taxados em troca de taxas tradicionais, seria possível criar um fundo internacional. Esse fundo seria responsável por distribuir os recursos para o desenvolvimento de tecnologias focadas na sustentabilidade do planeta terra (NORDHAUS, 1993).

O *Global Environmental Facility* (GEF), hospedado no banco central, por mais que não seja sustentado por meio de taxas ambientais, possui uma função similar à mencionada anteriormente, com a contribuição de aproximadamente 26 países, ele utiliza das verbas para financiar diversos projetos de impacto global, incluindo os que auxiliam políticas contra o aquecimento global. O GEF pode absorver gastos que não seriam justificáveis domesticamente para um único governo; por exemplo, uma planta de produção de energia com base em carvão é a solução mais barata para o governo americano, entretanto uma usina hidrelétrica que possui um custo maior iria emitir menos gases do efeito estufa, tornando a segundo uma opção mais benéfica para o meio ambiente. Como os benefícios de uma baixa emissão de gás carbônico são muito mais globais do que locais, o governo optaria pela planta carbonífera, entretanto se a GEF fornecer os recursos excedentes para a construção da

hidrelétrica no lugar, é mais plausível que o governo venha a tomar a decisão mais sustentável.¹⁵

Outra medida possível para o controle do aquecimento global é o possível mercado de emissões, ou o termo cunhado e amplamente difundido “créditos de carbono”. Esse modelo funcionaria na medida em que se calcularia o nível de emissões que seria sustentável para a atmosfera terrestre, e então se distribuiria de acordo com os países a quantidade permitida de emissões por cada um. Dessa forma, países que precisarem emitir mais gases, no caso que tenham custos muito elevados para a redução das suas emissões, ou cuja estrutura socioeconômica impede tais mudanças, poderão comprar de países que possuem mais flexibilidade e custos menores para reduzir suas emissões. Dessa maneira, haveria uma melhor alocação dos recursos para a redução das emissões de gases do efeito estufa para o nível desejado por um custo menor (MANNE E RUTHERFORD, 1994).

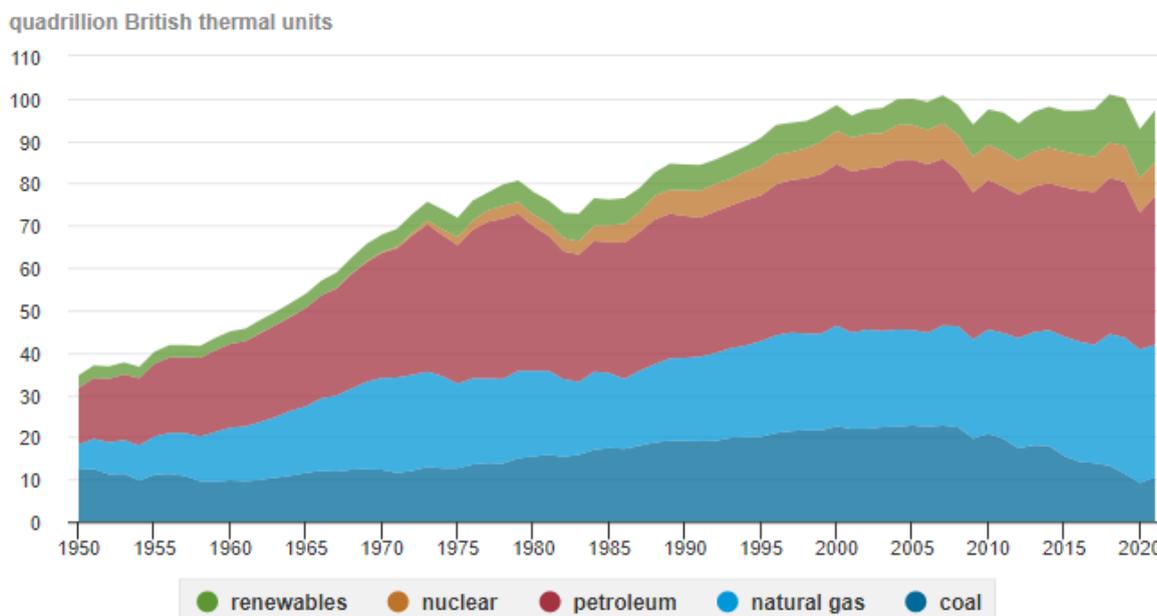
Algumas medidas já começaram e já foram tomadas na história recente da humanidade, em 1997, diversos países entraram em acordo na conferência de Kyoto sobre uma estrutura para limitar as emissões de gás carbônico pelos países industrializados. Como resultado disso, foi criado o então protocolo de Kyoto, determinando que no período entre 2008 e 2012 os múltiplos países deveriam chegar nos níveis acordados de emissões dos então seis gases determinados na conferência (dióxido de carbono, metano, monóxido de nitrogênio, HFCs, PFCs e hexafluoreto de enxofre). Uma das principais maneiras que se imaginou chegar nesses objetivos de curto e médio prazo é por meio dos créditos de carbono, criando assim um mercado para troca de direitos de emissão, permitindo uma melhor alocação dos recursos para combater as emissões. Essa abordagem permite que países com custos mais elevados para diminuição das emissões venham a comprar as permissões de países que possuem facilidade para realizar essa redução (TIETENBERG, 2003).

2.3.1 Mudança na matriz energética dos EUA

Os Estados Unidos da América estão no centro de diversos assuntos globais. Entretanto, um tópico penoso para os americanos é o elevado nível de emissão de gases do efeito estufa. Muito disso se dá pela matriz energética do país, que possui grande foco na produção de energia por meio da queima de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, como podemos ver na Figura 4.

¹⁵ TIETENBERG, Tom. **Environmental and Natural Resource Economics**. 5ª Edição. Editora: Addison Wesley Longman, 2000.

Figura 4 - Consumo de energia nos EUA por fonte de produção

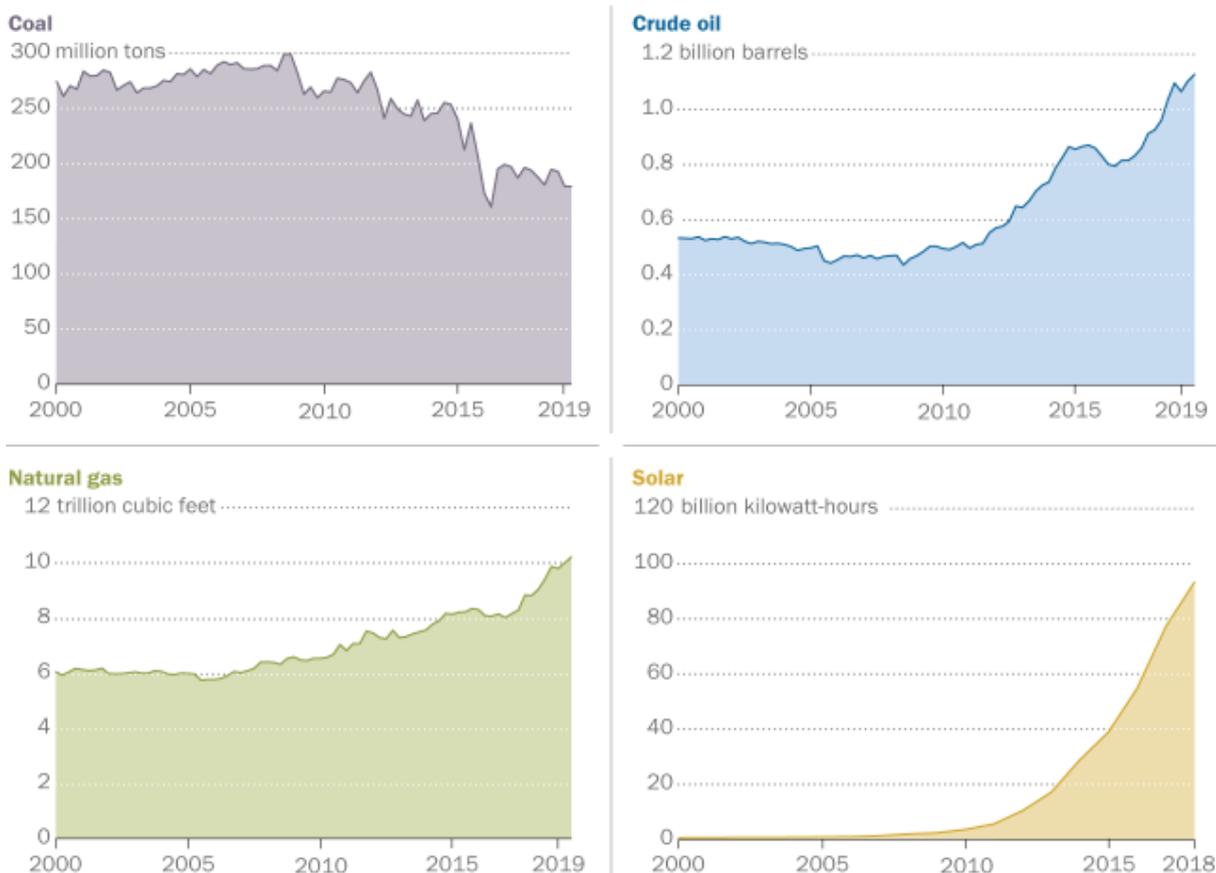


Fonte: U.S. Energy Information Administration

Por mais que as principais fontes de energia ainda sejam muito poluentes, é importante reparar e compreender a mudança que podemos ver depois de 2008. Neste ano, a crise financeira mundial abalou os Estados Unidos, reduzindo assim sua atividade econômica, e por consequência a quantidade de energia utilizada, sendo essa parte da estratégia de prevenção mencionada anteriormente. Contudo, é interessante notar que mesmo após os efeitos colaterais da crise de 2008, o nível total de energia sendo consumida se manteve estável, fenômeno também identificável a partir dos anos 2000 - mas desta vez em um nível ligeiramente abaixo. Este fator de redução em conjuntura com crescimento econômico no período é um indicativo de aumento na eficiência energética da economia do país. Outro aspecto relevante para essa mudança de 2008 em diante, é que, como mencionado anteriormente, começa o período de realização das metas estabelecidas pelo protocolo de Kyoto.

Agregado a isso, por mais que seja relevante a estabilidade do total de energia consumida pelos EUA, o que torna mais relevante a mudança de 2008 é a composição dessa energia. Nota-se que, com base nos dados fornecidos pela Energy Information Administration, que houve uma diminuição considerável na produção e utilização de energia provinda de plantas carboníferas. Em contrapartida, segundo o *Pew Research Center* a produção de energia pelo sol cresceu de maneira exponencial nos últimos anos, como apresentado na Figura 5. De forma semelhante o carvão vem sendo substituído pelo gás natural, que por mais que no processo de produção de energia, o gás natural também emite gases do efeito estufa, será apresentado pelo modelo econométrico posteriormente que essa mudança na matriz energética se converte em uma redução significativa nas emissões de gás carbônico pelo setor energético.

Figura 5 - Produção de energia aberto entre múltiplas fontes



Fonte: U.S. Energy Information Administration - Pew Research Center

Segundo o *Pew Research Center* o crescimento da energia solar acelerada, e o decréscimo da carbonífera, se dá por diversas políticas governamentais favoreceram fontes de energia mais sustentáveis como eólica e solar. Agregado com o fato do aumento dos preços do carvão, forçando ao governo adaptar sua matriz de produção energética para ser mais eficiente do ponto de vista de custos.¹⁶

Com isso, é notório que houve uma mudança na matriz energética dos Estados Unidos da América. Posteriormente veremos que essa mudança é refletida nas emissões de gás carbônico no setor, podendo assim ter um efeito positivo nos esforços contra o aquecimento global.

¹⁶ Pew Research Center. **Renewable energy is growing fast in the U.S., but fossil fuels still dominate.**

<<https://www.pewresearch.org/fact-tank/2020/01/15/renewable-energy-is-growing-fast-in-the-u-s-but-fossil-fuels-still-dominate/>> acesso em: 14 ago. 2022.

3 MERCADOS COMPETITIVOS E EXTERNALIDADES

Com a análise do aquecimento global, neste capítulo faremos as relações com alguns conceitos econômicos. Para isso, usaremos a abordagem de externalidades, compreender como as externalidades afetam esses mercados e como isso se reflete no mundo real; por fim, entenderemos como o aquecimento global se encaixa dentro do conceito de externalidades.

Para que possamos analisar de maneira completa o conceito de externalidade é preciso entender a ideia de direitos de propriedade. Esses direitos de propriedade, podem estar relacionados tanto para indivíduos quanto para o estado. Não é incomum escutarmos que uma das principais causas dos problemas ambientais é o próprio sistema econômico capitalista que a sociedade está inserida. A busca desenfreada por lucros das empresas leva a que as mesmas tomem decisões sem considerar o impacto que podem ter no meio ambiente e por consequência em outros agentes econômicos. Isso expõe que o sistema econômico capitalista gera necessidades de controle ambiental e políticas que busquem amenizar os efeitos causados pelo próprio (TIETENBERG, 2003).

Sendo assim, em seu livro *Environmental and Natural Resource Economics*, Tom Tietenberg descreve que a estrutura de direitos de propriedade que fornece uma alocação de recursos eficientes possui três características básicas:

1. Exclusividade - os custos e benefícios que são resultados do processo devem ser atribuídos única e exclusivamente ao dono do direito, tanto de maneira direta como de maneira indireta.
2. Transferibilidade - todos direitos de propriedade devem ter a possibilidade de serem transferidos entre agentes de maneira voluntária.
3. Exigibilidade - devem ser e estarem protegidos de apreensão ou invasão de outros de maneira involuntária.

Donos de um recurso que possuem direito de propriedade com essas três características, têm um incentivo muito forte para utilizar tal recurso de maneira eficiente, pois caso não o faça, isso irá representar uma perda potencial. Dentro dessa lista de características que determinam o direito de propriedade, a exclusividade é considerada a mais importante. Essa é muitas vezes violada no mundo real, isso ocorre quando o tomador de decisão, proprietário dos recursos, acaba não sendo o único que absorve as consequências do uso desses recursos, sendo assim se caracteriza uma externalidade.¹⁷

Tais externalidades podem acontecer entre produtores, consumidores ou entre consumidores e produtores. Elas podem ser tanto negativas, impondo um custo para a

¹⁷ TIETENBERG, Tom. **Environmental and Natural Resource Economics**. 5ª Edição. Editora: Addison Wesley Longman, 2000.

sociedade ou positiva, gerando benefícios para a sociedade (TIETENBERG, 2003). Nesse trabalho buscaremos focar nas externalidades negativas, como acredita-se que o aquecimento global gera custos imperceptíveis a nossa sociedade, por isso devemos estudar os impactos negativos causados por esse fenômeno e algumas soluções fornecidas pela microeconomia, buscaremos aqui especificamente entender como as externalidades negativas atuam no âmbito da produção, afetando os mercados competitivos e gerando ineficiências de mercado (MANKIW, 2001).

Uma externalidade negativa pode ser definida por um efeito, nesse caso de produção, que gera um custo em outro agente econômico não atrelado a essa produção inicial (TIETENBERG, 2003). Por exemplo, uma empresa siderúrgica ao produzir chapas de aço irá expelir gases nocivos na atmosfera -caso não haja regulação-, por consequência, pessoas que vivem na região terão uma tendência a desenvolver problemas respiratórios o que levará eles ao hospital, gerando assim um custo em saúde a outro agente econômico que não a indústria siderúrgica em questão, nesse caso isso é considerado uma ineficiência de mercado e buscaremos entender como isso afeta a economia como o todo.

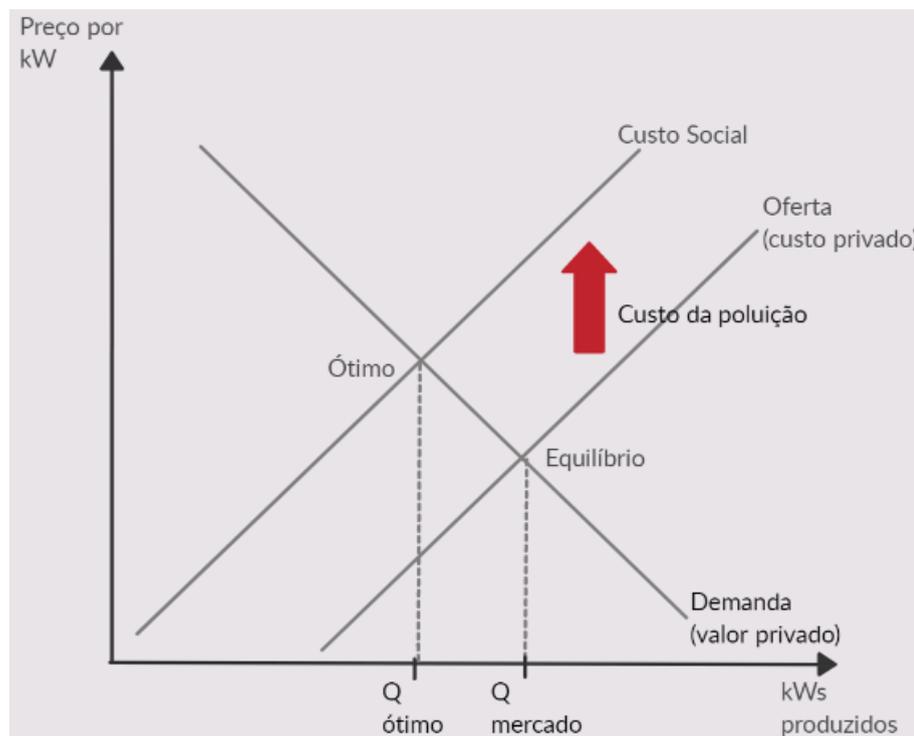
Mankiw, em seu livro *Principles of Microeconomics*, cita múltiplos exemplos de externalidades negativas e como essas afetam um mercado competitivo, um caso notório e relevante para esse trabalho, é como a emissão de gases pelos automóveis em uma cidade leva a uma piora na qualidade do ar e por consequência uma piora na qualidade de vida das pessoas. Esse é um clássico exemplo de externalidade causada pela emissão de gases; no caso buscamos entender não apenas as consequências diretas nas vidas das pessoas causadas pela emissão de gases nocivos, mas também os efeitos de longo prazo, como o aquecimento global. Posteriormente neste capítulo entraremos no tópico de como o aquecimento global pode ser compreendido como uma externalidade. Ainda nesse exemplo, Mankiw explica as possíveis medidas tomadas pelo governo para que possa se minimizar essa externalidade, nesse caso o governo pode estabelecer uma emissão padrão para os veículos ou impor uma maior tarifa na gasolina, reduzindo o número de veículos emitindo os gases, medida essa segunda já aplicada, mesmo que por objetivos diferentes ao controle do nível de emissões; primeiramente, antes de elaborarmos mais nessas possibilidades de intervenção para redução das externalidades negativas, temos que entender como os agentes econômicos são afetados por essas externalidades .¹⁸

¹⁸ MANKIW, Gregory. **Principles of Microeconomics**. 2ª Edição. Editora: South-Western College Pub, 2000.

É possível ainda compreender como as externalidades negativas no âmbito da produção, foco deste trabalho, afetam o equilíbrio de mercado. Por exemplo, segundo a EIA - administração de informação energética dos Estados Unidos - a produção de energia por meio da queima de combustível fóssil é a maior emissora dentro das múltiplas maneiras de produção de energia, sendo assim, para cada kW de energia produzida por essa fonte, uma certa quantidade de CO_2 é emitido na atmosfera, estas emissões possuem consequências diretas por meio da diminuição da qualidade do ar ou piora da qualidade de afluentes da região, assim como consequências indiretas de longo prazo por meio do aquecimento global. Considerando que há um custo a sociedade dessa produção, o custo social da produção dessa energia inclui, além do custo de produção dela, mas também o custo para a sociedade, na Figura 6, demonstrando as curvas de oferta e demanda atrelado a uma planta carbonífera, é possível ver como isso afeta o equilíbrio de mercado. Sendo assim, é possível ver que se a produção de energia não considerar o custo dessa externalidade, nomeado aqui de custo social, haverá então uma ineficiência de mercado.¹⁹

¹⁹ U.S. Energy Information Administration. **U.S. energy facts explained.**
<<https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/>> acesso em: 13 ago. 2022.

Figura 6 - Poluição e o ótimo social

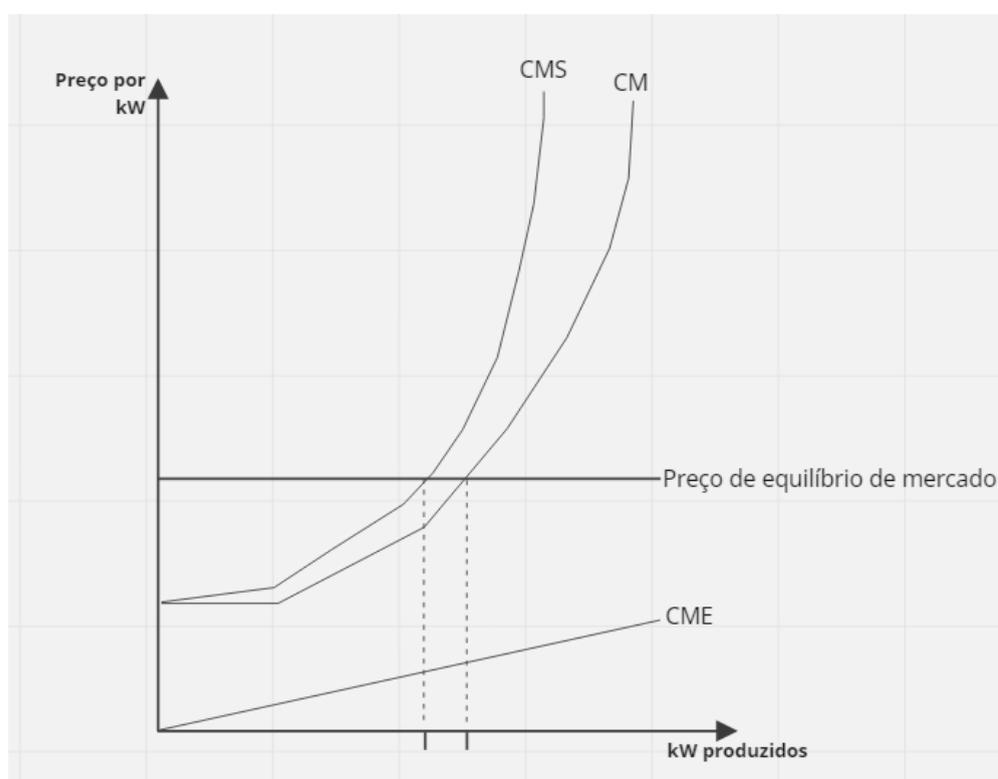


Fonte: Environmental and Natural Resource Economics, Tietenberg (2003). Elaborado pelo autor (2022).

Com isso, pode-se observar que a externalidade da poluição modifica o equilíbrio de mercado que deve ser produzido. Um planejador, usualmente associado ao governo, buscaria então manter a produção dessa planta específica nos níveis em $Q_{ótimo}$, ao contrário do $Q_{mercado}$ normalmente produzido por essa planta carbonífera, ele não produziria a mais que isso pois o custo social de produzir mais energia excede o valor visto pelos consumidores (TIETENBERG, 2003). Sendo assim, para se chegar no ótimo social, é preciso que a produção de kW seja menor do que a proposta pelo mercado, dessa maneira, como o planejador pode fazer com que a produção seja o ótimo e não o de mercado? Uma maneira seria limitar a produção de energia produzida, o planejador poderia obter esse resultado impondo uma taxa sobre a produção de energia buscando elevar a curva de oferta para os mesmos níveis da curva de custo social, fazendo assim que o novo Q de mercado seja igual ao $Q_{ótimo}$. Outras abordagens para a redução dos efeitos do custo da poluição podem ser tomadas, mas para que possamos entender por completo seus efeitos no mercado produtivo, precisamos analisar os efeitos das externalidades na ótica da firma, entendendo seus efeitos nas curvas de custo marginal.

Para isso, utilizaremos da mesma planta de produção que utilizamos no exemplo anterior, mas agora podemos ver na Figura 7 como o gráfico de decisão de produção em um mercado competitivo dessa firma se dá com a intervenção da externalidade negativa da poluição causada por ela mesma. Para esse exemplo, nós consideramos o preço como uma variável constante dada o preço de mercado quando a produção está no $Q_{mercado}$ vista na Figura 6. Outra suposição feita é que a única maneira que possa reduzir a quantidade de emissões é havendo a redução da produção de kW pela planta carbonífera.

Figura 7 - Poluição e custo marginal



Fonte: Microeconomics, Pindyck (1994). Elaborado pelo autor (2022).

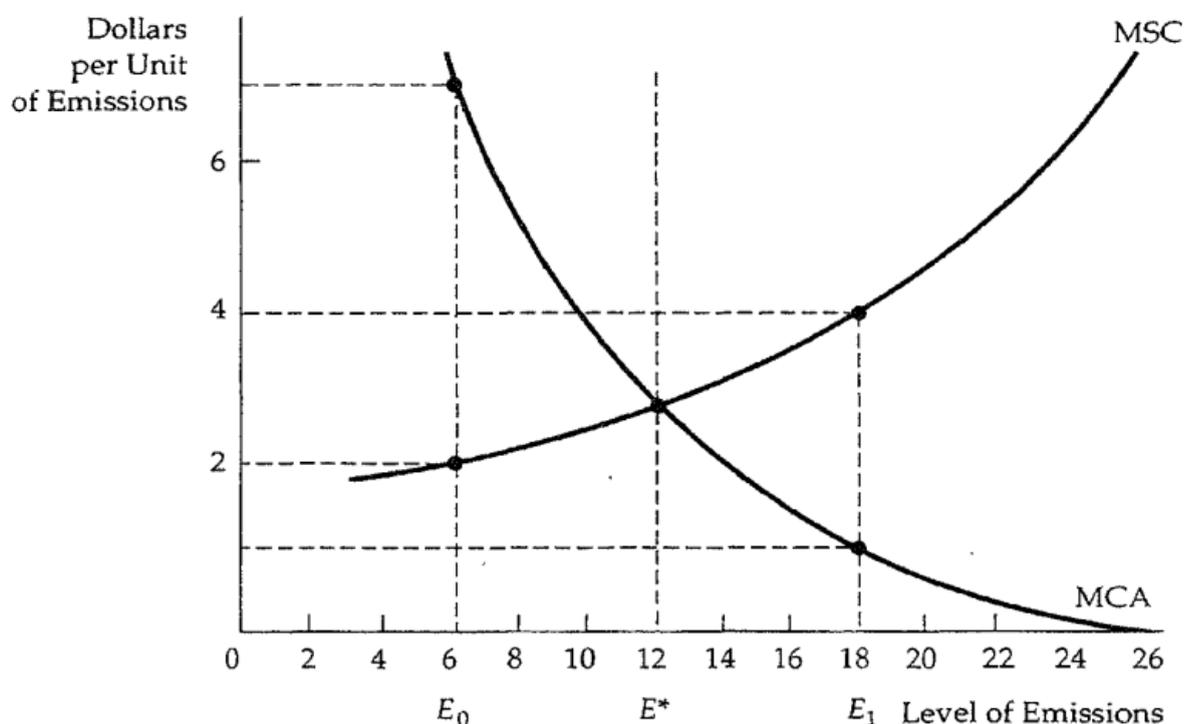
Na Figura 7, a curva CM é indicada como o custo marginal da empresa para a produção de kW, a curva CMS significa custo marginal social associado à produção; no caso, é o custo marginal somado ao custo marginal externo, representado pela linha CME. Sendo assim, se somarmos CM a CME iremos obter CMS, contudo quando o tomador de decisão da firma decide seu nível de produção ele decide por produzir a quantidade relativa ao custo marginal, e não ao custo marginal social; por sua vez, o custo social da externalidade que deve ser corrigido, e é ignorado pelo tomador de decisão da firma, é o da curva CME, que indica o custo das emissões da planta carbonífera. Sendo assim, o custo marginal real da produção é

dado por CMS, mas o nível de produção se encontra relativo a CM, resultando da quantidade $Q_{mercado}$ da Figura 6, levando assim uma produção mais elevada, reduzindo o ótimo social, caracterizando assim uma ineficiência de mercado. Uma das consequências microeconômicas disso, é que quando os custos marginais de produção são maiores que o preço de mercado de um item, algumas empresas devem sair desse mercado, mas nesse caso com o custo da externalidade, algumas empresas que deveriam sair do mercado pois o CMS é maior que o preço de mercado acabam continuando no mercado pois operam utilizando a linha CM para sua tomada de decisão (PINDYCK, 1994).

Então cabe a pergunta, como a ineficiência que resulta da externalidade pode ser remediada? Dado as suposições que tomamos para formar a Figura 7, a única maneira que um planejador pode ter para reduzir as emissões de uma indústria, e por consequência reduzir os efeitos da sua externalidade, é por meio de incentivos a redução da sua produção, mas como é possível fazer isso? O governo, ou aqui chamado planejador, pode se utilizar de políticas de mercado, em conjuntura com incentivos privados para gerar o efeito desejado (MANKIW, 2001). Aqui, iremos analisar duas maneiras para que se possam reduzir as produções da indústria, primeiramente por meio de taxas por emissões - impondo um custo atrelado a quanto a firma emite na atmosfera -, e também iremos revisar a medida de padrão de emissões, que determina um limite de emissões que pode ser feito.

Consideremos novamente nossa planta carbonífera, emitindo gases que consequentemente acarretam em externalidades negativas para a população local em conjuntura com o agravamento do aquecimento global. Na Figura 8, é apresentado no eixo horizontal que representa a quantidade emitida pela indústria, e essa indústria pode reduzir essas emissões, mas apenas com um custo, demonstrado no eixo vertical.

Figura 8 - Nível eficiente de emissões



Fonte: Microeconomics, Pindyck (1994).

A curva MSC significa *Marginal Social Cost of Emissions* (Custo marginal social das emissões) e representa o custo da externalidade para a sociedade associado às emissões, e é um equivalente da curva CME mencionada na Figura 7. A curva MSC tem uma inclinação para cima porque o custo marginal da externalidade é maior quanto maior essa externalidade se torna (estudos evidenciam que pequenos níveis de poluição causam pouco impacto na sociedade, entretanto os danos para a sociedade crescem substancialmente com o crescimento da poluição)(PINDYCK, 1994).

A outra curva nomeada MCA significa *Marginal Cost of Abating Emissions* (custo marginal para abater as emissões), ele mede o custo adicional que a firma terá para instalar equipamentos a fim de medir suas emissões e as medidas necessárias para reduzir as mesmas. Essa curva tem uma tendência decrescente porque quando a redução nas emissões estiver operando em um nível baixo de emissões o custo para fazê-las será elevado, por exemplo, pode-se optar por reduzir as emissões durante o período da noite na fábrica, momento o qual se demanda menos produção de energia, entretanto como o nível de produção é baixo a redução proporcionalmente também será (PINDYCK, 1994); por outro lado, ao tentarmos

reduzir substancialmente as emissões, operando assim em um cenário onde o nível de emissões já é mais elevado, o custo será maior.

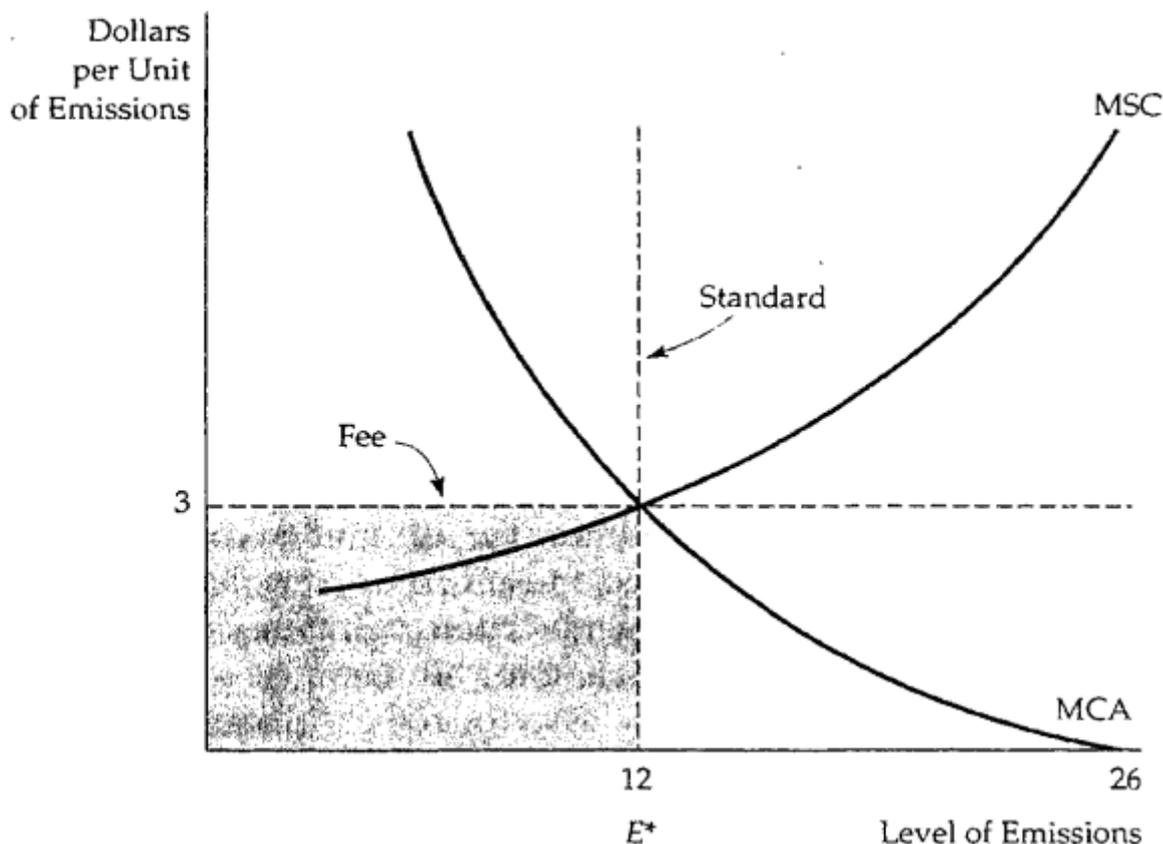
Nesse exemplo específico da Figura 8, quando as emissões estão no nível 26, é quando a firma estará obtendo seu máximo de lucro; mas, o nível eficiente para esse mercado específica seria 12 unidades, no ponto E^* , onde o custo marginal social das emissões (MSC) é igual ao custo marginal para abater as emissões (MCA). Caso as emissões fiquem abaixo de E^* , por exemplo E_0 o custo marginal social das emissões ficaria abaixo do custo marginal para abater as emissões, sendo assim as emissões estão muito baixas, e conseqüentemente poderia estar sendo produzido mais; caso contrário e as emissões estiverem no nível de E_1 teremos o caso inverso, e as emissões estão muito altas, em ambos os casos podemos considerar que está havendo uma ineficiência de mercado, no primeiro caso a sociedade estaria operando com um nível de oferta de energia abaixo do ideal e no segundo caso a sociedade estaria sentindo os impactos de um nível elevado de emissões, gerando conseqüências como as citadas anteriormente (PINDYCK, 1994).

3.1 PADRÃO DE EMISSÕES VS TAXAS POR EMISSÃO

O padrão de emissões é um método em que o planejador, no caso o governo, estabelece um máximo que pode ser emitido pela indústria, caso a firma ultrapasse esse limite pré-estabelecido a empresa pode sofrer penalizações graves.

Na Figura 9, uma variação da Figura 8, um padrão de emissão é determinado em E^* , impondo que as firmas mantenham seus níveis de emissão em 12 ou menos. Conseqüentemente as empresas terão que arcar com os custos para o monitoramento de suas emissões e para a diminuição das mesmas, reduzindo assim suas produções.

Figura 9 - Padrão de emissões



Fonte: Microeconomics, Pindyck (1994).

Outra solução para a redução da produção de uma indústria, e por consequência haver a redução de suas emissões, é incorporando uma taxa por emissão, ou taxa por produção, muitas vezes conhecida como *Pigovian tax*. Ela consiste em inserir artificialmente um custo por unidade produzida que levará ao mercado a uma produção ótima onde se maximiza o custo social, seria no caso da Figura 2 mover a produção do $Q_{mercado}$ para o $Q_{ótimo}$. Nesse exemplo demonstrado na Figura 9, a taxa incorporada seria de 3 para cada unidade produzida, consequentemente as firmas iriam alterar a sua produção de 26 para 12 para maximizar seu lucro dado o novo custo marginal artificialmente inflacionado devido a taxa.²⁰

Agora cabe uma pergunta importante, qual das duas é melhor? Qual é mais eficiente? De acordo com Mankiw, em seu livro princípios de microeconomia, ele afirma que a grande maioria dos economistas escolheria a taxa, que por sua vez pode determinar com exatidão a poluição desejada, ao extremo de que se a taxa for alta o suficiente, a poluição seria reduzida

²⁰ PINDYCK, Robert; RUBINFELD, Daniel. **Microeconomics**. 8ª Edição. Editora: Pearson Universidades, 2013.

a zero; é verdade também que o mesmo pode ser feito por meio de padrões de emissões, entretanto acredita-se que a *Pigovian tax* possa ser mais eficiente.²¹

Ainda segundo Mankiw, a principal razão para que os economistas escolham a taxa em contrapartida do padrão, é que com o padrão, todas as empresas teriam que reduzir suas emissões na mesma quantidade, mas não necessariamente pelo mesmo preço, o processo pode se tornar mais custoso para algumas empresas, e para essas pode se tornar mais rentável o pagamento da multa ao contrário de realizar a redução em primeira instância planejada. Por sua vez, ao utilizar-se da taxa, é colocado um preço na poluição, conseqüentemente a poluição é realocada para aquelas empresas que possuem os maiores custos para reduzir a mesma, fazendo com que em um nível agregado se atinja o mesmo nível de emissões desejado, mas em um nível individual haverá múltiplos níveis de emissão; sendo assim, obtém-se o mesmo resultado com um custo menor no total se aplicarmos a taxa e não o padrão.

3.2 AQUECIMENTO GLOBAL E EXTERNALIDADES

Dado a interpretação econômica das externalidades, em alguns exemplos anteriores, demonstramos os efeitos esperados teoricamente falando das emissões de gases do efeito estufa. Contudo, é relevante que demonstramos, mesmo que de maneira breve, os efeitos colaterais do aquecimento global, efeito indireto e de longo prazo das emissões de gás carbônico na atmosfera. Para isso é importante lembrar que a definição básica de uma externalidade negativa, no âmbito da produção, segundo economistas, é que como consequência da produção há um custo social atrelado a essa produção que não afeta a própria indústria que produziu o bem que gerou a poluição.

Para isso, consideremos nossa mesma planta de produção de energia carbonífera, mas ampliaremos nosso escopo para a produção nacional, no caso as emissões da produção de energia terão um impacto não só direto na qualidade do ar dos arredores, mas também no aumento da temperatura do planeta, como consequência do gás carbônico acumulado na atmosfera como explicado anteriormente neste trabalho. Esse aumento de temperatura, acarreta em diversas consequências que afetam agentes econômicos que não as plantas carboníferas, exibiremos algumas dessas consequências do aquecimento global e como essas afetam seus respectivos agentes econômicos.

Segundo o quarto relatório do IPCC, as emissões de gás carbônico impactam o clima negativamente. E o aumento da concentração de gases do efeito estufa, tornam mais comuns a

²¹ MANKIW, Gregory. **Principles of Microeconomics**. 2ª Edição. Editora: South-Western College Pub, 2000.

ocorrência de desastres naturais, como inundações, secas e ondas de calor, assim como aumento de mortalidade e uma queda considerável na biodiversidade do planeta.²² Por sua vez, essas consequências possuem custos econômicos, como a queda de produtividade da economia mundial, além dos custos para o reparo dessas múltiplas catástrofes. É possível compreender que o clima global é um bem público, como os benefícios e consumo não excluem o uso de outras pessoas. Consequentemente isso representa uma ineficiência de mercado dado que os agentes econômicos não percebem o impacto de suas ações sobre outros agentes.²³

Em 2008, no seu aniversário de 60 anos, a Organização Mundial da Saúde (OMS) elegeu um tema como relevante para o debate ao longo do ano: “*O impacto do aquecimento global na saúde*”. Nesse mesmo ano, a Folha de São Paulo apresentou que a OMS estima que um aumento de 1°C pode acarretar em aproximadamente 20 mil mortes a mais por ano. Isso ocorre pois, ainda segundo a OMS, doenças como a malária e a dengue estão correlacionados com a temperatura do planeta, dito isso, caso o aquecimento global continue a tendência demonstrado até agora em 2080 os casos de dengue podem chegar a 2 bilhões por ano, atualmente em 50 milhões. Pela lógica demonstrada anteriormente é possível entender como nesse aspecto podemos considerar o aquecimento global como externalidade, com o aumento de casos das doenças e fatalidades, haverá um custo tanto para os indivíduos e famílias afetados por essas doenças, e também para o sistema público ou privado de saúde que irá aumentar seus investimentos para comportar o aumento de casos.²⁴

Outro problema relacionado ao aquecimento global é o derretimento das calotas polares do ártico e do Antártico. Um estudo realizado, entre 1998 pelo grupo *Son Nghiem*, do Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da NASA (Agência espacial dos EUA), e nesse estudo se observou que a quantidade de gelo sendo derretido anualmente no verão tem crescido ano após anos, isso gera consequências por que no momento em que essas geleiras forem congeladas novamente, pode-se verificar uma série de rachaduras que aumentam a superfície de contato dessas geleiras, acarretando em uma maior velocidade de degelo. Em 2005, a Folha de São Paulo, em um artigo nomeado “Derretimento de neve no continente equivale a um

²² IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 104, 2007. <<https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>> acesso em 01 ago. 2022.

²³ REZAI, Armon; FOLEY, Duncan; TAYLOR, Lance. **Global Warming and Economic Externalities**. *Economic Theory*, v. 49, n. 2, 2017. A definição de um bem público pode ser encontrada em MANKIWI, Gregory. **Principles of Microeconomics**. 2ª Edição. Editora: South-Western College Pub, 2000, p. 225-242

²⁴ Folha de São Paulo. **Aquecimento global agrava epidemias, afirma OMS**. 8 abr. 2008, p. A-10.

estado de SP em 2005” apresentou outro estudo realizado, dessa vez pelo Serviço Antártico Britânico, entre 1993 e 2003, constatou que massas continentais de gelo movem-se rapidamente em direção aos oceanos, demonstrando um aumento de cerca de 12% no período. Esses derretimentos, por mais que distantes de nossa realidade cotidiana, possuem um impacto direto em cidades costeiras do mundo todo, segundo o site *Climate Central*, é possível ver com imagens como cidades podem ser afetadas pelos níveis altos do mar, na Figura 10 podemos como a cidade de Porto Alegre seria afetada com um aumento de 4°C na temperatura média da terra, consequentemente derretendo diversas calotas polares e geleiras, aumentando assim o nível do mar.²⁵

Figura 10 - Impacto do aumento do nível do mar em Porto Alegre



Fonte: Climate Central

Com essa imagem, é possível compreender que múltiplos agentes podem ser afetados pelo aumento no nível do mar, múltiplas famílias que moram perto da Orla do Guaíba precisam ser realocadas, o Beira-Rio, estádio do Internacional, possível de ver na imagem, se tornaria inutilizável, assim como todo impacto na infraestrutura pública da região; sendo assim, o aumento no nível do mar possui um impacto em múltiplos agentes econômicos que não os geradores das emissões de gás carbônico e como consequência o aquecimento global.

²⁵ Folha de São Paulo. **Derretimento de neve no continente equivale a um Estado de SP.** 17 mai. 2005, p.A-12.

Em um estudo realizado pela revista inglesa *Nature*, é demonstrado que há uma perda de cerca de 30% das forças das correntes do Atlântico são consequência também do aquecimento global. Essas correntes possuem duas grandes funções para a sociedade, uma é o transporte marítimo de mercadorias, que poderia ser afetado pelo enfraquecimento das mesmas, outro impacto que teríamos, é que as correntes marítimas são responsáveis pela harmonia climática do planeta, nesse caso um enfraquecimento poderia fazer com que, por exemplo, Londres entrasse em uma era glacial.²⁶

Um exemplo extremamente relevante para o Brasil, é que o aquecimento global pode afetar de forma significativa o agronegócio. O aumento da temperatura da terra, pode afetar diretamente a sobrevivência de diversas espécies do planeta, inclusive a de diversas árvores, e as diversas florestas do planeta possuem uma função primordial de proteger o solo dos raios solares, que caso não possua a proteção da copa das árvores pode ressecar o solo, diminuindo sua capacidade de absorção de água, prejudicando os lençóis freáticos, piorando significativamente a qualidade do solo beneficiada por ele, resultando em um solo que precisará de muito mais cuidados para tornar o plantio possível e lucrativo.²⁷

Pesquisas como Nordhaus e Boyer (2000), Nordhaus (2008) e Stern (2007) analisaram as consequências econômicas do aquecimento global. Dado a ineficiência causada pela acumulação de gases do efeito estufa na atmosfera, a geração atual tem um acumulado um excesso de estoque de capital, enquanto que gerações futuras terão as consequências de um “estoque” de CO₂ maior na atmosfera. O problema que se propõe por sua vez é a troca intergeracional entre o investimento que tem que ser feito pela geração atual para que as gerações futuras tenham o malefício de conviver com o aquecimento global de maneira mais acentuada (REZAI,2017).

Esse problema se dá pois os tomadores de decisão, aqueles responsáveis por dividir os preços nas cotas de carbono e as multas por excesso de emissões, devem compreender o quanto a geração atual está disposta a investir para que as gerações futuras tenham o efeito do aquecimento global mitigadas. De fato, não existem diferenças em investimentos intergeracionais com foco ambiental e com foco tradicional, por exemplo um investimento atual em educação básica pode ter um impacto geracional que não na sociedade atual, mas sim em gerações futuras. Entretanto o ponto do investimento para mitigação do aquecimento global se dá pelo impacto iminente do fenômeno, e como mostrado anteriormente, caso não

²⁶ SIRVINSKAS, Luís Paulo. **Externalidades Negativas do Aquecimento Global**. Revista Justitia. Interesses Difusos e Coletivos. São Paulo, v. 65, p. 199 -222, 2008.

²⁷ CLINE, William. **Global Warming and Agriculture**. v.45, n.1, p.A007, 2008.

seja endereçado de maneira correta as consequências podem ser drásticas para a sociedade (FOLEY, 2007).

No artigo *Global Warming and Economic Externalities*, Armon Rezai, calcula que os ganhos de produção em caso de investimento intergeracional são grandes, enquanto o custo para isso seria relativamente baixo, segundo o autor. No caso, para se retornar ao nível de CO₂ que eram encontrados pré-industrialização seriam necessários aproximadamente 2% do PIB mundial no máximo.²⁸

Sendo assim, é notório que o aquecimento global possui impacto tanto na produção global quanto em outros agentes econômicos. O caracterizando dessa maneira como uma externalidade. Com isso, as medidas que falamos anteriormente poderiam ser usadas como mecanismos de política econômica para a mitigação dessas emissões.

²⁸ REZAI, Armon; FOLEY, Duncan; TAYLOR, Lance. **Global Warming and Economic Externalities**. *Economic Theory*, v. 49, n. 2, 2017.

4 METODOLOGIA E BASE DE DADOS

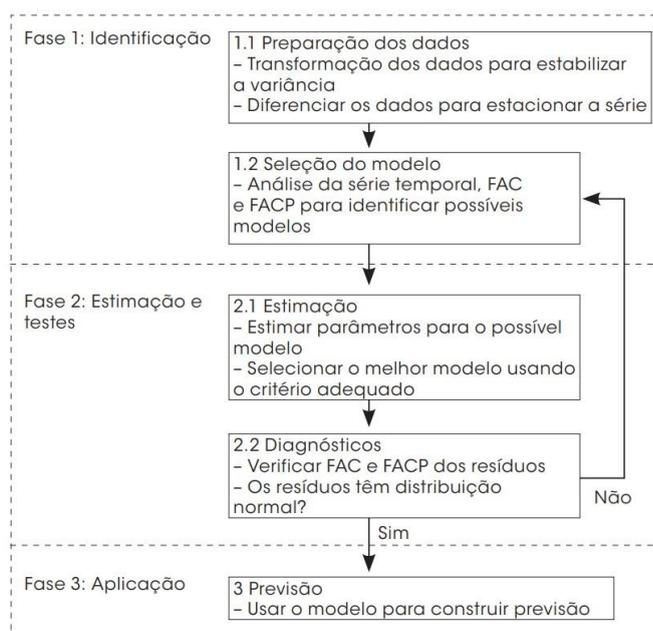
4.1 INTRODUÇÃO

Nessa seção, apresentaremos a metodologia utilizada durante o trabalho, tanto o método Box-Jenkins quanto os modelos SARIMA; o conceitual teórico, o método de Wold, por trás dos modelos que serão posteriormente utilizados. Também iremos observar a base de dados da *Energy Information Administration* (EIA) que será utilizada no trabalho, iremos ver sua estrutura e dados disponíveis.

4.2 BOX-JENKINS

O método Box-Jenkins consiste basicamente em um passo-a-passo para estimação de um modelo de previsão de série temporal.²⁹ Podemos dividi-lo em três etapas simples: identificação do modelo, estimativa dos parâmetros e diagnóstico, representadas na Figura 11.

Figura 11 - Etapas do método Box-Jenkins



Fonte: Aplicação de um modelo SARIMA na previsão de vendas de motocicletas (2013).

Na etapa de identificação, temos primeiramente que preparar os dados, estacionarizar a série, retirando qualquer quebra como sazonalidade, tendência ou quebra estrutural que possamos ter.

²⁹ MAKRIDAKIS, Spyros G.; WHEELWRIGHT, Steven C.; HYNDMAN, Rob J. **Forecasting: Methods and Applications**. 3ª edição. Editora: Wiley, p. 13-16, 1997.

Em seguida, escolhemos nosso modelo usando, tradicionalmente, as funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP), ou podemos utilizar o AIC para determinar nosso melhor modelo.

Após identificado o modelo, devemos então realizar a estimação dos parâmetros, e posteriormente o diagnóstico se nosso modelo se adequa a base de dados encontrada.

Por fim, usaremos de nosso modelo com diagnóstico positivo, isso quer dizer um modelo que passou nos testes propostos e que se adequa a base de dados, para fazer uma previsão de informações futuras e então poderemos realizar considerações em cima disso.

Caso o modelo não seja adequado, caso não passe nos testes de diagnóstico, devemos retornar a primeira etapa para que estimamos um novo modelos que se adéque a base de dados e tenha parâmetros consistentes.

4.2.1 Estacionariedade

Precisamos discutir brevemente do que se trata estacionariedade e como iremos testá-la daqui para frente. Um processo estacionário tem a propriedade de que a média, variância e estrutura de autocorrelação não mudam no decorrer do tempo. Simplificando, buscamos uma série plana, sem muitas variações e sem influências periódicas (sazonalidade).

Para isso, é possível identificarmos tais fatores visualmente no gráfico da série, mas também podemos testar a estacionariedade, no caso deste trabalho estaremos usando o teste Dickey Fuller aumentado para raiz unitária, para fins práticos, o Python consegue fazer esse teste apenas usando uma função, mas sua definição matemática se dá pelo estudo da seguinte regressão:

$$\Delta y_t = \beta_1 + \beta_2 + \delta y_{t-1} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Nesse caso a hipótese nula é dada por $H_0: \delta = 0$. Para isso, fazemos a regressão de Δy_t em relação Δy_{t-1} e temos a estatística T^{30} definida por:

$$T = \frac{\hat{\delta}}{se(\hat{\delta})} \quad (2)$$

³⁰ Não *t-student*

Onde $\hat{\delta}$ é estimador para δ e $\hat{\delta}$ é um estimador para desvio padrão do erro de δ . Testaremos assim o nosso T calculado contra os valores tabulados por Dickey e Fuller para então definirmos se nossa série é estacionária e se podemos modelá-la.

4.3 MODELO SARIMA

Agora, precisamos entender um pouco o conceitual teórico por trás do modelo, ou modelos, que estimaremos; no caso, utilizaremos do conceitual teórico por trás dos modelos ARIMA, amplamente difundido e aplicado por economistas como Damodar N. Gujarati em seu livro sobre econometria básica.

O modelo Autorregressivo Integrado de Média Móvel – Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) é um procedimento popular entre os modelos estatísticos de análise de séries temporais (LEE; KO, 2011). Box e Jenkins na década de 1970 introduziram esses modelos ao unirem os modelos autoregressivos (AR) e os de média móvel (MA), criando assim os modelos ARMA; introduziram ainda modelos com séries não-estacionárias (ARIMA) e ainda com o fator de sazonalidade (SARIMA).

O modelo AR(p) qualquer valor da série é determinada por uma soma dos valores anteriores de ordem p, e mais um ruído branco, segundo Lee e Ko (2011), a equação de um modelo auto regressivo de ordem p [AR(p)] é dada por:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t \quad (3)$$

Onde p é o grau de auto regressão, Z a série temporal, do período a ser calculado em questão, ϕ são os parâmetros e a_t é um ruído branco de média 0 e variância 1. Podemos escrever o modelo também por:

$$\phi_p(B)Z_t = a_t \quad (4)$$

Em que B é o operador de defasagem para Z.

O modelo MA(q) também se utiliza dos períodos anteriores para fazer as previsões dos períodos atuais. Contudo, se utiliza da autocorrelação dos seus resíduos do período atual com aqueles anteriores para fazer uma previsão. De acordo com Lee e Ko (2011), a equação de um modelo MA de ordem q se dá por:

$$Z_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (5)$$

Em que q é a ordem de MA(q), θ são os parâmetros do modelo. Podemos tentar reescrever o modelo por:

$$Z_t = \theta_q(B)a_t \quad (6)$$

Nessa, adicionamos de novo o operador B de defasagem.

Com isso, podemos adicionar as equações (4) e (6) para que então criemos um modelo mais completo, um modelo ARMA(p,q):

$$\phi_p(B)Z_t = \theta_q(B)a_t \quad (7)$$

Os modelos ARMA(p,q) são utilizados quando possuímos uma série estacionária, ou seja, medidas estatísticas como média, variância e covariância permanecem constantes ao longo do tempo. Entretanto, se nossa série não é estacionária, teremos que tomar certas medidas, que veremos posteriormente para torná-la estacionária. Uma das medidas que podemos tomar para estacionarizar nossa série é a adição de diferenciação em nosso modelo, criando assim um modelo ARIMA(p,d,q), que se dá pela equação:

$$\phi_p(B)\Delta^d Z_t = \theta_q(B)a_t \quad (8)$$

Nesse caso, é a ordem de diferenciação.

Por fim, há algumas séries temporais que possuem padrões de repetição em um certo intervalo de tempo; podemos chamar isso de um efeito que acontece sazonalmente, isso é muito comum na vida cotidiana, pois certos efeitos e produtos acontecem com um determinado intervalo de tempo ou com uma data específica. Sendo assim, Box e Jenkins generalizam o modelo ARIMA e integram a sazonalidade, incorporando e trazendo a tona o modelo SARIMA(p,d,q)(P,D,Q), que pode ser representado por:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^S)\Delta^d \Delta_S Z_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^S)a_t \quad (9)$$

Nesse caso vemos que o operador Δ_S é o operador de sazonalidade para diferenciação, $\Phi_P(B^S)$ é o operador de sazonalidade Auto regressivo de ordem P e o operador $\Theta_Q(B^S)$ é de sazonalidade da parte MA(q) do nosso modelo.

Com isso, temos definido o conceitual teórico do modelo que abordaremos para a modelagem das emissões de gás carbônico pelo setor de produção de energia dos EUA.³¹

³¹ LEE, Cheng-Ming; KO, Chia-Nan; **Short-term load forecasting using lifting scheme and ARIMA models.** Journal of Expert Systems with Applications, v. 38, n.5, p. 5902-5911,2011.

4.4 BASE DE DADOS

A base de dados é composta por observações ao longo do tempo do somatório das emissões de gases nos EUA, pode-se encontrar para ter acesso a elas nas referências deste trabalho pelo nome de "Carbon emissions from electricity production"; na base, possuímos a divisão dos dados por produção energética, a estrutura da base pode ser vista abaixo na tabela 2:³²

Tabela 2 - Base de dados - estrutura dos 5 primeiros dados

YYYYMM	Value	Description
197301	72.076	Coal Electric Power Sector CO2 Emissions
197302	64.442	Coal Electric Power Sector CO2 Emissions
197303	64.084	Coal Electric Power Sector CO2 Emissions
197304	60.842	Coal Electric Power Sector CO2 Emissions
197305	61.798	Coal Electric Power Sector CO2 Emissions

Fonte: Elaborado pelo autor.

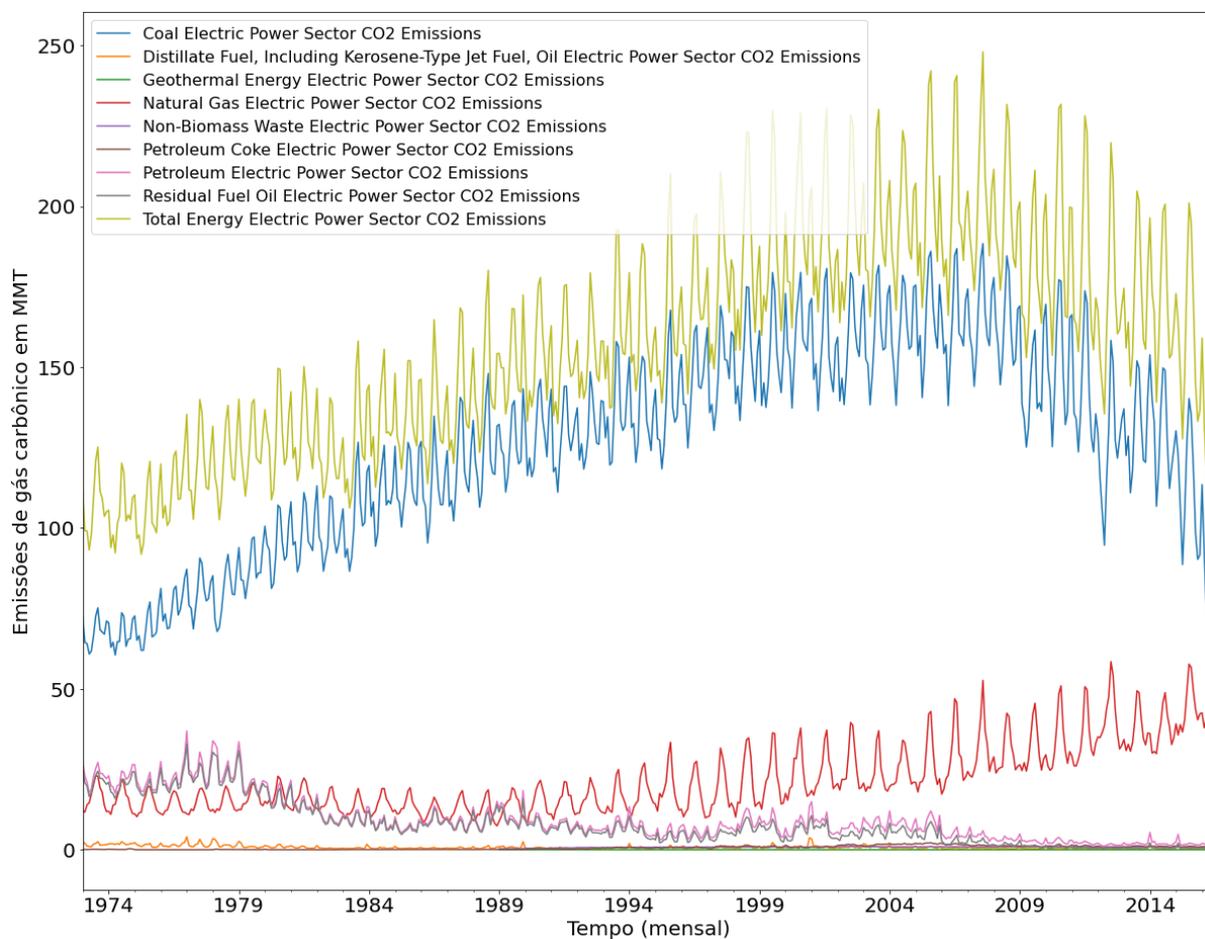
Na coluna YYYYMM temos a data dos nossos registros, na formatação AnoMês, na coluna *Value* temos os valores registrados em cada período para cada produção, que está registrado na coluna *Description*, onde está relatado a qual setor está relacionado aquele valor de emissão. Ao fazermos as transformações necessárias para que o Python consiga ler a base de dados e posteriormente eliminarmos os valores nulos ficamos com uma base com 4323 valores ao todo.

Com isso, agora podemos analisar nossa base para começarmos a tomar a decisão da modelagem. Em primeiro lugar, precisamos decidir qual série temporal iremos modelar; quero dizer, qual setor de produção energética iremos decidir para criação do nosso modelo. Na Figura 12, é possível vermos a diferenciação de cada um dos setores. No gráfico (Figura 12) podemos ver que o principal causador do é pela queima de carvão para produção de energia. Podemos observar também uma tendência de queda nos últimos anos do somatório total, muito em decorrência da queda de produção pelo setor carbonífero como verificado anteriormente neste trabalho; em contraste, vemos um crescimento das emissões pelo setor de gás natural; entretanto, esse gráfico é insuficiente para tomarmos uma decisão do que devemos modelar, ou para entendermos a estrutura das emissões de CO₂, para isso, podemos

³² U.S. Energy Information Administration. **Carbon dioxide emissions from electricity generation.** <<https://www.eia.gov/electricity/data.php#elecenv>> acesso em: 21 jul. 2022.

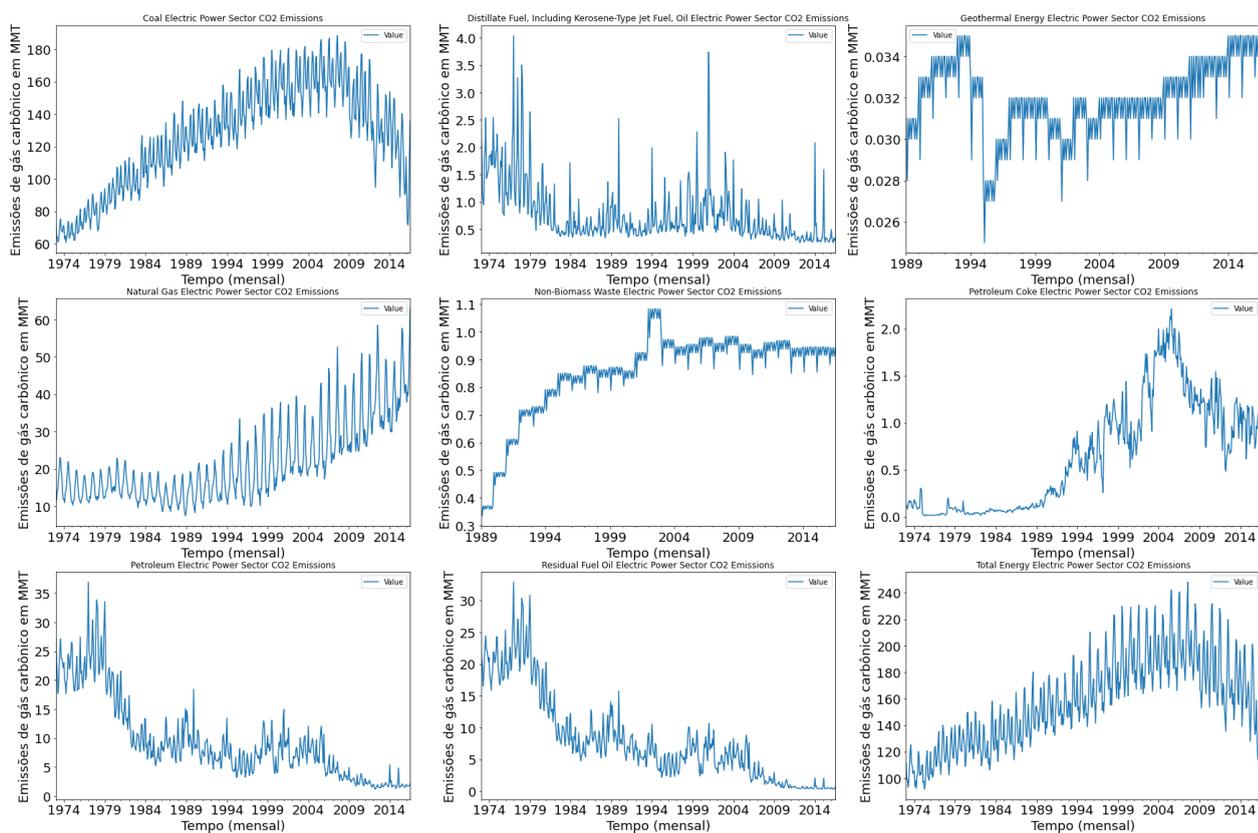
ver a Figura 13, onde temos separados as emissões por seus setores, podendo assim ver mais adentro as tendências.

Figura 12 - Emissões por setores energéticos com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Emissões por setores energéticos com base em dados da EIA: aberta por tipo de produção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13 podemos ver que há um contraste entre setores onde está havendo a queda das emissões, como o do carvão, óleo e petróleo, enquanto há outros que crescem, como o de massa não biológica ou gás natural. Contudo, aqueles que crescem são de menor impacto para a estrutura de emissão americana; portanto, com essa visualização, trabalharemos com os dados da totalidade emitida.

5 MODELAGEM

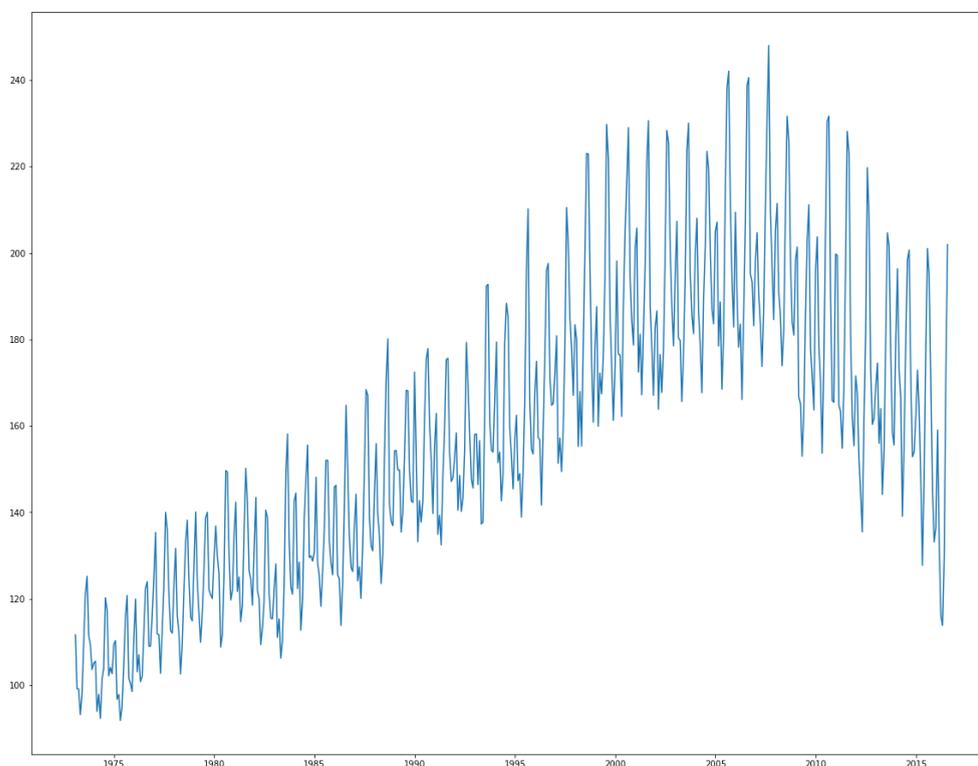
5.1 INTRODUÇÃO

Com a compreensão da metodologia, iremos agora demonstrar os fatores que tornam a nossa série não-estacionária encontrados em nossa série e as múltiplas ferramentas que utilizamos para corrigir essa característica, buscaremos aqui também mostrar os cálculos e métodos utilizados para definição dos modelos, e por fim mostrar o modelo SARIMA escolhido.

5.2 MODELAGEM

Com a nossa série escolhida, podemos começar a aplicar o método Box-Jenkins para modelagem da mesma. Na Figura 14, podemos observar nossa série agora isolada e podemos começar a fazer suposições sobre a sua estrutura, podemos ver claramente que temos uma tendência, indicado pelo aumento ao longo do tempo e depois uma queda em nossa série e que temos provavelmente sazonalidade, indicados pelos picos intervalados. Para termos mais certeza, é possível ver na Figura 15 a nossa série em contraste com sua média móvel e sua variância ao longo do tempo.

Figura 14 - Total de Emissões pelo setor energético dos EUA com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

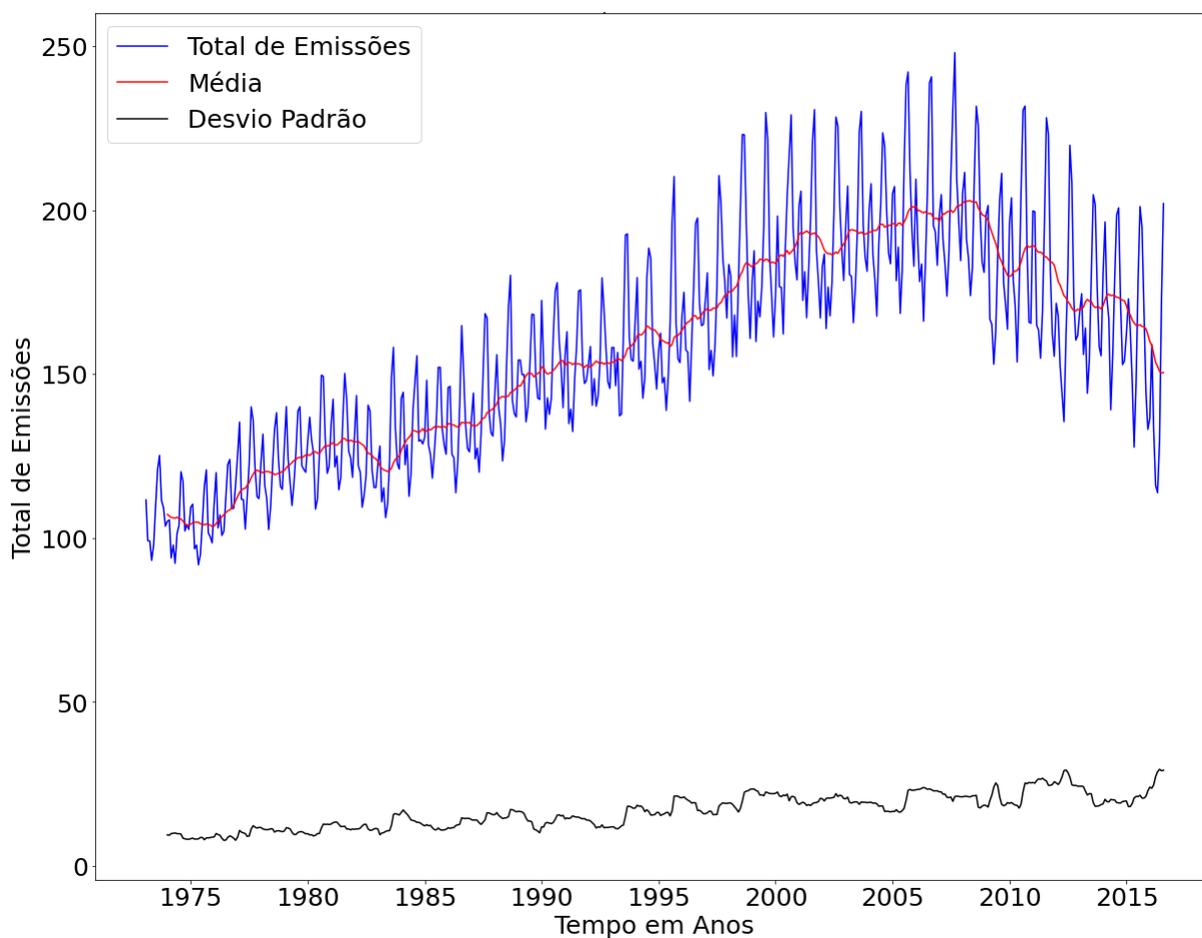
Rodando um teste Dickey-Fuller aumentado (ADFuller ou ADF) obtemos os resultados apresentados na tabela 3, que demonstram fracas evidências contra a hipótese nula, sendo assim a nossa série possui uma raiz unitária, portanto não estacionária.

Tabela 3 - Base de dados - Teste ADFuller base inalterada

Variável	Valor
Teste	-1.809627
p-valor	0.375693
Nmr Observações	508
Valor crítico (1)	-3.443288
Valor crítico (5)	-2.867246
Valor crítico (10)	-2.569809

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Emissões totais de emissão com média e variância com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

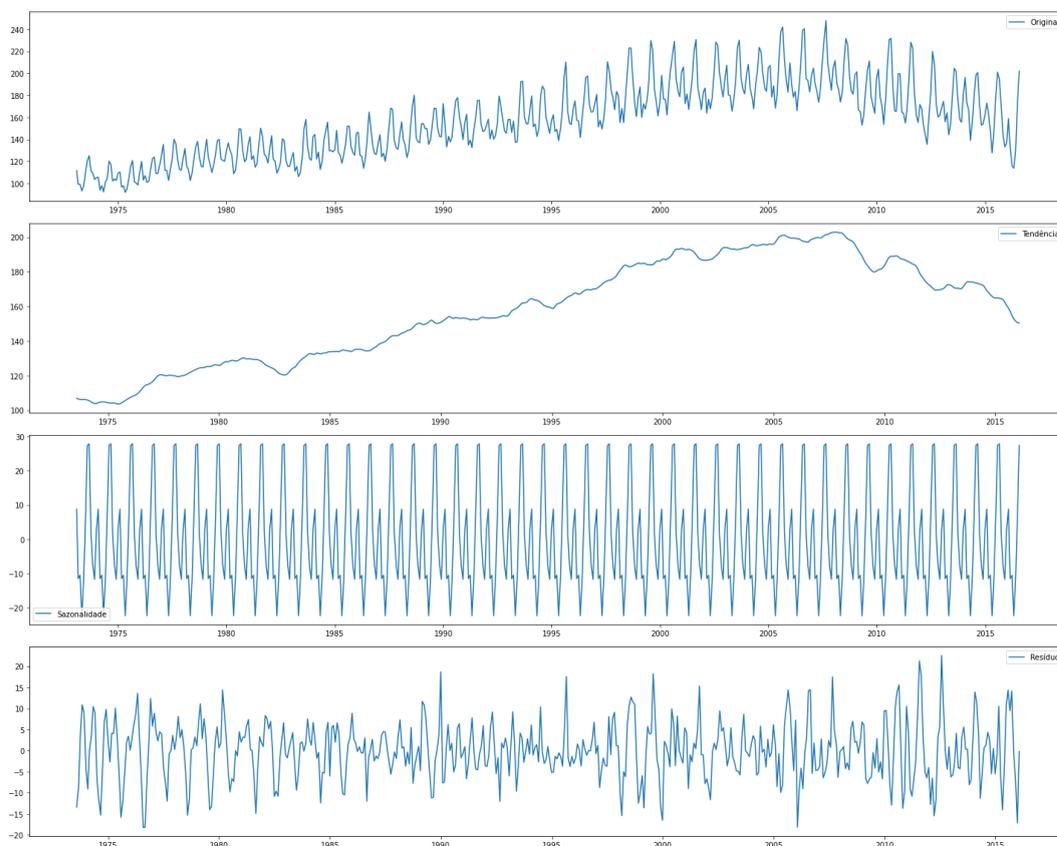
Na Figura 15 podemos ver a não estacionariedade da nossa série, podemos ver que a média se altera ao longo do tempo, o que foi definido anteriormente como fator chave para a não estacionariedade, sendo assim, esse fator deve ser solucionado para que possamos modelar os dados.

5.2.1 Estacionariedade

Agora que sabemos que nossa série original é não estacionária, resta aplicar métodos para que possamos então diferenciá-la, deixando-a estacionária. Demonstraremos aqui apenas os dois métodos que acredito que foram os mais eficientes e que são de mais fácil explicação.

Utilizaremos primeiramente o método da decomposição dos múltiplos termos que tornam nossa série estacionária, apenas para termos uma base visual dos aspectos que afetam nossa série temporal. Podemos ver na Figura 16 a forte tendência, no segundo gráfico, e a sazonalidade, no terceiro, de nossa série não modificada.

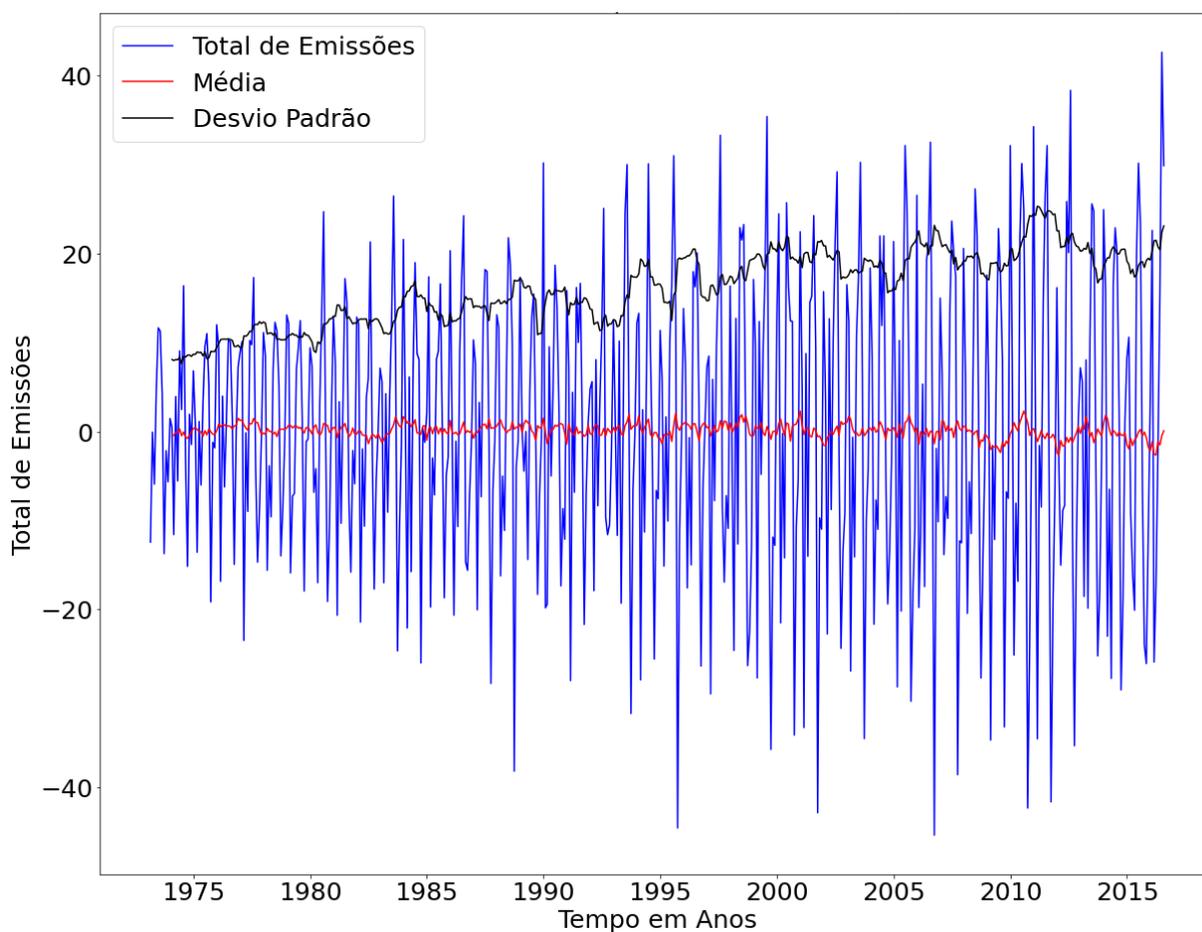
Figura 16 - Decomposição da não estacionariedade com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para então tornarmos a série estacionária utilizamos do método de diferenciação que consiste em subtrair o valor no tempo $Y(t)$ sobre o valor de $Y(t-1)$. Assim temos um número menor de dados da nossa série, mas podemos trabalhar nela, pois há estacionariedade. Podemos ver a série diferenciada na Figura 17 e podemos ver o resultado do teste ADFuller sobre a série diferenciada na tabela 4, podemos identificar que a série se tornou estacionária, contudo ainda temos que tirar o fator de sazonalidade.

Figura 17 - Série usando a primeira diferenciação com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

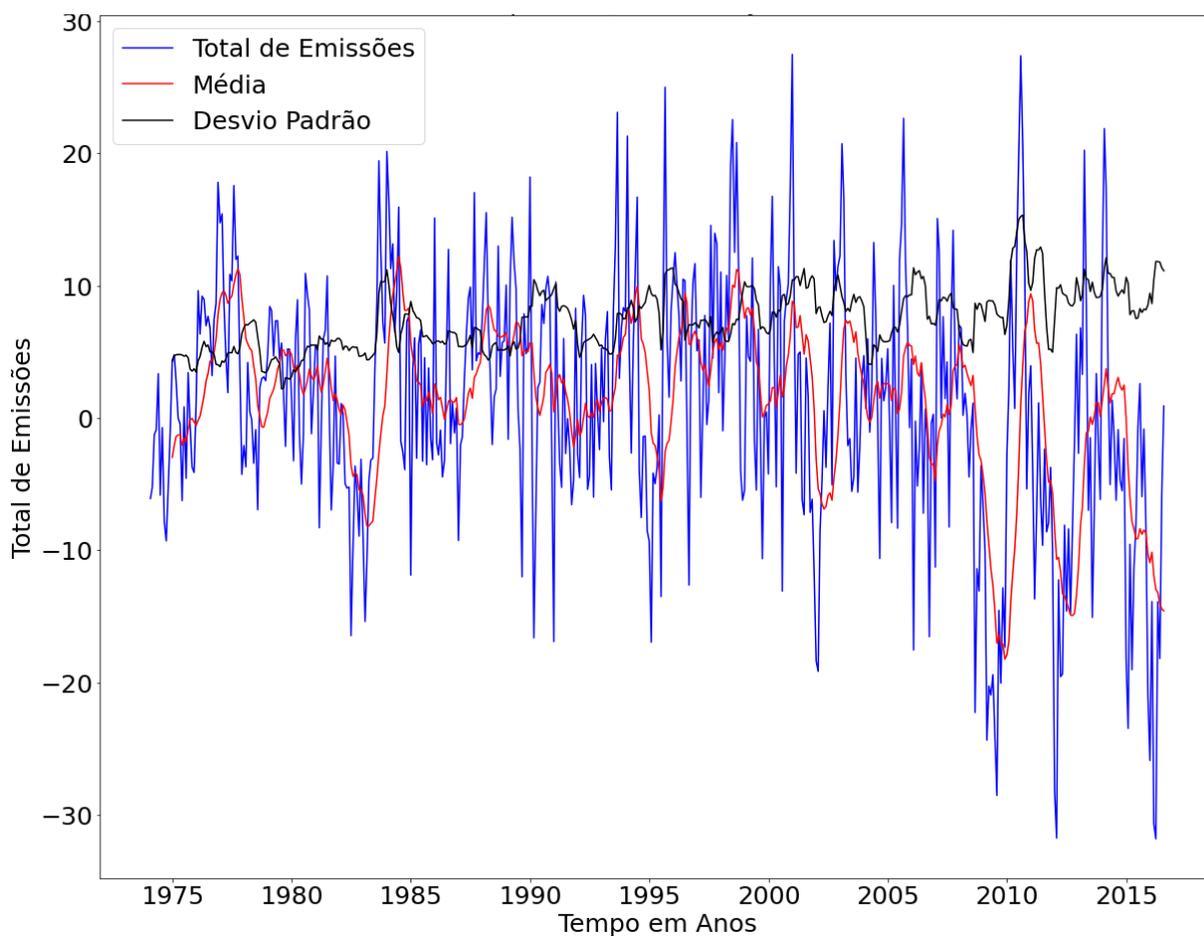
Tabela 4 - Base de dados - Teste ADFuller base com uma diferenciação

Variável	Valor
Teste	-6.610275e+00
p-valor	6.402884e-09
Nmr Observações	5.080000e+02
Valor crítico (1)	-3.443288e+00
Valor crítico (5)	-2.867246e+00
Valor crítico (10)	-2.569809e+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para retirarmos a sazonalidade, utilizaremos da mesma ferramenta, a diferenciação, contudo, ao notarmos que a sazonalidade se trata de 1 ano, fazemos a diferenciação de 12 meses. Com isso obtemos a série apresentada na série da Figura 18.

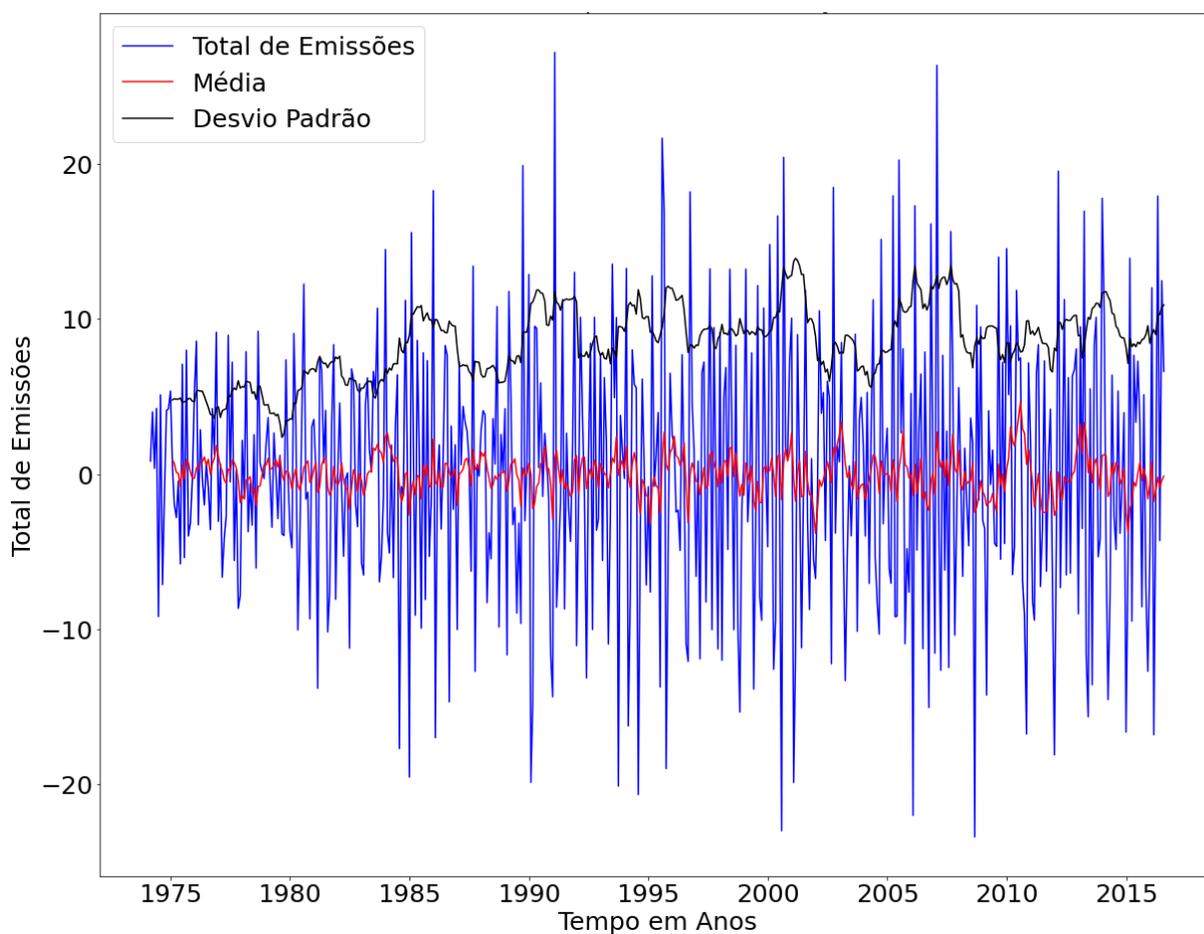
Figura 18 - Série usando a diferenciação da sazonalidade com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, utilizaremos da primeira diferenciação e aplicamos a diferenciação da sazonalidade, resultando em uma série sem tendência e sem sazonalidade, possível de observarmos na Figura 19, e podemos ver os resultados do teste ADFuller na tabela 5. Observando os resultados podemos concluir que há fortes evidências contra a hipótese nula, indicando que a série não possui raiz unitária, portanto é estacionária. Com isso, utilizaremos essa série, aplicada a primeira diferenciação e a diferenciação sazonal para modelarmos.

Figura 19 - Série usando a diferenciação final com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Base de dados - Teste ADFuller base com diferenciação final

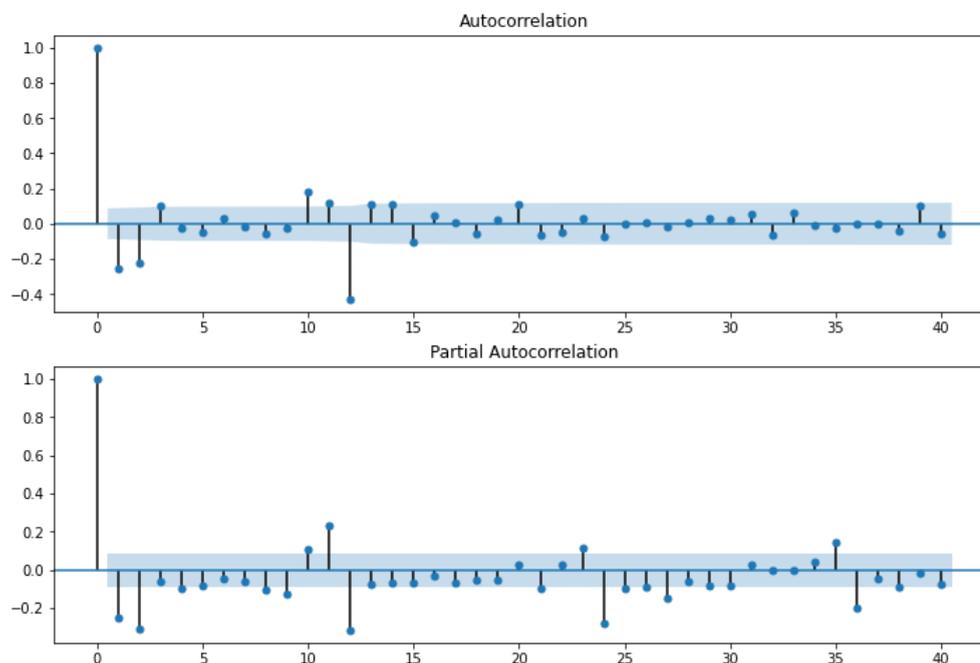
Variável	Valor
Teste	-8.574894e+00
p-valor	8.012370e-14
Nmr Observações	4.950000e+02
Valor crítico (1)	-3.443630e+00
Valor crítico (5)	-2.867397e+00
Valor crítico (10)	-2.569889e+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 DEFINIÇÃO DO MODELO

Agora com nossa série sendo estacionária, podemos estimar nosso modelo, para isso utilizaremos de 3 ferramentas, primeiramente é possível analisar os gráficos de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP), encontrados na Figura 20. Podemos ver que em ambos temos uma queda brusca a partir do primeiro LAG, identificando possivelmente que nosso fator auto regressivo seja de ordem 1 e o mesmo acontece com nosso MA, como já diferenciamos uma vez nossa série, é razoável supormos que o melhor modelo é um ARIMA(1,1,1), contudo, é importante adicionarmos também a parte da sazonalidade em nosso modelo.

Figura 20 - Gráficos de autocorrelação e autocorrelação parcial com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, não podemos nos ater apenas à análise visual para decidirmos qual modelo iremos escolher, sendo assim, testei múltiplos modelos e calculamos seus AICs; podemos ver alguns dos resultados encontrados na tabela 6.

Tabela 6 - AICs dos primeiros 6 modelos simulados

Modelo	AIC
SARIMA(1, 1, 1)x(0, 1, 1, 12)	3227.6141883889436
SARIMA(0, 1, 1)x(1, 0, 1, 12)	3322.5994854696846
SARIMA(1, 0, 1)x(0, 1, 1, 12)	3263.6349044020535
SARIMA(1, 1, 1)x(1, 0, 1, 12)	3292.7962694957523
SARIMA(1, 1, 1)x(1, 1, 0, 12)	3347.1711446266527
SARIMA(1, 1, 1)x(1, 1, 1, 12)	3228.932419132141

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 6, vemos apenas alguns exemplos, mas foram calculados diversos AIC's, e por fim, decidimos pelo modelo SARIMA(1, 1, 1)x(0, 1, 1, 12) com AIC de 3227.6141883889436.

6 RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Com nosso modelo escolhido podemos calcular nossos estimadores do modelo, podemos ver seus valores na tabela 7. E podemos ver os diversos testes que validam nosso modelo na tabela 8.

Tabela 7 - Parâmetros do modelo

	Coef	erro padrão	z	p> z	0.25	0.95
ar.L1	0.5155	0.049	10.599	0	0.420	0.611
ma.L1	-0.8992	0.026	-35.232	0	-0.949	-0.849
ma.S.L12	-0.7829	0.030	-25.820	0	-0.842	-0.723
sigma2	38.1341	2.106	18.104	0	34.006	42.262

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Teste de coeficientes

Teste	Valor
Ljung-Box (Q)	51.57
Prob(Q)	0.10
Heteroskedasticity (H)	2.38

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, podemos ainda visualizar a equação do nosso modelo:

$$Z_t = 0.5155Z_{t-1} - 0.8992a_{t-1} - 0.7829S + 38.1341 + a_t \quad (10)$$

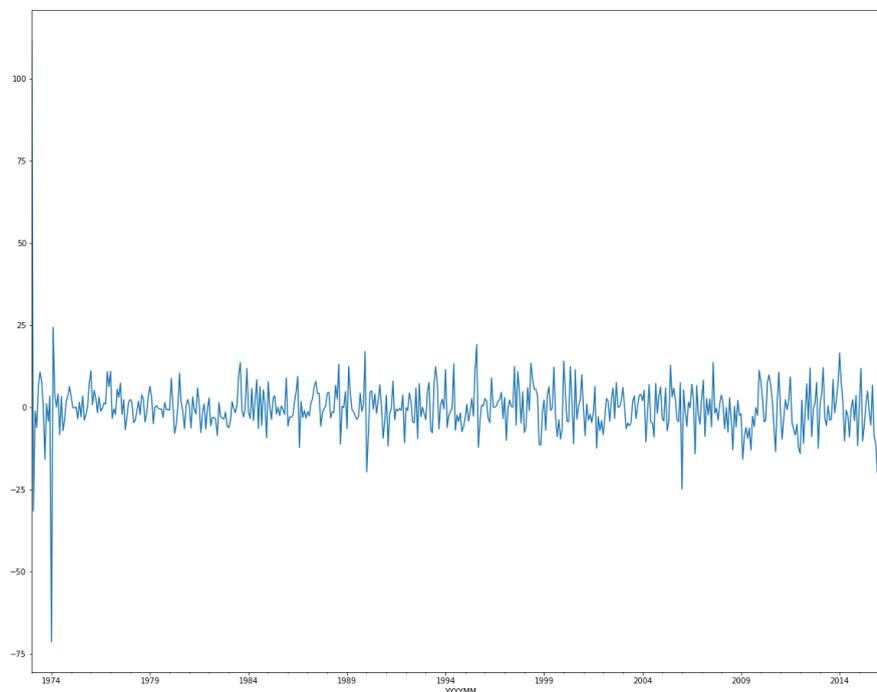
Nessa equação, Z_t é o valor do período a ser estimado no período t, Z_{t-1} o valor no período anterior a_{t-1} é o erro do período anterior, S é uma variável dummy que indica se o período a ser estimado é o período onde ocorre a nossa sazonalidade.

Por fim, a_t indica nosso erro, que possui esperança ($E(a_{t-1})$) igual a 0 se as hipóteses do modelo forem corretas.

Concluindo, podemos ver os resultados do nosso modelo por meio de gráficos. Na Figura 21, podemos ver os resíduos do nosso modelo ao longo do tempo, isso nos mostra o

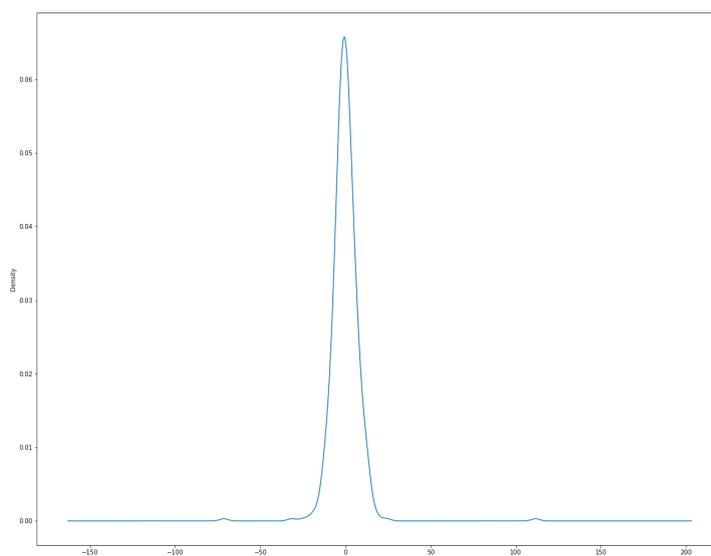
quanto que nosso modelo "errou" dos valores originais. Já na Figura 22, vemos a distribuição dos erros, podendo ver assim que a maioria de nossos erros se dá em 0 ou próximas de 0.

Figura 21 - Resíduos ao longo do tempo com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Distribuição dos resíduos com base em dados da EIA

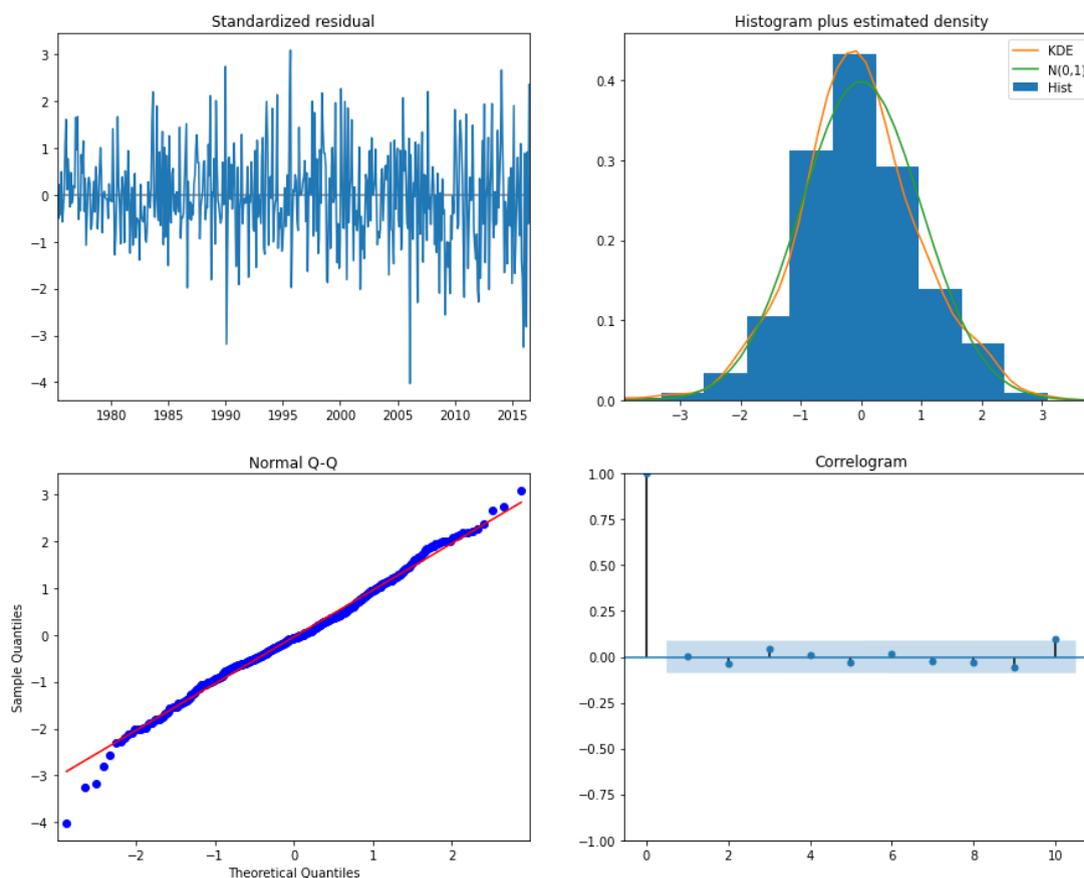


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, na Figura 23, podemos ver 4 diagnósticos do nosso modelos, com os resíduos padronizados no superior esquerdo, no superior direito temos um histograma, onde a linha

verde é a distribuição normal, e a laranja é a distribuição que obtivemos do nosso modelo. No inferior esquerdo temos a curva normal Q-Q; e, por último, no inferior direito, temos o correlograma, que segue a distribuição esperada de um modelo bem ajustado.

Figura 23 -Gráficos de diagnóstico com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 ACURÁCIA DO MODELO

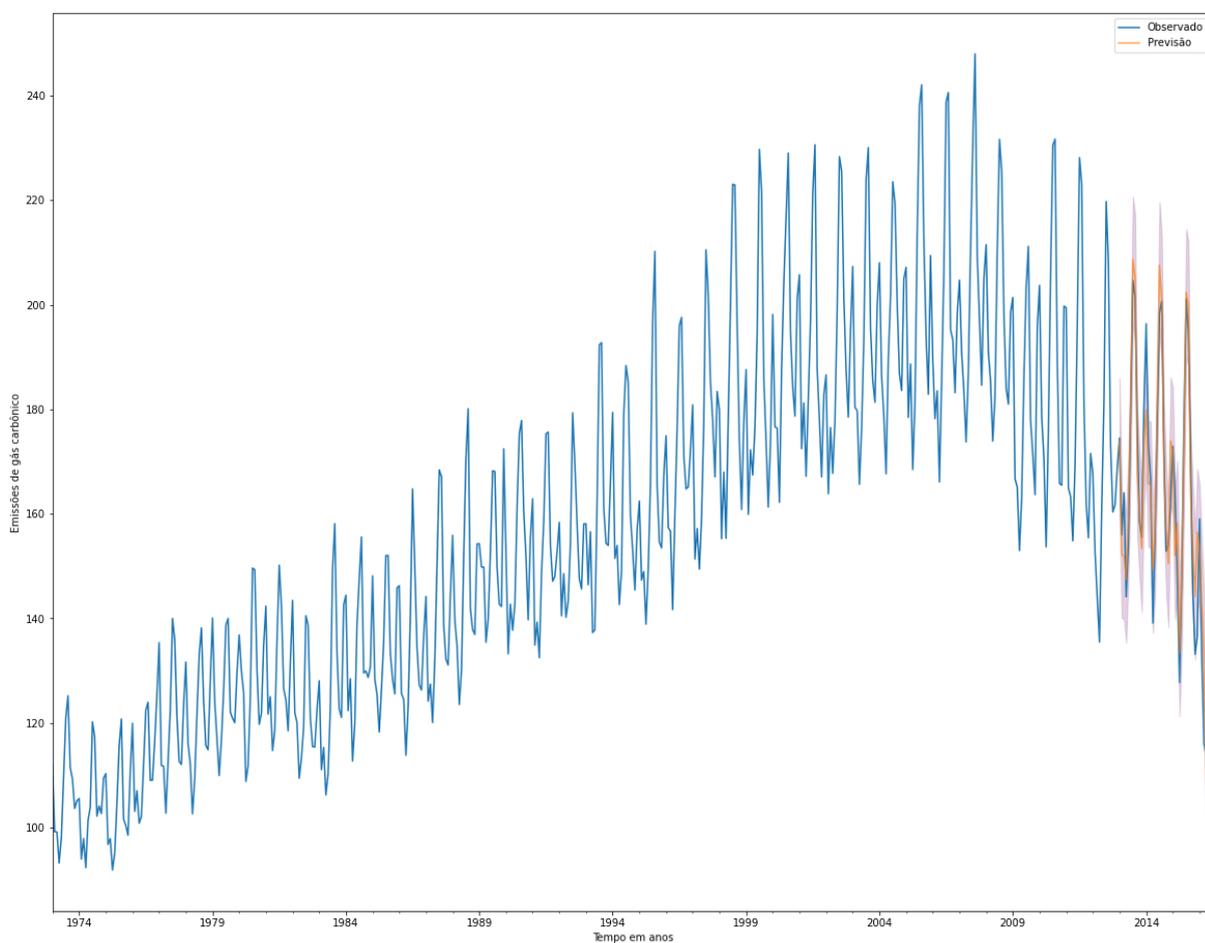
Agora, devemos observar o quanto que nosso modelo consegue acertar da realidade, para isso, aplicamos, visualmente na Figura 24, é aproximado na Figura 25, as previsões do modelo em relação a série original. Podemos ver em ambas as Figuras que nosso modelo se adaptou bem a nossa amostra. Na tabela 9 podemos ver os resultados de média do erro quadrado (mse) e raiz quadrada da média do erro quadrado (rmse), que indica os erros quadrados e o erro padrão, respectivamente; temos também o indicador r^2 (r2) que nos demonstra quanto percentualmente falando nosso modelo consegue prever da realidade e por fim temos o indicador de correlação (corr) que mostra qual a correlação entre nosso modelo e a realidade.

Tabela 9 - Teste de coeficientes.

Teste	Valor
mse	64.9919368602276
rmse	8.061757678089041
r2	0.8856695729187944
corr	0.9416880433086673

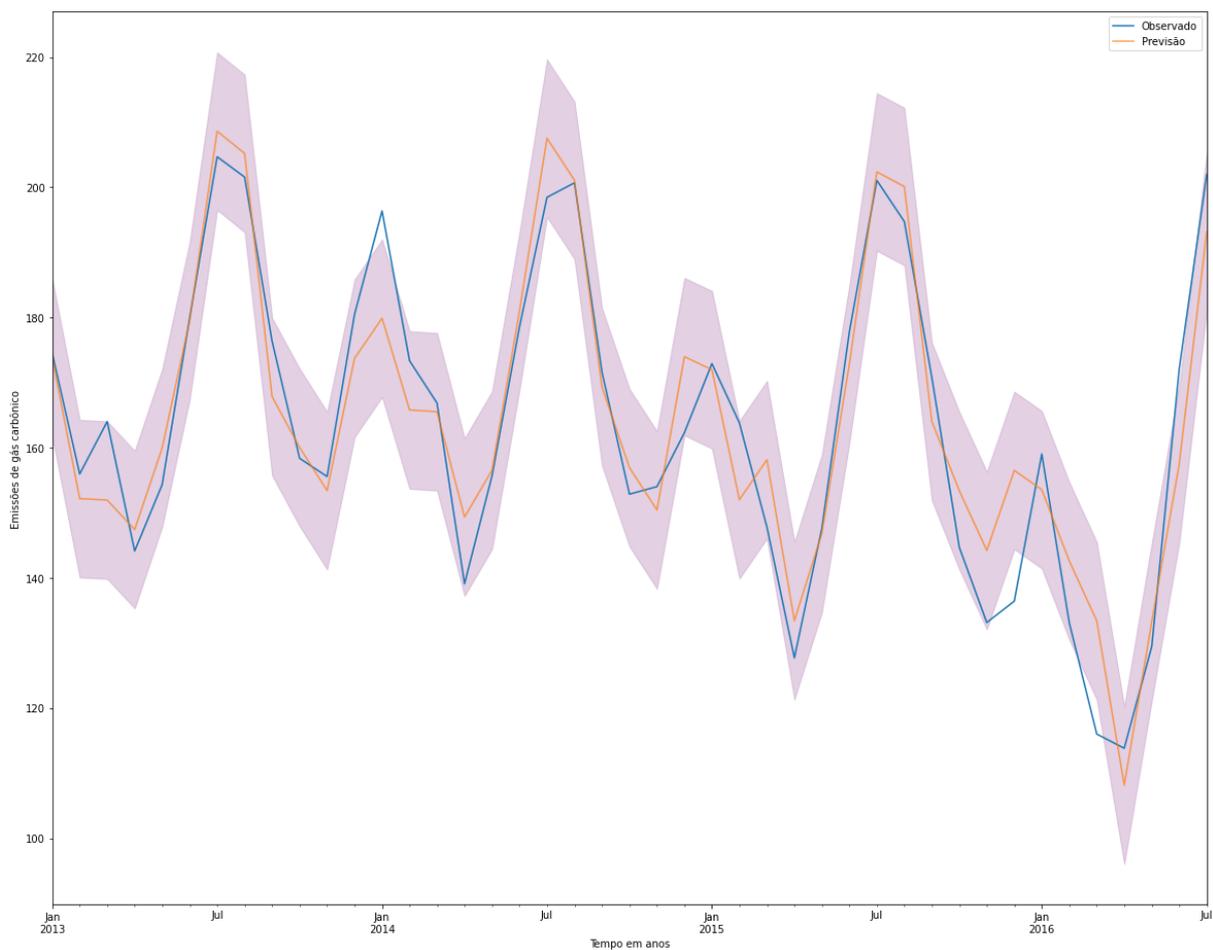
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 -Gráfico de acurácia com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 -Gráfico de acurácia aproximada com base em dados da EIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos analisar por fim, que nosso modelo está bem ajustado, com um r^2 de 88%, indicado que nosso modelo consegue explicar muito os dados da realidade.

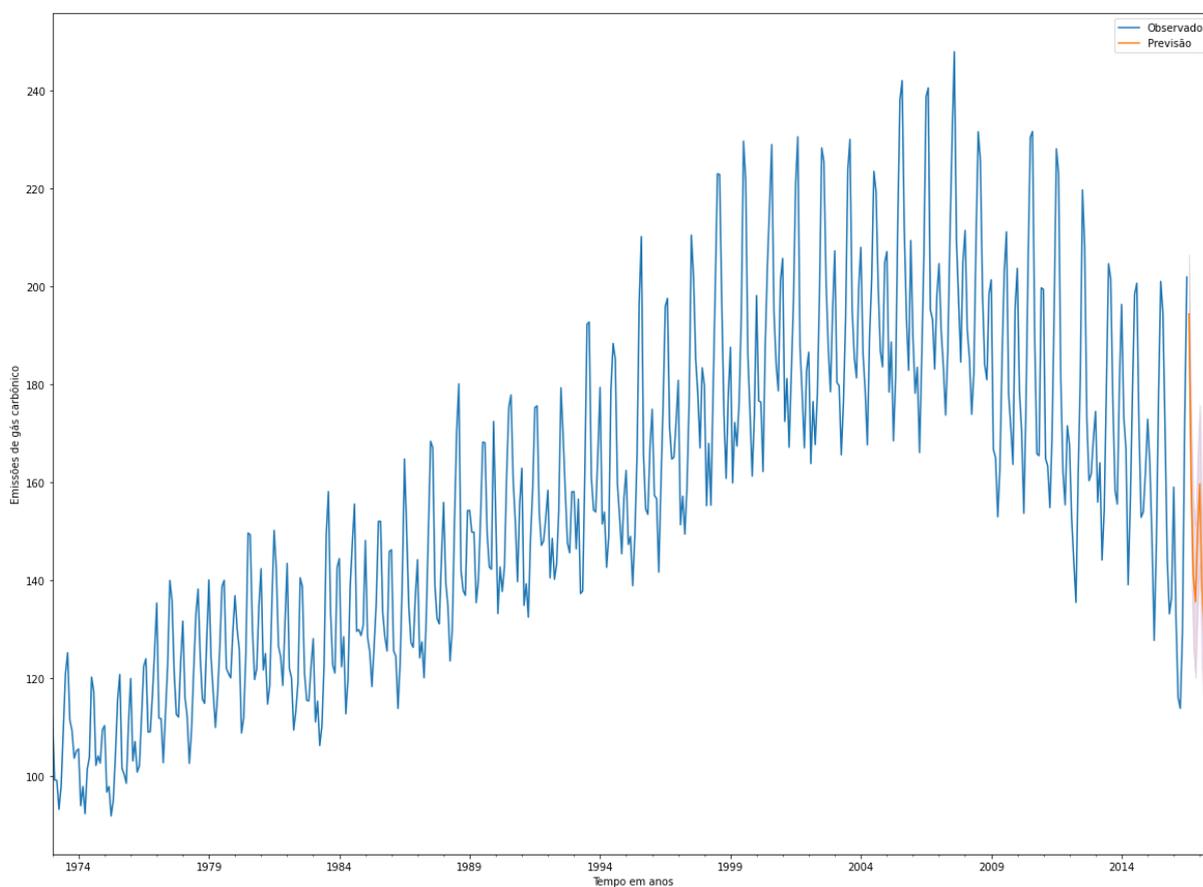
6.3 PREVISÃO

Com nosso modelo definido e ajustado, podemos fazer a previsão dos valores futuros para nossa série, podemos ver seus valores previstos na tabela 10 e podemos observar graficamente na Figura 26.

Tabela 10 - Intervalo de confiança com base em dados da EIA

Teste	Limite Inferior da previsão	Limite superior da previsão
2016-08-31	182.314772	206.521437
2016-09-31	146.551059	174.985779
2016-10-31	126.140163	156.325596
2016-11-30	120.035357	151.178018
2016-12-31	133.983022	165.774341

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Previsão para 1 ano com base em dados da EIA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Importante ressaltar que quanto mais tempo se passa a partir do último registro real de dados que temos, menor fica a acurácia do nosso modelo. Podemos observar na Figura 26 que a nossa previsão continua a tendência recente de queda das emissões pelo setor, contudo é de suma importância que sejamos cautelosos ao criar afirmações a respeito disso, afinal correlação não indica causalidade. Na próxima parte do trabalho, buscaremos juntar essa

previsão feita com nosso modelo com os pontos apresentados anteriormente buscando entender o sentido dessa previsão e os possíveis efeitos dessa queda das emissões.

7 CONCLUSÃO

Com o escopo desse trabalho em mente, os debates sobre o aquecimento global são justificados, quando o protocolo de Kyoto em 1997 foi estruturado, o tema ainda não era tão latente em nossa sociedade, e medidas superficiais começaram a ser tomadas; contudo, a trajetória recente das políticas, nesse caso americanas, a respeito dos níveis de emissões, especificamente falando do setor de energia, demonstram uma tendência de queda, mas o caminho a ser percorrido ainda é longo para alcançarmos o equilíbrio ambiental.³³

Sendo assim, medidas mais efetivas e mais custosas começaram a ser tomadas em anos recentes por grandes economias como os Estados Unidos da América de acordo com a tendência apresentada pelos dados.³⁴ Por exemplo, baseado no escopo deste trabalho, as medidas de incentivo econômico para o uso de energia solar e eólica são refletidos na estrutura de uso de energia dos EUA, em agregado com elevados custos atrelados a produção de energia carbonífera, vimos que a partir de 2008, aproximadamente, há uma redução na produção de energia com o uso de carvão, sendo substituída por meios sustentáveis como eólica e solar, principalmente o segundo, e também pelo uso de gás natural.

Mas, o mais interessante sobre essa mudança é baseado nos dados a respeito das emissões geradas pelo setor energético deste trabalho vimos que, assim como na produção de energia, as plantas carboníferas formam a maioria das emissões, mas quando a estrutura elétrica começa a mudar, a queda das emissões é muito mais brusca que a queda na produção, demonstrando que a relação emissões/Kwh produzido é alta, isso quer dizer, para a indústria carbonífera para cada Kwh produzido, há mais emissões de gases do efeito estufa na atmosfera que solar ou eólica, ou até mesmo as plantas que utilizam de queima de gás natural para produção de energia, que por mais que emitam gases no seu processo produtivo, o seu aumento na participação na produção energética dos EUA não resultou em um aumento tão significativo das emissões do setor.

Pelo lado das grandes discussões sobre o aquecimento global, de impactos ao meio ambiente e a sociedade, assim como as conversas ao redor do desenvolvimento de novas tecnologias renováveis que buscam combater ou amenizar os efeitos do aquecimento global, a ciência econômica tem sua contribuição ao debate, no escopo deste buscamos entender o

³³ GATES, Bill. *How to Avoid a Climate Disaster*. Nova Iorque: p. 40-53, 2021

³⁴ Pew Research Center. **Renewable energy is growing fast in the U.S., but fossil fuels still dominate.**

<<https://www.pewresearch.org/fact-tank/2020/01/15/renewable-energy-is-growing-fast-in-the-u-s-but-fossil-fuels-still-dominate/>> acesso em: 14 ago. 2022.

fenômeno pela ótica das externalidades. Nesse aspecto, as emissões geradas por agentes econômicos específicos, irão resultar em custos a outros agentes que não os próprios poluidores, resultando assim em nas ineficiências de mercados antes demonstradas, agentes afetados pela poluição terão um custo extra em saúde, custos devido a inundações ou intempéries agravadas pelo aumento da temperatura do planeta e desestabilização do ecossistema global resultados do aquecimento global.³⁵

Podemos assim ver que, caso as medidas implementadas continuem tendo o efeito apresentado pelos dados e modelos utilizados nesse trabalho, haverá uma queda considerável nas emissões em um período de médio prazo. Entretanto, como foi comentado no início desse trabalho, acredita-se que para que possamos ser efetivos no combate contra o aquecimento global, as emissões artificiais pela humanidade anualmente precisam ser próximas de zero. No próprio livro do Bill Gates, *How to Avoid a Climate Disaster*, é comentado que buscar o “zero” vai ser algo complicado, e por mais que as medidas e tecnologias atuais como energia solar e eólica mostraram grande impacto nos setores de energia, ainda não são eficientes o suficiente para que uma estabilização do aquecimento global seja alcançada.³⁶

Portanto, é possível ver que, ao analisarmos os EUA isoladamente, temos uma tendência de melhora na sua estrutura energética, mas cabe a pergunta, isso é o suficiente para conter os avanços do aquecimento global? Ao que tudo indica, infelizmente não. Anualmente vemos intempéries globais cada vez mais intensas, incêndios no estado da Califórnia estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos³⁷, chuvas nunca antes vistas no Paquistão em 2022 moldam a geografia local³⁸. Com isso, por mais que as tendências de queda sejam relevantes e esperançosas, é de suma importância que essas tendências se acentuam, caso o contrário, em uma pesquisa recente feita Xu Chi, da Universidade de Nanquim, mostra que as regiões hoje que possuem uma temperatura média de 13°C enfrentam temperaturas médias em 2050 próximas de 20°C, temperatura essa constatada no Norte da África, território extremamente diverso para a habitação humana. Isso se dá que por mais que o nível das

³⁵ Estima-se que as inundações na França em 2016 tenham como consequência um custo de 1.4 bilhão de Euros

<[³⁶ GATES, Bill. *How to Avoid a Climate Disaster*. Nova Iorque, 2021](https://floodlist.com/europe/france-floods-insurers-expect-e1-4-billion-cost#:~:text=The%20Associatio n%20Fran%C3%A7aise%20de%20l,to%20rise%20to%20around%20150%2C000.></p>
</div>
<div data-bbox=)

³⁷ The New York Times. **Hotter Summer Days Mean More Sierra Nevada Wildfires, Study Finds**. Nov. 2021. Disponível em:

<https://www.nytimes.com/2021/11/17/climate/climate-change-wildfire-risk.html#:~:text=The %20research%2C%20which%20examined%20daily,about%2025%20percent%20or%20more>

³⁸ UNICEF. **Devastating Floods in Pakistan**. Set. 2022. Disponível em: <https://www.unicef.org/emergencies/devastating-floods-pakistan-2022>

emissões anuais está diminuindo, é importante lembrar que, como mencionamos anteriormente neste trabalho, o gás carbônico tem a propriedade de se reter muito tempo na atmosfera terrestre, então a humanidade não deve só reduzir suas emissões, mas também buscar ferramentas como o reflorestamento, que diminuirão a quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera, buscando assim retomar a atmosfera e o meio ambiente, e por consequência o clima, do planeta terra para níveis “normais”.³⁹

Neste trabalho, realizamos a modelagem utilizando SARIMA para previsão de emissões de gás carbônico, como outros trabalhos anteriores aplicam metodologias similares para países diferentes como Aysha Malik que modelou as emissões baseadas em consumo de energia do Paquistão e China;⁴⁰ ou modelos aplicados no Brasil para relação consumo de energia e crescimento econômico.⁴¹ Outra metodologia aplicada também para a previsão de emissões é a de *multi-variable grey modeling* utilizada em vezes em conjunto com modelos ARIMA como no trabalho de Mohammad Lotfalipour,⁴² ou isoladamente para previsão das emissões.⁴³

Por fim, o escopo projetado desse trabalho foi concluído, o entendimento do aquecimento global e a ótica das externalidades a respeito do fenômeno foi compreendido e o modelo proposto se ajusta aos dados e apresenta uma previsão estatisticamente acurada. Os próximos passos para esse trabalho seriam entender os impactos das mudanças na estrutura energética americana, e se tais mudanças são o suficiente para uma mudança de sentido da crise climática mundial.

³⁹ XU, Chi; KOHLER, Timothy et. al. **Future of the human climate niche**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, n. 21, p. 11350-11355, 2020.

⁴⁰ MALIK, Aysha; HUSSAIN, Ejaz; BAIG, Sofia; KHOKHAR, Muhammad F. **Forecasting CO₂ emissions from energy consumption in Pakistan under different scenarios: The China–Pakistan Economic Corridor**. Greenhouse Gasses Science and Technology, v.10, p. 380-389, 2020.

⁴¹ PAO, Hsiao-Tien; TSAI Chung-Ming. **Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil**. Journal of Energy, v. 26, n.5, p. 2450-2458, 2011.

⁴² LOTFALIPOUR, Mohammad R; FALAHI, Mohammad; BASTAM, Morteza. **Prediction of CO₂ Emissions in Iran using Grey and ARIMA Models**. International Journal of Energy Economics and Policy, v.3, n.3, p.229-237, 2013.

⁴³ WU, Lifeng; LIU, Sifeng; LIU, Dinglin; FANG, Zhigeng; XU, Haiyan. **Modelling and forecasting CO₂ emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model**. Energy, v. 79, p. 489-495, 2015. ou LIN, Chiun-Sin; LIOU, Fen-May; HUANG, Chih-Pin. **Grey forecasting model for CO₂ emissions: A Taiwan study**. Applied Energy, v. 88, n.11, p. 3816-3820, 2011.

REFERÊNCIAS

ABU, Sean. **Seasonal ARIMA with Python**. Time Series Forecasting: Creating a seasonal ARIMA model using Python and Statsmodel. <<http://www.seanabu.com/2016/03/22/time-series-seasonal-ARIMA-model-in-python/>> acesso em: 18 jul. 2022.

Ask The Experts. **The IPCC Fifth Assessment Report**, Carbon Management, v. 5, n.1, p. 17-25, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/cmt.13.80>

BERHANE. **CO2 Emission Forecast with Python (Seasonal ARIMA)**. Disponível em: <https://www.kaggle.com/code/berhag/co2-emission-forecast-with-python-seasonal-arima>

XU, Chi; KOHLER, Timothy et. al. **Future of the human climate niche**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 117, n. 21, p. 11350-11355, 2020.

CLINE, William. **Global Warming and Agriculture**. v.45, n.1, p.A007, 2008.

CRAMTOM, Peter et al. **Global Carbon Pricing: The Path to Climate Cooperation**. 1ª Edição. Editora: MIT Press, 2017.

FLEMING, James. **Joseph Fourier, the ‘greenhouse effect’, and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures**. Jornal Endeavour, v.23, n.2, p. 72-75, 1999.

Floodlist. **France Floods – Insurers Expect €1.4 Billion Cost**. 8 de junho de 2016. Disponível em: <https://floodlist.com/europe/france-floods-insurers-expect-e1-4-billion-cost#:~:text=The%20Association%20Fran%C3%A7aise%20de%20l,to%20rise%20to%20around%20150%2C000>.

FOLEY, Duncan. **The Economic Fundamentals of Global Warming**. Santa Fe Institute, 2007. Disponível em: <https://www.santafe.edu/research/results/working-papers/the-economic-fundamentals-of-global-warming>

Folha de São Paulo. **Aquecimento global agrava epidemias, afirma OMS**. 8 abr. 2008, p. A-10.

Folha de São Paulo. **Derretimento de neve no continente equivale a um Estado de SP**. 17 mai. 2005, p.A-12.

FOURIER, Joseph. **Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires**. Annales de Chimie et de Physique, v. 27, p. 136-167.

GATES, Bill. **How to avoid a climate disaster : the solutions we have and the breakthroughs we need.** 1ª edição. Editora: New York, Doubleday, 2021.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, D. C. **Econometria básica.** 5 edição. Editora: Makron Books, 2000.

HARTMANN, Philipp. **A cobrança pelo uso da água como instrumento econômico na política ambiental : estudo comparativo e avaliação econômica dos modelos de cobrança pelo uso da água bruta propostos e implementados no Brasil.** 1ª edição. Editora: AEBA, 2010.

HENNING, Elisa et al. **Aplicação de um modelo SARIMA na previsão de vendas de motocicletas.** *Jornal Exacta*, v. 11, p.77-88, 2013.

HOUGHTON, John. **Global Warming the Complete Briefing.** 3ª edição. Editora: Cambridge University Press, 2004.

Instituto de Energia e Meio Ambiente. **8º Seminário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG.** <<https://energiaeambiente.org.br/produto/8o-seminario-brasileiro-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-seeg>> acesso em: 24 jul. 2022.

Instituto de Energia e Meio Ambiente. **As emissões brasileiras de gases de efeito estufa dos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019.** <<https://energiaeambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>> acesso em: 24 jul. 2022.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 104, 2007. <<https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>> acesso em 01 ago. 2022.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 151, 2007. <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>> acesso em 01 ago. 2022.

IRVIN, Thomas. **A Cost-Benefit Analysis of Sulfur Dioxide Abatement Regulations in Philadelphia.** *Business Economics*, v. 12, n. 4, p. 12-20, 1977.

KHANDEKAR, M.L.; MURTY, T.S.; CHITTIBABU, P. **The Global Warming Debate: A Review of the State of Science.** v. 162, p. 1557-1586, 2005.

KVALOY, Berit; FINSERAAS, Henning; LISTHAUG, Ola. **The publics' concern for global warming: A cross-national study of 47 countries.** Journal of Peace Research, v. 49, n. 1, p.11-22, 2012.

LIN, Chiun-Sin; LIOU, Fen-May; HUANG, Chih-Pin. **Grey forecasting model for CO2 emissions: A Taiwan study.** Applied Energy, v. 88, n.11, p. 3816-3820, 2011.

LEE, Cheng-Ming; KO, Chia-Nan; **Short-term load forecasting using lifting scheme and ARIMA models.** Journal of Expert Systems with Applications, v. 38, n.5, p. 5902-5911,2011.

LONNGREN, Karl E; BAI, Er-Wei. **On the global warming problem due to carbon dioxide.** Journal of Energy Policy, v. 36, n. 4, p. 1567-1568, 2007.

LOTFALIPOUR, Mohammad R;FALAHI, Mohammad; BASTAM, Morteza. **Prediction of CO₂ Emissions in Iran using Grey and ARIMA Models.** International Journal of Energy Economics and Policy, v.3, n.3, p.229-237, 2013.

MALIK, Aysha; HUSSAIN, Ejaz; BAIG, Sofia; KHOKHAR, Muhammad F. **Forecasting CO₂ emissions from energy consumption in Pakistan under different scenarios: The China–Pakistan Economic Corridor.** Greenhouse Gasses Science and Technology, v.10, p. 380-389, 2020.

MANKIW, Gregory. **Principles of Microeconomics.** 2ª Edição. Editora: South-Western College Pub, 2000.

MANNE, Alan; RUTHERFORD, Thomas. **International Trade in Oil, Gas and Carbon Emission Rights: An Intertemporal General Equilibrium Model.** The Energy Journal, v.15, n. 1, p. 57-76,1994.

MCNEILL, Jason. **Carbon emissions from electricity production.** <<https://www.kaggle.com/datasets/txttrouble/carbon-emissions>> acesso em: 24 jul. 2022.

MAKRIDAKIS, Spyros G.; WHEELWRIGHT, Steven C.; HYNDMAN, Rob J. **Forecasting: Methods and Applications.** 3ª edição. Editora: Wiley, 1997.

MATTHEWS, Damon H. et. al. **National contributions to observed global warming.** Environmental Research Letters, v. 9, n. 1, p. 014010, 2014.

MYHRE, Gunnar et al. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013

National Geographic. **What is global warming, explained.** <<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/global-warming-overview>> acesso em: 11 ago. 2022.

NAU, Robert. **Statistical forecasting: notes on regression and time series analysis.** Fuqua School of Business, Duke University <<https://people.duke.edu/~rnau/411home.htm>> acesso em: 24 jul. 2022.

NISBET, Matthew; MYERS, Teresa. **Twenty Years of Public Opinion about Global Warming.** The Public Opinion Quarterly, v. 71, n. 3, p. 444-470, 2007.

NORDHAUS, William. **A Dynamic Integrated Climate-Economy Model of Economic Growth and Climate Change.** American Economics Association, Anaheim, CA, 1993.

NORDHAUS, William. **A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies.** Yale University Press, New Haven, 2008.

NORDHAUS, William. **The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy.** Yale University, 2007.

NORDHAUS, William, Boyer, J. **Warming the World.** MIT Press, Cambridge, 2000.

PAO, Hsiao-Tien; TSAI Chung-Ming. **Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil.** Journal of Energy, v. 26, n.5, p. 2450-2458, 2011.

Pew Research Center. **Renewable energy is growing fast in the U.S., but fossil fuels still dominate.** <<https://www.pewresearch.org/fact-tank/2020/01/15/renewable-energy-is-growing-fast-in-the-u-s-but-fossil-fuels-still-dominate/>> acesso em: 14 ago. 2022.

PINDYCK, Robert; RUBINFELD, Daniel. **Microeconomics.** 8ª Edição. Editora: Pearson Universidades, 2013.

Policy 2020 Brookings. **The United States can take climate change seriously while leading the world in oil and gas production.** <<https://www.brookings.edu/policy2020/bigideas/the-united-states-can-take-climate-change-seriously-while-leading-the-world-in-oil-and-gas-production/>> acesso em: 14 ago. 2022.

REZAI, Armon; FOLEY, Duncan; TAYLOR, Lance. **Global Warming and Economic Externalities.** Economic Theory, v. 49, n. 2, 2017.

SALGADO, Alexandre et al. **O impacto nas variações das matrizes energéticas e uso da terra: estudo sobre a eficiência ambiental do G20**. Revista Eletrônica de Administração, v. 23, n.2, p. 306-332, 2017.

SEABOLD, Skipper; PERKTOLD, Josef. **Econometric and statistical modeling with python**. 9th Python in Science Conference, 2010.

SIRVINSKAS, Luís Paulo. **Externalidades Negativas do Aquecimento Global**. Revista Justitia. Interesses Difusos e Coletivos. São Paulo, v. 65, p. 199 -222, 2008.

STERN, Nicholas. **The Economics of Climate Change**. American Economic Review: Papers & Proceedings, v. 98, n.2, p. 1-37, 2008.

STERN, Nicholas. **The Economics of Climate Change: The Stern Review**. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

STERNER, Thomas; DAHL, Carol; FRANZÉN, Mikael. **Gasoline Tax Policy, Carbon Emissions and the Global Environment**. Journal of Transport Economics and Policy, v.26, n.2, p. 109-119, 1992.

The New York Times. **Hotter Summer Days Mean More Sierra Nevada Wildfires, Study Finds**. Nov. 2021. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2021/11/17/climate/climate-change-wildfire-risk.html#:~:text=The%20research%2C%20which%20examined%20daily,about%2025%20percent%20or%20more>.

TIETENBERG, Tom. **Environmental and Natural Resource Economics**. 5ª Edição. Editora: Addison Wesley Longman, 2000.

UNICEF. **Devastating Floods in Pakistan**. Set. 2022. Disponível em: <https://www.unicef.org/emergencies/devastating-floods-pakistan-2022>

Union of Concerned Scientists. **Why Does CO₂ get Most of the Attention When There are so Many Other Heat-Trapping Gases?**. <https://www.ucsusa.org/resources/why-does-co2-get-more-attention-other-gases#:~:text=In%20total%2C%20CO2%20has,less%20abundant%20in%20the%20atmosphere> acesso em: 11 ago. 2022.

U.S. Energy Information Administration. **Carbon dioxide emissions from electricity generation**. <https://www.eia.gov/electricity/data.php#elecenv> acesso em: 21 jul. 2022.

U.S. Energy Information Administration. **U.S. energy facts explained**. <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/> acesso em: 13 ago. 2022.

VAN ROSSUM, Guido. **The Python Library Reference**. Python Software Foundation, 2020.

WANG, Qiang; LI, Shuyu; PISARENKO, Zhanna. **Modeling carbon emission trajectory of China, US and India**. Journal of Cleaner Production, v. 258, 2020.

WU, Lifeng; LIU, Sifeng; LIU, Dinglin; FANG, Zhigeng; XU, Haiyan. **Modelling and forecasting CO2 emissions in the BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) countries using a novel multi-variable grey model**. Energy, v. 79, p. 489-495, 2015.

ANEXOS

ANEXO 1 – CÓDIGO EM LINGUAGEM PYTHON⁴⁴

```
## 1. Bibliotecas e dados
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from matplotlib.pyplot import rcParams
```

```
rcParams['figure.figsize'] = 20, 16
```

```
import warnings
```

```
import itertools
```

```
warnings.filterwarnings("ignore")
```

```
import statsmodels
```

```
import statsmodels.api as sm
```

```
from statsmodels.tsa.stattools import coint, adfuller
```

```
from statsmodels.tsa.seasonal import seasonal_decompose
```

```
from sklearn.metrics import r2_score
```

```
df = pd.read_csv('MER_T12_06.csv')
```

⁴⁴ Rotina com base em

<https://www.kaggle.com/code/berhag/co2-emission-forecast-with-python-seasonal-arima>

```
df.head()
```

```
df.info()
```

```
"""## 2. Cleaning Data"""
```

```
dateparse = lambda x: pd.to_datetime(x, format='%Y%m', errors = 'coerce')
```

```
df = pd.read_csv('MER_T12_06.csv', parse_dates=['YYYYMM'], index_col='YYYYMM',  
date_parser = dateparse)
```

```
df.head()
```

```
ts = df[pd.Series(pd.to_datetime(df.index, errors='coerce')).notnull().values]
```

```
ts.dtypes
```

```
ts['Value'] = pd.to_numeric(ts['Value'] , errors='coerce')
```

```
ts.dtypes
```

```
ts.info()
```

```
ts.dropna(inplace = True)
```

```
ts.info()
```

```
"""## 3. Visualização dos Dados"""
```

```
Energy_sources = ts.groupby('Description')
```

```
Energy_sources.head(15)
```

```
fig, ax = plt.subplots()
```

```
for desc, group in Energy_sources:
```

```
    group.plot(y='Value', label=desc, ax = ax, fontsize = 20)
```

```
    ax.set_xlabel('Tempo (mensal)')
```

```
    ax.set_ylabel('Emissões de gás carbônico em MMT')
```

```
    ax.xaxis.label.set_size(20)
```

```
    ax.yaxis.label.set_size(20)
```

```
    ax.legend(fontsize = 16)
```

```

fig, axes = plt.subplots(3,3, figsize = (30, 20))

for (desc, group), ax in zip(Energy_sources, axes.flatten()):

    group.plot(y='Value',ax = ax, title=desc, fontsize = 18)

    ax.set_xlabel('Tempo (mensal)')

    ax.set_ylabel('Emissões de gás carbônico em MMT')

    ax.xaxis.label.set_size(18)

    ax.yaxis.label.set_size(18)

""""## 4. Análise das séries""""

Emissions = ts.iloc[:,1:]

Emissions= Emissions.groupby(['Description',
pd.Grouper(freq='M')])['Value'].sum().unstack(level = 0)

mte = Emissions['Total Energy Electric Power Sector CO2 Emissions']

mte.head()

mte.tail()

""""## 4.1. Estacionariedade""""

plt.plot(mte)

```

```
def TestStationaryPlot(ts, plot_label = None):

    rol_mean = ts.rolling(window = 12, center = False).mean()

    rol_std = ts.rolling(window = 12, center = False).std()

    plt.plot(ts, color = 'blue', label = 'Total de Emissões')

    plt.plot(rol_mean, color = 'red', label = 'Média')

    plt.plot(rol_std, color = 'black', label = 'Desvio Padrão')

    plt.xticks(fontsize = 25)

    plt.yticks(fontsize = 25)

    plt.xlabel('Tempo em Anos', fontsize = 25)

    plt.ylabel('Total de Emissões', fontsize = 25)

    plt.legend(loc='best', fontsize = 25)

    if plot_label is not None:

        plt.title('Média & Desvio padrão (' + plot_label + ')', fontsize = 25)

    else:

        plt.title('Média & Desvio padrão', fontsize = 25)

    plt.show(block= True)

def TestStationaryAdfuller(ts, cutoff = 0.01):
```

```

ts_test = adfuller(ts, autolag = 'AIC')

ts_test_output = pd.Series(ts_test[0:4], index=['Test Statistic','p-value','#Lags
Used','Number of Observations Used'])

for key,value in ts_test[4].items():

    ts_test_output['Critical Value (%s)%key] = value

print(ts_test_output)

if ts_test[1] <= cutoff:

    print("Strong evidence against the null hypothesis, reject the null hypothesis. Data has no
unit root, hence it is stationary")

else:

    print("Weak evidence against null hypothesis, time series has a unit root, indicating it is
non-stationary ")

TestStationaryPlot(mte, 'Base inalterada')

TestStationaryAdfuller(mte)

"""## 4.1.1 Média móvel"""

moving_avg = mte.rolling(12).mean()

plt.plot(mte, color = 'blue')

```

```
plt.plot(moving_avg, color='red')

plt.xticks(fontsize = 25)

plt.yticks(fontsize = 25)

plt.xlabel('Time (years)', fontsize = 25)

plt.ylabel('CO2 Emission (MMT)', fontsize = 25)

plt.title('Total Energy Electric Power Sector CO2 Emissions', fontsize = 25)

plt.show()
```

```
mte_moving_avg_diff = mte - moving_avg
```

```
mte_moving_avg_diff.head(13)
```

```
mte_moving_avg_diff.dropna(inplace=True)
```

```
TestStationaryPlot(mte_moving_avg_diff, 'moving average')
```

```
TestStationaryAdfuller(mte_moving_avg_diff)
```

```
"""## 4.1.3. Diferenciação"""
```

```
mte_first_difference = mte - mte.shift(1)
```

```
TestStationaryPlot(mte_first_difference.dropna(inplace=False), 'Diferenciando')
```

```
TestStationaryAdfuller(mte_first_difference.dropna(inplace=False))
```

```
"""## 4.1.3.1 Sazonalidade"""
```

```
mte_seasonal_difference = mte - mte.shift(12)
```

```
TestStationaryPlot(mte_seasonal_difference.dropna(inplace=False), 'Diferenciação de sazonalidade')
```

```
TestStationaryAdfuller(mte_seasonal_difference.dropna(inplace=False))
```

```
mte_seasonal_first_difference = mte_first_difference - mte_first_difference.shift(12)
```

```
TestStationaryPlot(mte_seasonal_first_difference.dropna(inplace=False), 'Diferenciação final')
```

```
TestStationaryAdfuller(mte_seasonal_first_difference.dropna(inplace=False))
```

```
"""## 4.1.4. Decompondo"""
```

```
decomposition = seasonal_decompose(mte)
```

```
trend = decomposition.trend
```

```
seasonal = decomposition.seasonal
```

```
residual = decomposition.resid
```

```
plt.subplot(411)

plt.plot(mte, label='Original')

plt.legend(loc='best')

plt.subplot(412)

plt.plot(trend, label='Tendência')

plt.legend(loc='best')

plt.subplot(413)

plt.plot(seasonal, label='Sazonalidade')

plt.legend(loc='best')

plt.subplot(414)

plt.plot(residual, label='Resíduo')

plt.legend(loc='best')

plt.tight_layout()

mte_decompose = residual

mte_decompose.dropna(inplace=True)

TestStationaryPlot(mte_decompose, 'decomposing')

TestStationaryAdfuller(mte_decompose)

""""## 4.2. Modelo SARIMA """"
```



```

        enforce_stationarity=False,

        enforce_invertibility=False)

results = mod.fit()

print('ARIMA {}x{} - AIC: {}'.format(param, seasonal_param, results.aic))

if results.mle_retvals is not None and results.mle_retvals['converged'] == False:

    print(results.mle_retvals)

    aic_results.append(results.aic)

except:

    continue

aic_results.sort()

print('Best AIC found: ', aic_results[0])

# MELHOR MODELO ARIMA(1, 1, 2)x(0, 2, 2, 12) - AIC:3119.7977366161067 = Melhor
AIC:3119.7977366161067

mod = sm.tsa.statespace.SARIMAX(mte,

                                order=(1,1,1),

                                seasonal_order=(0,1,1,12),

                                enforce_stationarity=False,

                                enforce_invertibility=False)

results = mod.fit()

print(results.summary())

```

```
results.resid.plot()

print(results.resid.describe())

results.resid.plot(kind='kde')

results.plot_diagnostics(figsize=(15, 12))

plt.show()

"""## 5. Previsão dos valores

## 5.1 Acurácia do modelo

"""

pred = results.get_prediction(start = 480, end = 522, dynamic=False)

pred_ci = pred.conf_int()

pred_ci.head()

ax = mte['1973:'].plot(label='Observado')

pred.predicted_mean.plot(ax=ax, label='Previsão', alpha=.7)
```

```
ax.fill_between(pred_ci.index,
                pred_ci.iloc[:, 0],
                pred_ci.iloc[:, 1], color='#c8a2c8', alpha=.5)

ax.set_xlabel('Tempo em anos')

ax.set_ylabel('Emissões de gás carbônico')

plt.legend()

plt.show()

ax = mte['2013 ':].plot(label='Observado')

pred.predicted_mean.plot(ax=ax, label='Previsão', alpha=.7)

ax.fill_between(pred_ci.index,
                pred_ci.iloc[:, 0],
                pred_ci.iloc[:, 1], color='#c8a2c8', alpha=.5)

ax.set_xlabel('Tempo em anos')

ax.set_ylabel('Emissões de gás carbônico')

plt.legend()
```

```
plt.show()
```

```
mte_forecast = pred.predicted_mean
```

```
mte_truth = mte['2013-01-31:']
```

```
def forecast_accuracy(forecast, actual):
```

```
    mape = np.mean(np.abs(forecast - actual)/np.abs(actual))
```

```
    me = np.mean(forecast - actual)
```

```
    mae = np.mean(np.abs(forecast - actual))
```

```
    mpe = np.mean((forecast - actual)/actual)
```

```
    mse = ((forecast - actual) ** 2).mean()
```

```
    rmse = np.mean((forecast - actual)**2)**.5
```

```
    corr = np.corrcoef(forecast, actual)[0,1]
```

```
    mins = np.amin(np.hstack([forecast[:,None],  
                             actual[:,None]]), axis=1)
```

```
    maxs = np.amax(np.hstack([forecast[:,None],  
                             actual[:,None]]), axis=1)
```

```
    minmax = 1 - np.mean(mins/maxs)
```

```
    r2 = r2_score(actual, forecast)
```

```
    return({'mape':mape, 'me':me, 'mae': mae,  
          'mpe': mpe, 'rmse':rmse,'mse':mse,
```

```
'corr':corr, 'minmax':minmax, 'r2':r2})

forecast_accuracy(mte_forecast, mte_truth)

mte_pred_concat = pd.concat([mte_truth, mte_forecast])

pred_dynamic = results.get_prediction(start=pd.to_datetime('2013-01-31'), dynamic=True,
full_results=True)

pred_dynamic_ci = pred_dynamic.conf_int()

"""## 5.2. Previsão"""

forecast = results.get_forecast(steps= 120)

forecast_ci = forecast.conf_int()

forecast_ci.head()

ax = mte.plot(label='Observado', figsize=(20, 15))

forecast.predicted_mean.plot(ax=ax, label='Previsão')

ax.fill_between(forecast_ci.index,

                forecast_ci.iloc[:, 0],

                forecast_ci.iloc[:, 1], color='#c8a2c8', alpha=.4)

ax.set_xlabel('Tempo em anos')

ax.set_ylabel('Emissões de gás carbônico')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.show()
```