

# Análise e previsão das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes dos Combustíveis do Setor de Transporte Rodoviário no Brasil 1990-2020

Arney Rayol Moura de Araújo

Tarcísio da Costa Lobato

## Resumo

O consumo de energia, em suas diversas formas, está associado ao crescimento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o CO<sub>2</sub> o principal GEE que afeta o balanço radioativo da terra. Dentro do setor de transporte rodoviário brasileiro a gasolina, o óleo diesel e o etanol hidratado são os combustíveis mais consumidos. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar as emissões de CO<sub>2</sub> emitidos por esses três combustíveis no período de 1990 a 2020 e realizar uma previsão para os próximos cinco anos (2021 a 2025). Os dados foram coletados no site da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), será utilizado o modelo de séries temporais ARIMA para fazer a previsão das emissões, ademais, será calculado quantos créditos de carbono poderiam ser gerados pelo consumo do etanol. Os resultados apontam que a emissão de CO<sub>2</sub>, em 2020, da gasolina foi de 79233,85 GgCO<sub>2</sub>, do diesel foi de 149621,1 GgCO<sub>2</sub>, e do etanol foi de 22106,69 GgCO<sub>2</sub>, que seria o equivalente a 22106690 créditos de carbono, e também encontrou que as emissões, em 2025, da gasolina devem diminuir passando para 60436,7 GgCO<sub>2</sub>, do diesel deve crescer para 162727 GgCO<sub>2</sub>, e do etanol deve se manter em 19923,4 GgCO<sub>2</sub>. Por fim, conclui-se que o país deveria buscar reduzir as emissões não renováveis de CO<sub>2</sub> visto que a sua eliminação não é possível, pois a disponibilidade de energia impacta na qualidade de vida e competitividade econômica, e o etanol seria um dos caminhos, pois reduziria do consumo de gasolina.

**Palavras-chave:** Gases do Efeito Estufa. Combustíveis fósseis. Etanol. ARIMA.

## Abstract

Energy consumption, in its various forms, is associated with the growth of Greenhouse Gas (GHG) emissions, CO<sub>2</sub> being the main GHG affecting the earth's radioactive balance. Within the Brazilian road transport sector, gasoline, diesel oil and hydrated ethanol are the most consumed fuels. In this context, the objective of this research is to analyze the CO<sub>2</sub> emissions of these three fuels from 1990 to 2020 and to make a forecast for the next five years (2021 to 2025). The data was collected from the website of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), and the ARIMA time series model will be used to forecast the emissions. Furthermore, it will be calculated how many carbon credits could be generated by the consumption of ethanol. The results show that the CO<sub>2</sub> emission, in 2020, from gasoline was 79233.85 GgCO<sub>2</sub>, from diesel was 149621.1 GgCO<sub>2</sub>, and from ethanol was 22106.69 GgCO<sub>2</sub>, which would be the equivalent to 22106690 carbon credits, and also found that the emissions, in 2025, from gasoline should decrease to 60436.7 GgCO<sub>2</sub>, from diesel should grow to 162727 GgCO<sub>2</sub>, and from ethanol should remain at 19923.4 GgCO<sub>2</sub>. Finally, we conclude that the country should seek to

reduce non-renewable CO<sub>2</sub> emissions since its elimination is not possible, since energy availability impacts on quality of life and economic competitiveness, and ethanol would be one of the paths, since it would reduce gasoline consumption.

**Key words:** Greenhouse gases. Fossil fuels. Ethanol, ARIMA.

## 1. Introdução

O consumo de energia, em suas diversas formas, é uma importante questão para tomada de decisões empresariais e governamentais desde a revolução industrial, quando a máquina a vapor deu acesso a uma grande quantidade de energia aos processos produtivos. Deste momento em diante o uso massificado de energéticos levou ao crescimento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Os GEE são constituintes gasosos da atmosfera, naturais e antropogênicos, os quais causam o efeito estufa. O CO<sub>2</sub> é o principal Gás do Efeito Estufa (GEE<sup>1</sup>) que afeta o balanço radioativo da terra. É um gás que existe naturalmente na natureza, mas também é um subproduto da queima de combustíveis fósseis, queima de biomassas, processos industriais, e mudanças no uso da terra (IPCC, 2014). Isso se deve ao fato de estar associado à produção e consumo de energia em termos globais, e a sua permanência na atmosfera ser bastante duradoura (MENDONÇA; GUTIEREZ, 2000).

A Gasolina C, o Óleo Diesel e o Etanol Hidratado são os combustíveis mais consumidos no setor de transporte rodoviário no Brasil. A gasolina e o óleo diesel são subprodutos do petróleo, portanto, combustíveis fósseis, e o etanol é um biocombustível. Para contornar a elevada emissão CO<sub>2</sub> por combustíveis fósseis existem no Brasil políticas que determinam a mistura de biocombustíveis a esses combustíveis, como forma de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> não renovável (KOHLHEPP, 2010).

Similarmente, desde 2003 passou-se a produzir em massa carros equipados com motores flex-fuel, os quais permitem que os veículos trafeguem usando gasolina, etanol, ou qualquer mistura entre os dois, trazendo um grande impulso a demanda por etanol (KOHLHEPP, 2010). O mercado de comercialização créditos de carbono também se destacar como um possível grande instrumento para mitigar as

---

1 Os Gases de Efeito Estufa (GEE) são constituintes gasosos da atmosfera, naturais e antropogênicos, os quais absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos dentro do espectro de radiação terrestre emitida pela superfície da Terra, a própria atmosfera e pelas nuvens (IPCC, 2014). Embora não possam absorver a radiação vinda do sol, podem reter a radiação de retorno (MENDONÇA; GUTIEREZ, 2000). Esta propriedade causa o efeito estufa.

emissões de CO<sub>2</sub>, podendo ser usado para tornar mercado de etanol mais rentável, e, assim, estimular o crescimento deste (POYER *et al*, 2020).

O objetivo geral desta pesquisa é analisar e prever as emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis do setor de transporte rodoviário no Brasil. Os objetivos específicos são: a) calcular as emissões de CO<sub>2</sub> da gasolina c, óleo diesel e etanol hidratado no Brasil de 1990 a 2020; b) estimar quanto o etanol poderia gerar de créditos de carbono; c) fazer uma análise dos resultados, relacionando-os com as diversas políticas e eventos que impactaram nos mercados destes; e d) fazer previsão das emissões de CO<sub>2</sub> de 2021 a 2025 através do uso do modelo de série temporal univariado ARIMA.

Para realizar o proposto na seção 2 será exposto o referencial teórico sobre o Etanol Hidratado, Gasolina C e Óleo Diesel, além da explanação da importância da questão climática para o mundo, e uma avaliação de outro estudo sobre previsão do consumo de gasolina, na seção 3 será exposto os procedimentos metodológicos usados nesta pesquisa, na seção 4 será exposto os resultados alcançados pela pesquisa, e na seção 5 serão feitas as considerações finais desta pesquisa.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1. Energéticos e Emissões de GEE no Setor de Transporte Rodoviário**

A qualidade de vida e competitividade econômica dos países sofre forte influência da disponibilidade de energia desde a revolução industrial, e as economias que melhor se posicionam quanto ao acesso aos recursos energéticos de menor custo e impacto ambiental obtêm importante vantagem comparativa (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Segundo os autores, em um ambiente de maior crescimento econômico também é maior o crescimento da demanda de energia. Nesse contexto, é importante promover o consumo mais eficiente da energia. Portanto, no cenário nacional, é importante notar que as emissões de GEE são relativamente baixas, em razão da participação de fontes de energia renováveis na oferta interna de energia, isso não significa que o país possa minimizar a importância do crescimento das emissões nacionais, devendo adotar medidas que garantam que o desenvolvimento não traga elevação considerável das emissões de GEE (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Em relação aos grandes responsáveis pelas emissões de GEE no setor de transporte rodoviário brasileiro se destacam os combustíveis: Óleo Diesel, Gasolina C e Etanol Hidratado. Segundo os dados sobre os fatores de emissão de carbono do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006), o óleo diesel é o combustível que mais emite carbono, e consequentemente CO<sub>2</sub>, com fator de emissão de 20,2 tC/TJ, a gasolina possui o fator 18,9 tC/TJ. Para o Ministério de Ciência e Tecnologia, o etanol hidratado possui fator 14,81 tC/TJ, apesar disso, é um biocombustível com baixo impacto ao meio ambiente. Para o IPCC (2006), o CO<sub>2</sub> emitido por fontes renováveis não deve ser contabilizado nos inventários de emissões.

Para contornar a elevada emissão CO<sub>2</sub> por combustíveis fósseis existe no Brasil políticas que determinam a mistura de biocombustíveis a esses combustíveis, como forma de mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> não renovável. O etanol anidro é misturado à gasolina, e o biodiesel ao diesel, essa medida é importante especialmente no caso dos veículos a diesel, que correspondem por pequena parcela dos deslocamentos diários urbanos, mas são responsáveis por grande parte das emissões de GEE (KOHLHEPP, 2010; CARVALHO, 2011).

## **2.2. Óleo Diesel**

O Óleo diesel tende a manter uma estável relação com o PIB, como observou Mattos (2001), pois ele não sofre um processo de substituição por outro combustível, como ocorre no caso gasolina com o etanol hidratado. Tal fato se mantém para a maior parte do período de dados disponíveis pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP.

No entanto, Dörner e Braun, (2015) destacam que grande parte dos financiamentos feitos pelo BNDES destinados à modernização da indústria automobilística brasileira é aplicado do lado da demanda como estímulo a aquisição de novos veículos, especialmente caminhões, tal fato interfere na demanda de óleo diesel ao aumentar a frota de veículos consumidores de diesel.

Em contrapartida, segundo o relatório de gestão 2016 do BNDES, desde a criação do Fundo Garantidor de Investimentos (FGI), o qual é administrado pelo BNDES, entre 2009 e 2016, foram financiados mais de R\$ 2,9 bilhões apenas para a aquisição de caminhões novos, ou 50,5% do total investido pelo fundo no período.

É importante destacar que, em 2020, o diesel foi o único combustível que teve um crescimento de consumo, como aponta o Valor Online (2021), isso deve ao fato deste estar diretamente ligado ao setor de logística no Brasil, e devido ao fato de que entregas continuaram a ocorrer, e também pelas safras recorde de grãos nesse ano.

### **2.3. Etanol Hidratado**

O etanol é um biocombustível que se destaca como importante instrumento para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. O etanol pode ser produzido da cana-de-açúcar, da beterraba, ou do amido vindo de diversas fontes como o milho.

O Brasil historicamente produz o etanol da cana-de-açúcar por causa do programa Proálcool, que foi criado com o objetivo de garantir o fornecimento de energia no Brasil, que estava ameaçada devido aos choques do petróleo, e também para apoiar os produtores de cana-de-açúcar que viam os preços do açúcar em queda (KOHLHEPP, 2010).

No final da década de 80 os aumentos nos preços do etanol, devido ao fim dos subsídios, em conjunto com a queda no preço do petróleo e aumento do preço do açúcar, trouxeram o fim ao programa, permanecendo apenas a obrigatoriedade da mistura de etanol à gasolina por questões ambientais (KOHLHEPP, 2010).

As perspectivas para o etanol combustível só voltaram a melhorar a partir de 2003, quando se passou a produzir em massa carros equipados com motores flex-fuel, os quais permitem que os veículos trafeguem usando gasolina, etanol, ou qualquer mistura entre os dois, trazendo novo impulso a demanda por etanol (KOHLHEPP, 2010 p. 228).

Entretanto, a crise deflagrada na segunda metade de 2008 trouxe desconfiança aos investidores que financiavam o mercado sucroenergético. Devido ao aumento do endividamento do setor, a crise trouxe ainda mais dificuldade de aquisição de novos débitos para gerar investimentos. Este endividamento havia ocorrido pela expectativa de o Brasil se tornar um grande exportador de etanol, o que não se concretizou (MORAES; BACCHI, 2015).

Nesse cenário, problemas de investimento devido à falta de recursos financeiros e produtividade, fatores climáticos negativos e desconhecimento de práticas adequadas de uso dos fatores de mecanização da colheita, impactaram na produção de etanol nas safras 2010-2011 e 2011-2012 (MORAES; BACCHI, 2015).

Desde 2006 era mais rentável produzir açúcar ao invés de etanol, o que fazia com que se priorizasse a produção do primeiro em relação ao segundo. A política de manutenção dos preços da gasolina tornava o etanol menos competitivo o que tornava a renda da venda de etanol menores, e levava a uma maior priorização da produção de açúcar (MORAES; BACCHI, 2015).

Todos esses fatores impactaram negativamente no mercado de etanol, levando a queda do consumo, tais problemas tiveram impacto persistente nos anos que se seguiram (MORAES; BACCHI, 2015).

Após 2015 o consumo de etanol hidratado ficou em baixa no, principalmente devido pelo período de recessão econômica que o país estava passando (FRANCO, 2018). Em 2020 a produção de etanol recuou como resultado das medidas de restrição adotadas durante a pandemia de covid-19, que diminuíram a mobilidade e consequentemente a demanda por combustíveis (CHIAPPINI, 2021).

## **2.4 Gasolina C**

O início da década de 1990 foi marcado pela Plano Nacional de Desestatização (PND), que impactou também no mercado de petróleo e seus derivados, com a Petrobras se desfazendo de seus braços de mineração, comércio exterior, química e fertilizantes, e passando a focar apenas em atividades da cadeia petrolífera (PINTO JR et al, 2007 p.120).

Nesta mesma década o Conselho Nacional do Petróleo (CNP) foi extinto, com a Petrobras deixando de ser subordinada a Presidência da República. Essa alteração permitiu a modificação da administração de preços dos derivados de petróleo, com o fim do tabelamento e controle das margens de distribuição e revenda, sendo substituídos por tetos de preço em 1996, os quais foram progressivamente eliminados até a liberação total em 2001 ( PINTO JR et al, 2007).

A partir de 1997 uma reforma petrolífera foi consagrada no Brasil, permitindo a competição no mercado nacional de petróleo e garantindo, as novas empresas o acesso a infraestrutura de transporte e armazenagem da Petrobras, com a abertura plena do mercado já sendo possível a partir de 2001. Nesse âmbito, as primeiras concessões ocorreram já em 1998 ( PINTO JR et al, 2007).

Em paralelo, também foi modificada a estrutura de formação dos preços dos derivados do petróleo, com a extinção de subsídios ao consumo em 1998, com os preços passando a serem definidos de acordo com o custo de oportunidade,

considerando os preços internacionais e custos locais diversos. Porém, o preço de faturamento das distribuidoras continuou a ser definido pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério da Fazenda (MF) até 2002 ( PINTO JR et al, 2007).

Os leilões de concessões foram bem sucedidos, consolidaram a posição dominante da Petrobras no mercado nacional e ao mesmo tempo trouxe dezenas de empresas nacionais e internacionais para atuarem no mercado nacional ( PINTO JR et al, 2007).

A partir de 2011, a Petrobras passou a adotar uma política de preços definida pela União, com poucos reajustes e a manutenção do preços da gasolina e do diesel vendido pela estatal abaixo do valor de mercado, com o objetivo de evitar pressões inflacionárias e os impactos políticos negativos dos reajustes (ALMEIDA et al, 2015).

Ainda segundo os autores, essa política de preços gerou um prejuízo bilionário à empresa, além das receitas não auferidas pela empresa que alcançaram valores multibilionários, resultando em uma deterioração significativa das finanças da empresa. Entretanto, a partir de 2015 tal política foi abolida e os preços dos combustíveis voltaram a variar.

Em 2015, a venda de gasolina caiu, segundo Nogueira (2015), por causa do aumento da competitividade do etanol hidratado, e indica que a Petrobras pretende ser mais competitiva nos anos seguintes para não perder mais mercado para o etanol hidratado. Porém, Silveira (2020), levantou que houve uma queda no consumo de gasolina em 2019, devido ao ganho de competitividade do etanol observada nesse período. Em 2020, porém, os lockdowns implementados como política para combate da pandemia da covid-19 impactaram negativamente as vendas de gasolina, como aponta o Valor Online (2021).

## **2.5 A importância da questão climática para o mundo**

Em 2018, o IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) destacou a importância de limitar o aumento da temperatura terrestre em 1,5° em relação aos níveis pré-industriais até o ano de 2100, observando que se alcançada essa meta o mundo enfrentará menores desafios no futuro, reduzindo o tamanho destes problemas.

O relatório destaca os seguintes problemas: má temperatura na maior parte da terra e regiões oceânicas, temperaturas extremas na maioria das regiões habitadas, chuvas pesadas em várias regiões, probabilidade de seca e baixos níveis

de chuvas em algumas regiões, aumento dos níveis dos mares, impactos nos ecossistemas e na biodiversidade, aumento na temperatura média nos oceanos e também em seu nível de acidez e queda no nível de oxigenação, riscos à saúde, segurança alimentícia, suprimento de água, crescimento econômico, e segurança à humanidade (IPCC, 2018).

Segundo estudos do Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (USP) mais de 200 doenças estão associadas à poluição do ar, levando inclusive a morte de cerca de 3 mil pessoas por ano apenas na região metropolitana de São Paulo (SALDIVA et al., 2007, apud CARVALHO, 2011). Isso mostra a importância de se limitar a emissão de GEE também no médio prazo.

Em 2012, as diversas atividades consumidoras de combustíveis fósseis foram responsáveis por 90,6% das emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> no mundo (JANSSENS-MAENHOUT et al., 2019). De acordo com Olivier, Schure e Peters (2017), substituir o consumo de combustíveis fósseis mais poluidores por outros combustíveis fósseis menos poluidores, e aumentar a participação de fontes de energia renovável na oferta interna de energia total, são algumas tendências na redução das emissões de CO<sub>2</sub> observadas pelo mundo.

Nessa perspectiva, o mercado de comercialização créditos de carbono também se destaca como um possível instrumento para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre. Esse mercado surgiu como parte do Protocolo de Quioto, em 1997, que passou a vigorar a partir de 2005, o acordo permite que países vendam seus excessos de redução ou sequestro de emissões de carbono à países com elevadas emissões. No mercado de carbono um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO<sub>2</sub> que deixou de ser emitido ou foi sequestrado da atmosfera (POYER et al, 2020).

Segundo o *The World Bank* (2021), o Brasil ainda não se integrou ao mercado de carbono, o que representa uma grande perda de receitas que poderiam vir desse mercado em razão da matriz energética relativamente limpa que o país possui. Apesar disso, o país ainda se destaca por iniciativas voluntárias de compra e venda de créditos de carbono. Nesse sentido, torna-se interessante avaliar quantos créditos de carbono poderiam ser gerados no setor de transportes rodoviário pelo consumo do Etanol Hidratado que é considerado um combustível renovável.



## **2.6 Outro Estudo Sobre Previsão**

Em 2018, Santos Jr fez uma pesquisa comparando dois modelos para previsão de demanda, tentando identificar qual era melhor para prever o consumo de gasolina nos anos subsequentes.

Nesse estudo ele comparou o modelo Auto-Regressivo de Médias Moveis (ARIMA) e o modelo de Regressão Linear Múltipla (RLM), foram considerados dados sobre as Vendas de Gasolina, o Preço da Gasolina, o PIB, o Desemprego, o Licenciamento de Veículos e a Frota Estimada de Veículos em Circulação, após uma análise das variáveis, ele conclui que as variáveis Preço da Gasolina, Desemprego e Frota Estimada de Veículos em Circulação não eram significativos em para a previsão, apesar disso as demais variáveis ainda eram pouco explicativas, por isso ele passou a usar apenas a variável PIB com dummies que ele inseriu ao modelo para representar os trimestres do ano.

Para validar o melhor modelo ele fez análises considerando dois períodos diferentes, uma com dados até 2015 e um ano de validação dos resultados dos modelos em 2016, a qual foi denominada Fase de Validação, e outro com dados até 2016 e dois anos de validação dos resultados dos modelos em 2017 e 2018, a qual foi denominada Fase de Conclusão.

Ao analisar os Resultados da Fase de Validação, o autor conclui que o melhor modelo foi o ARIMA, e ao analisar os Resultados da Fase de Conclusão, conclui-se que o melhor modelo foi o RLM. Portanto, a divergência nos resultados decorre de fatores exógenos ao modelo que impactaram no consumo de gasolina na Fase de Conclusão.

## **3. Procedimentos Metodológicos**

A fonte dos dados da pesquisa e apresentado na primeira seção, a pesquisa faz uso de métodos de estimação das emissões de CO<sub>2</sub> do IPCC, o qual é apresentado na segunda sessão, além de um modelo de previsão para as emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis analisados, apresentado na terceira seção. A série temporal adotada compreende o período de 1990 a 2020 para todos os combustíveis analisados.

### **3.1 Fonte de Dados**

A pesquisa utiliza dados secundários disponíveis no site da Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que fornece os dados sobre o

consumo de combustíveis no Brasil, os quais são provenientes das vendas e do consumo próprio de combustíveis pelas distribuidoras de combustíveis, também usa dados presentes no Balanço Energético Nacional (BEN) publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e no IPCC.

### **3.2 Emissões de CO<sub>2</sub>**

O IPCC fornece dois modelos para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>, os quais são especificados a seguir:

O primeiro modelo é a abordagem de referência ou Top-Down, onde se estima as emissões de CO<sub>2</sub> diretamente pelo consumo aparente dos combustíveis, sem se especificar de que forma esses combustíveis foram consumidos, a partir do uso dos fatores de emissão default disponibilizados pelo próprio IPCC (MATTOS, 2001).

O segundo modelo é a abordagem setorial ou Botton-Up, onde se estima as emissões de CO<sub>2</sub> para cada subgrupo de veículos com características similares, desde que existam dados locais detalhados e confiáveis sobre a tecnologia de motorização utilizada, qualidade do combustível, consumo, quilometragem, fatores de emissão levantados em laboratórios locais, estado de manutenção da frota, etc (ÁLVARES; LINKE, 2001).

A presente pesquisa adota o modelo Top-Down, já bastante utilizado por diversos autores nacionais, a exemplo: Mattos (2001); Cruvinel, Pinto e Granemann (2012); Álvares e Linke (2001); Gomes, Faria e Dallemole (2010). No modelo se multiplica o consumo aparente de combustíveis (CA), aqui dispostos como M3, pelo fator de conversão (F conv) para a unidade de referência, o tep, a partir do qual se pode transformar na unidade energética adotada pelo IPCC, o J, considerando a quantidade de calorías contidas em um tep e sua equivalência em TJ, obtendo-se assim o consumo de energia (CC) (MATTOS, 2001).

Os dados sobre o fator de conversão em tep são definidos no Balanço Energético Nacional (BEN), o qual também define quantas calorías tem um tep. Vale ressaltar que desde 2003 o BEN passou a adotar os critérios internacionais mais usuais para a conversão de unidades comerciais de energia em uma unidade comum de referência, então o petróleo de referência passou a ser o de 10000 kcal/kg, e todos os fatores de conversão passaram a ser determinados com base nos poderes caloríficos inferiores das fontes de energia. Por isso o tep brasileiro passou a ter 10000 Mcal, equivalente a  $41,868 \cdot 10^{-3}$  TJ. Os fatores de conversão

são: 0,770 para a gasolina c; 0,848 para o óleo diesel; e 0,510 para o etanol hidratado.

O IPCC determina que se use o poder calorífico inferior para conversão em J, pois os fatores de emissão são baseados na energia efetivamente aproveitável do combustível, por isso que trabalhos mais antigos possuíam um fator de correção (F corr ) nesse ponto para que o valor calculado estivesse de acordo com os métodos do IPCC. Portanto a primeira fórmula:

$$CC = CA * F \text{ conv} * 41,868 * 10^{-3} \quad (1)$$

onde:

CC = consumo de energia;

CA = consumo do combustível;

F conv = fator de conversão;

$41,868 * 10^{-3} = 10000 \text{ Mcal}$ .

Com o consumo de energia (CC) se pode calcular a quantidade de carbono (QC) emitida na queima do combustível usando os fatores de emissão (F emiss ) que o IPCC define para cada combustível, considerando a emissão de tC para o consumo de 1TJ, e depois multiplicando por  $10^{-3}$  para que o resultado seja disposto em GgC, como determina o IPCC. É importante destacar que o IPCC incentiva os pesquisadores a utilizarem dados de fatores de emissão que melhor definam a realidade de uma região, estado ou país, ao invés dos valores default que podem não ser representativos para todas as regiões do mundo. Os fatores de emissão são: 18,9 para a gasolina c; 20,2 para o óleo diesel; e 14,81 para o etanol hidratado. Assim a segunda fórmula:

$$QC = CC * F \text{ emiss} * 10^{-3} \quad (2)$$

onde:

QC = quantidade de carbono;

CC = consumo de energia;

F emiss = fator de emissão.

Alguns combustíveis são empregados para fins não energéticos, como a produção de plásticos, asfalto, lubrificante entre outros. Assim parte do carbono fica estocada ou fixada (QCF). Para biomassas sólidas e líquidas 100% do carbono é estocado, pois o carbono emitido na queima do combustível foi previamente sequestrado na produção da biomassa, ou o município que planta a cana-de-açúcar registra o sequestro de carbono e o município que a queima registra a emissão.

Nesta pesquisa o etanol é o único combustível que tem seu carbono fixado, no caso 100%.

A partir da quantidade de carbono emitida pode-se calcular as emissões de CO<sub>2</sub> (ECO<sub>2</sub>), usando para isso a relação entre os pesos moleculares do dióxido de carbono e do carbono, sendo que em 44 tCO<sub>2</sub> corresponde a 12 tC (ÁLVARES; LINKE, 2001), entretanto deve-se considerar que nem todo o carbono existente no combustível será oxidado. Para os combustíveis analisados considera-se que 1% do carbono será incorporado as cinzas ou outros subprodutos (MATTOS, 2001). Apresenta-se a terceira fórmula:

$$ECO_2 = QC * 44/12 * 0,99 \quad (3)$$

onde:

ECO<sub>2</sub> = emissões de CO<sub>2</sub>;

QC = quantidade de carbono;

44/12 = relação entre os pesos moleculares;

0,99 = taxa de oxidação.

### 3.3 Modelo de Previsão

Essa pesquisa fará uso de um modelo econométrico de series temporais univariadas para fazer a previsão dos valores futuros das emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis analisados.

Uma série temporal é um conjunto de observações obtidas ao longo do tempo de forma diária, semanal, mensal ou anual (MORETTIN, 2011). O proposito de analisar uma serie temporal é identificar padrões não aleatórios que permitam fazer previsões que possam orientar a tomada de decisões (EHLERS, 2007).

Tais padrões são definidos como: Tendência, isto é, o sentido de deslocamento da série ao longo do tempo; Sazonalidade, isto é, um movimento ondulatório de curta duração, normalmente inferior a um ano, e associadas a condições climáticas; Ciclo, isto é, um movimento ondulatório que tende a ser periódico ao longo de vários anos; e Ruído aleatório, isto é, a variabilidade intrínseca aos dados que não pode ser modelado (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Além disso, é desejável que a série seja estacionaria, ou seja, tenha média e variância constante ao longo do tempo. É importante destacar que a estacionariedade da série é essencial pois significa que o futura se comportará de acordo com o passado, permitindo assim que se faça previsões (BUENO, 2011).

O primeiro passo a se tomar é testar a estacionariedade da série, para isso será feito um teste de raiz unitária.

### 3.3.1 Teste de Raiz Unitária

A estacionariedade de uma série pode ser verificada por meio de um teste de raiz unitária, que pode ser representada pela equação:

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

Onde  $u_t$  é o termo de erro.

Observa-se que essa é uma regressão de primeira ordem, pois o valor  $y$  está regredido no instante  $t$  sobre seu valor em  $t - 1$ . Logo, caso o coeficiente seja igual a 1, conclui-se que os dados da série temporal não são estacionários, ou seja, possui raiz unitária.

Portanto, foi usado o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller Aumentado – Elliott-Rothemberg-Stock (DF – GLS) para verificar a estacionariedade das séries.

O teste DF-GLS foi desenvolvido após Elliott, Rothemberg e Stock (1996) analisarem que o teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) perdia poder devido à inclusão de termos determinísticos e do termo do erro não ser um ruído branco, por isso os autores desenvolveram uma equação que modifica o modelo antes da estimação, estimando os termos determinísticos antes e aplicar o teste de Dickey-Fuller sobre o resíduo da variável dependente, demonstrando que o poder desse novo teste é maior com a presença de termos determinísticos. Sendo assim, dois modelos podem ser estimados, um com tendência e intercepto e outro apenas com o intercepto, sendo:

$$y_t = \beta_0 + u_t \quad (5)$$

$$y_t = (\beta_0 + \beta_t) + u_t \quad (6)$$

O teste é dados pela equação:

$$\Delta y_t^d = \gamma \Delta y_{t-1}^d + \sum_{i=1}^e \gamma_i \Delta y_{t-i}^d + \varepsilon_t \quad (7)$$

onde:

$y_t^d = y_t - \beta_0$  modelo com intercepto;

$y_t^d = y_t - (\beta_0 + \beta_t)$  modelo com intercepto e tendência.

A regra de decisão é:  $H_0: \gamma=0$  possui raiz unitária, a série não é estacionária;  
 $H_1: \gamma<0$  não possui raiz unitária, a série é estacionaria.

### 3.3.2 Modelo Teórico

Os modelos de séries temporais univariados são aqueles em que os valores correntes de uma série se relacionam apenas com seus próprios valores no passados ou com os valores correntes e passados dos resíduos da série. Neste estudo será usado o Modelo Auto-Regressivo Integrado de Médias Móveis (ARIMA) (MORETTIN; TOLOI, 2006).

O modelo ARIMA foi desenvolvido por Box e Jenkins em 1976. Nesse modelo séries não estacionarias em nível de inclinação podem se tornar estacionarias quando se aplica um determinado numero de diferenças entre seus dados, normalmente, até duas diferenças (MORETTIN; TOLOI, 2006). Assim, se uma série for representada por um modelo ARMA (p, q), e após a aplicação de d diferenças  $y_t$  se torne estacionária a série é descrita por um modelo ARIMA (p, d, q) representada por:

$$\Delta^d y_t = \Phi_1 \Delta^d y_{t-1} + \dots + \Phi_p \Delta^d y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (8)$$

Onde:  $\Delta^d y_t$  indica a diferença da série em d vezes;

Sendo que  $-1 < \Phi < 1$ ;

$y_{t-1}$ ,  $y_{t-p}$  são os valores defasados em p;

$\varepsilon_{t-1}$ ,  $\varepsilon_{t-q}$  são os valores do termo de perturbação defasados em q;

Os modelos ARIMA, segue o ciclo iterativo da metodologia Box e Jenkins que são: identificação, estimação, verificação e a previsão.

A identificação consiste em verificar qual, entre as várias versões do modelo ARIMA, melhor explica o comportamento da série, ela é baseada nos comportamentos da função de autocorrelação (FAC) e função de autocorrelação parcial (FACP). Destaca-se que nessa etapa, uma mesma série pode ser identificada por diferentes modelos dependendo do critério de seleção aplicado. Os critérios de seleção mais usuais são o Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), Schwarz Information Criterion (SIC), e Hannan-Quin Information Criterion (HQC) (MORETTIN; TOLOI, 2006).

A estimação consiste em estimar os parâmetros do modelo identificado, em seguida vem a verificação, na qual se avalia se o processo de estimação dos parâmetros foi bem-sucedido. Caso a estimação não tenha sido bem-sucedida deve-se retornar a etapa de identificação, mas, se tiver sido bem-sucedida, realiza-se a previsão (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Os resultados do modelo de previsão serão gerados com o apoio do software GNU Regression, Econometric and Time-series Library (Gretl) versão 3.

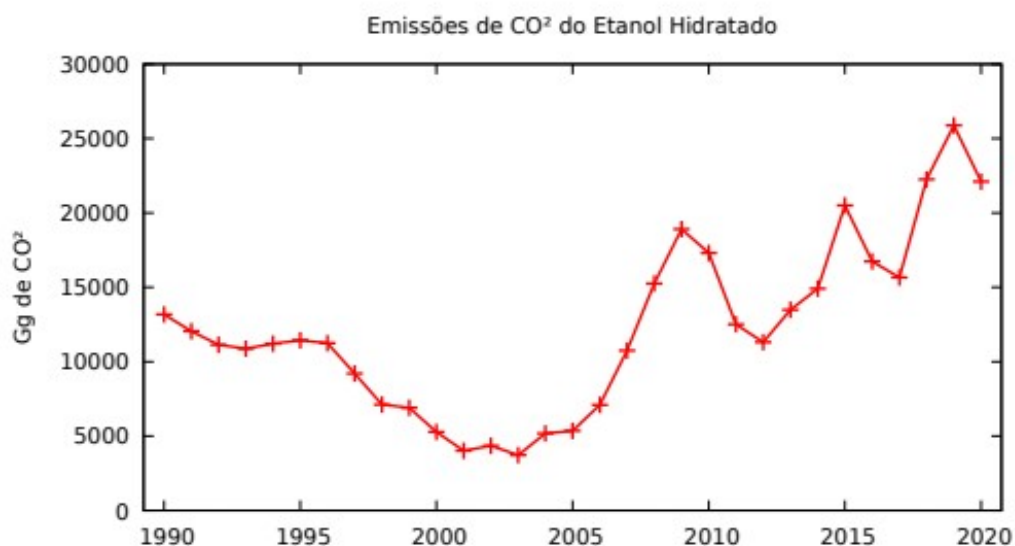
## 4. Resultados e Discussões

### 4.1 Emissões de CO<sub>2</sub> dos Combustíveis

Nesta sessão serão expostos os resultados obtidos pela metodologia de cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> adotada. Na primeira subseção será apresentada as emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado, na segunda subseção será apresentada as emissões de CO<sub>2</sub> da Gasolina C, e na terceira subseção será apresentada de CO<sub>2</sub> as emissões do Óleo Diesel.

#### 4.1.1 Etanol Hidratado

Figura 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado, de 1990 a 2020.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da ANP.

Diante dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do Etanol Hidratado apresentados pela Figura 1, verifica-se que o Etanol Hidratado é o combustível que menos emite CO<sub>2</sub> se comparado a gasolina e o diesel, os quais serão explorados mais adiante, porém é preciso destacar que o etanol é um biocombustível com baixo impacto para a deterioração do meio ambiente, e segundo o IPCC sua emissão não deveria ser contabilizada, mas nesta pesquisa isso foi realizado para que se calculasse quanto de créditos de carbono se geraria pelo combustível.

A Figura 1 apresenta as emissões anuais de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado no período de 1990 até 2003, a emissão de CO<sub>2</sub> deste caiu a uma taxa média de 9,26% a.a., passando de 13177,24 GgCO<sub>2</sub> para 3725,39 GgCO<sub>2</sub>, essa variação pode ser explicada pelo fim do programa proálcool no final dos anos 80, como foi apontado

por Kohlhepp (2010). Se convertermos esses valores de emissões para créditos de carbono, então o etanol produziria o equivalente a 13177240 créditos de carbono em 1990 e produziria o equivalente a 3725390 créditos de carbono em 2003.

A partir de 2003 até 2009, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol cresceu a uma taxa média de 31,09% a.a., passando para 18907,44 GgCO<sub>2</sub>, esse crescimento pode ser explicado devido a produção em massa de carros equipados com motores flex-fuel, como foi apontado por Kohlhepp (2010), tal acontecimento deu um grande impulso para a demanda de etanol no Brasil. Ao se converter esses valores de emissões para créditos de carbono, então o etanol passaria a produzir o equivalente a 18907440 créditos de carbono em 2009.

No período seguinte, de 2009 até 2012, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol caiu a uma taxa média de 15,75% a.a., passando para 11307,28 GgCO<sub>2</sub>, essa queda pode ser explicada pela crise no setor sucroenergético, e a política de manutenção de preços da gasolina e diesel nos anos seguintes, a qual foi uma política que aumentou a crise e retardou a recuperação do setor, reduzindo a oferta de etanol no período e levando os consumidores a consumir mais gasolina, tal fato foi bem explorado por Moraes e Bacchi (2015), essa política se opõe as tendências internacionais de redução das emissões de CO<sub>2</sub> apontadas por Olivier, Schure e Peters (2017), por incentivar o consumo de um combustível fóssil em detrimento de um renovável. Ao se converter esses valores de emissões para créditos de carbono, então o etanol produziria o equivalente a 11307280 créditos de carbono em 2012.

Analisando o intervalo de tempo de 2012 até 2015, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol cresceu a uma taxa média de 21,95% a.a., passando para 20505,11 GgCO<sub>2</sub>, devido a recuperação do setor nesse período. Ao se converter esses dados para créditos de carbono, então o etanol produziria o equivalente a 20505110 créditos de carbono em 2015.

A partir de 2015 até 2017, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol caiu a uma taxa média de 12,61% a.a., passando para 15659,75 GgCO<sub>2</sub>, devido à recessão econômica de 2015 que impactou no setor nesse período, fato que Franco (2018) abordou. Convertendo esses dados, então o etanol produziria o equivalente a 15659750 créditos de carbono em 2017.

Para o período de 2017 até 2019, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol cresceu a uma taxa média de 28,55% a.a., passando para 25878,91 GgCO<sub>2</sub>, devido a recuperação do setor nesse período. Ao se converter esses dados, então o etanol produziria o



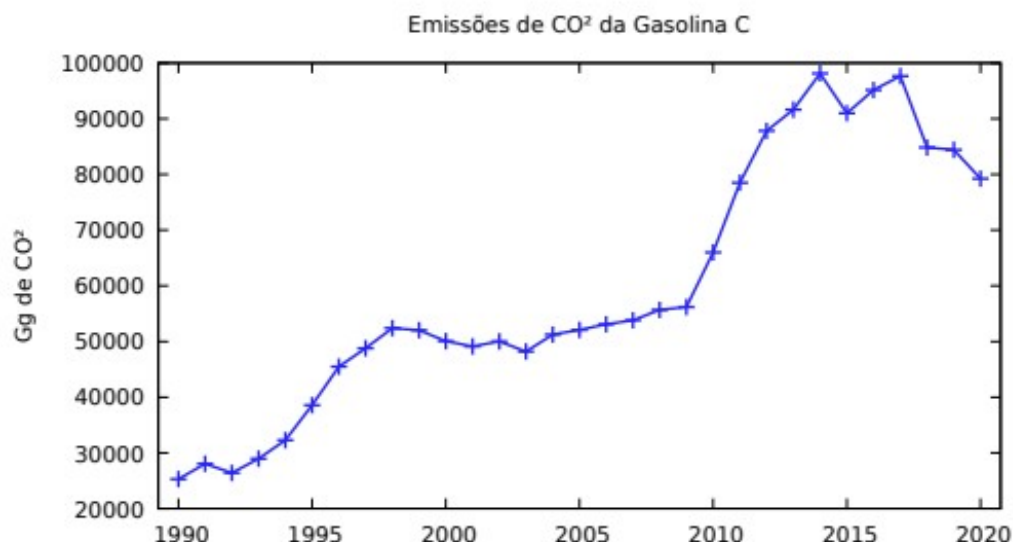
equivalente a 25878910 créditos de carbono em 2019. Por fim, em 2020, a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol caiu para 22106,69 GgCO<sub>2</sub>, devido ao lockdown implementado como política de combate a pandemia de Covid-19, fato que também foi levantado por Chiappini (2021). Convertendo para créditos de carbono, então o etanol produziria o equivalente a 22106690 créditos de carbono.

Todos esses dados mostram que o etanol poderia produzir uma quantidade considerável de créditos de carbono, pois sabendo-se que cada 1 tonelada de CO<sub>2</sub>, cuja emissão foi evitada ou sequestrada, equivale a 1 crédito de carbono, e que toda a emissão de CO<sub>2</sub> do etanol é na verdade a liberação do carbono que estava fixado no mesmo, informação explicada por Poyer *et al*, (2020). Se esses créditos fossem então apropriados pelos produtores de etanol, isso poderia possibilitar um aumento da rentabilidade da produção de etanol o que levaria a expansão da produção e, conseqüentemente, do consumo do mesmo, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> não renovável na atmosfera.

#### 4.1.2 Gasolina C

As emissões de CO<sub>2</sub> emitidas pela gasolina tipo C no período de 1990 a 2020 podem ser vistas pela Figura 2. No período de 1990 até 1998, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina cresceu a uma taxa média de 9,53% a.a., passando de 25300,65 GgCO<sub>2</sub> para 52411,42 GgCO<sub>2</sub>, esse crescimento pode ser explicado pelo fim do programa proálcool no final dos anos 80, como foi apontado por Kohlhepp (2010), pois trouxe um fim aos carros movidos a etanol, impulsionando o consumo de gasolina, e também pode ser explicado pela maior liberalização do mercado devido ao Plano Nacional de Desestatização, o qual fez com que a Petrobras focasse mais nos produtos da cadeia petrolífera, como foi apontado por Pinto Jr et al (2007).

Figura 2 – Emissões de CO<sub>2</sub> da Gasolina C, de 1990 a 2020.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da ANP.

A partir de 1998 até 2003, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina caiu a uma taxa média de 1,66% a.a., passando para 48196,07 GgCO<sub>2</sub>, devido ao fim dos subsídios ao consumo de derivados do petróleo, como destaca Pinto Jr et al (2007). Vale destacar que essa medida foi boa do ponto de vista ambiental, pois o governo não deveria incentivar a demanda por combustíveis fósseis através de subsídios, visto seu impacto negativo ao meio ambiente.

No entanto, de 2003 até 2009, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina cresceu a uma taxa média de 2,59% a.a., passando para 56199,24 GgCO<sub>2</sub>, isso pode ser explicado pelos investimentos privados feitos nesse período, dado as concessões feitas pelo governo como foi levantado por Pinto Jr et al (2007), vale ainda destacar que esse crescimento teria sido maior se não fosse pelo crescimento do consumo do etanol nesse período, dado a produção em massa de veículos flex-fuel, pois o etanol é um combustível substituto da gasolina, como explicou Kohlhepp (2010).

A partir de 2009 até 2014, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina cresceu a uma taxa média de 11,79% a.a., passando para 98123,83 GgCO<sub>2</sub>, isso é ser explicado pela crise de 2009, que impactou no mercado de etanol, reduzindo sua oferta, o que, conseqüentemente, levou a um aumento do consumo da gasolina, como argumenta Moraes e Bacchi (2015). Outro fator importante, o qual também foi explorado por Moraes e Bacchi (2015), foi a política de manutenção dos preços da gasolina e diesel, que incentivou o consumo da gasolina em detrimento ao etanol, uma medida ruim do ponto de vista ambiental, pois o governo não deveria incentivar a demanda por combustíveis fósseis através de subsídios de qualquer tipo, visto seu impacto negativo ao meio ambiente.

Em 2015, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina caiu para 90986,77 GgCO<sub>2</sub>, fato que pode ser explicado pelo argumento de Nogueira (2015), que diz que o crescimento da competitividade do etanol naquele ano fez com que o consumo de gasolina caísse. E de 2015 até 2017, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina cresceu a uma taxa média de 3,60% a.a., passando para 97648,93 GgCO<sub>2</sub>, o que pode ser explicado pela recessão econômica que impactou no consumo de etanol após 2015, levando a um aumento do consumo da gasolina.

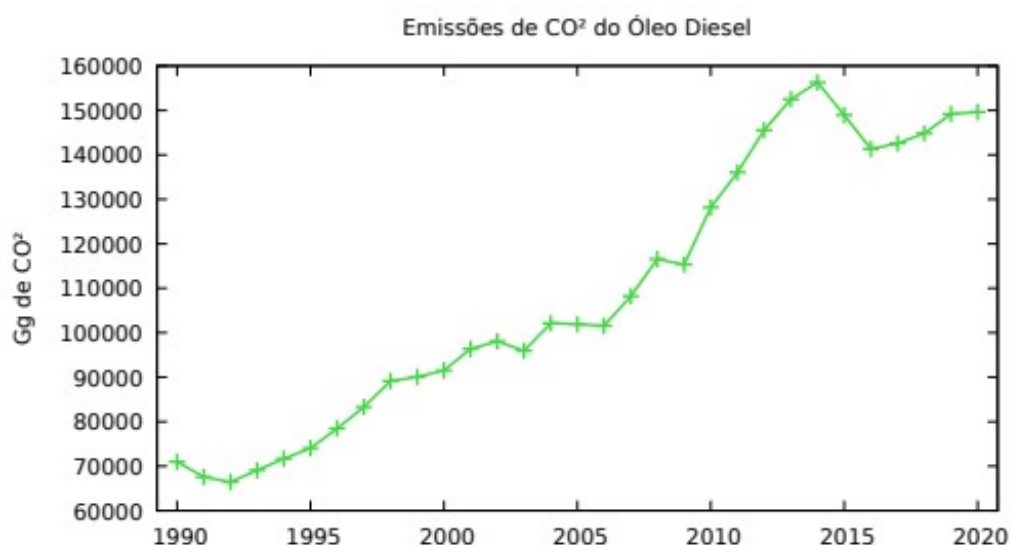
A partir de 2017 até 2019, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina caiu a uma taxa média de 7,02% a.a., passando para 84412,56 GgCO<sub>2</sub>, devido, em grande parte,

pelo ganho de competitividade do etanol em relação à gasolina, como levantou Silveira, (2020). Em 2020, a emissão de CO<sub>2</sub> da gasolina caiu para 79233,85 GgCO<sub>2</sub>, devido ao lockdown implementado como política de combate a pandemia de Covid-19, como aponta o Valor Online (2021).

#### 4.1.3 Óleo Diesel

Diante dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do óleo diesel apresentados pela Figura 3, verifica-se que de 1990 até 2008, sua emissão cresceu a uma taxa média de 2,79% a.a., passando de 70983,31 GgCO<sub>2</sub> para 116537,18 GgCO<sub>2</sub>, essa variação pode ser explicada em grande parte pelo crescimento do PIB nesse período, pois sendo este um combustível ligado diretamente ao setor logístico é natural que oscile no mesmo nível, conforme a observação feita por Mattos (2001).

Figura 3 – Emissões de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel, de 1990 a 2020.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da ANP.

Em 2009, a emissão do Óleo Diesel caiu para 115325,33 GgCO<sub>2</sub>, devido à crise de 2009, mas de 2009 até 2014, a emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel cresceu a uma taxa média de 6,27% a.a., passando para 156284,57 GgCO<sub>2</sub>, registrando, novamente, um longo período em que o consumo de diesel cresceu acima do crescimento do PIB.

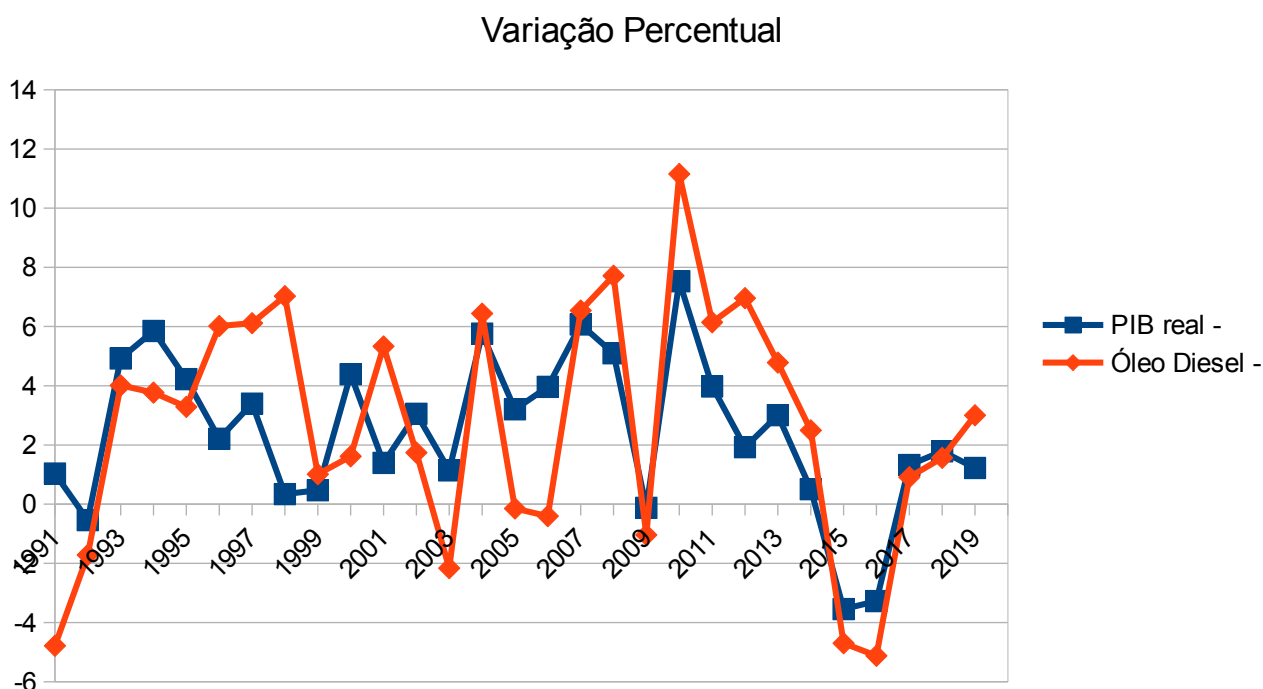
Esse crescimento pode ser explicado pelos estímulos para a aquisição de caminhões com financiamento pelo BNDES feito pelo governo, como destaca Dörner e Braun, (2015), e, também, devido a política de manutenção dos preços dos

derivados do petróleo implementada pelo governo, como explicou Moraes e Bacchi (2015), e essas políticas também foram ruins do ponto de vista ambiental, por incentivar a demanda por combustíveis fósseis, especialmente se considerarmos que o diesel é o combustível que tem o maior impacto ambiental negativo se compara do a qualquer outro combustível usado no setor de Transporte Rodoviário.

A partir de 2014 até 2016, a emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel caiu a uma taxa média de 4,91% a.a., passando para 141307,26 GgCO<sub>2</sub>, isso pode ser explicado pela crise vivida a partir de 2015, pelo fim da política de manutenção de preços dos derivados do petróleo, conforme Almeida et al (2015), e o não fechamento de novos contratos para aquisição de caminhões financiados pelo BNDES a partir de 2016.

No último período de análise, de 2016 até 2020, a emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel cresceu a uma taxa média de 1,44% a.a., passando para 149621,09 GgCO<sub>2</sub>, isso pode ser explicado pelo retorno do crescimento da atividade econômica nesse período, e em 2020 especialmente pelas safras recordes de grãos, como apontou o Valor Online (2021), que compensaram a recessão econômica que se viveu nesse ano.

Figura 4 – Variação Percentual do Crescimento do PIB e do Óleo Diesel, de 1991 a 2019.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do IBGE e da ANP.

Como mostra a Figura 4, o crescimento do consumo de diesel segue o crescimento do PIB ao longo dos anos, porém é possível destacar que nos anos de 1996 até 1998 o consumo de diesel cresceu muito mais se comparado com o PIB, tal fato pode ser explicado pelo teto de preços dos derivados do petróleo implementada em 1996, como foi explorado por Pinto Jr et al, (2007), o que incentivou o consumo de diesel nesse período.

## 4.2 Modelos de Previsão das Emissões de CO<sub>2</sub> dos Combustíveis

Nesta seção serão elaborados os modelos ARIMA para a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado, da Gasolina C e do Óleo Diesel, em que se estimará as emissões de CO<sub>2</sub> para os próximos 5 anos. Na primeira subseção será elaborado o modelo ARIMA para a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado, na segunda subseção será elaborado o modelo ARIMA para a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> da Gasolina C, e na terceira subseção será elaborado o modelo ARIMA para a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel.

### 4.2.1 Etanol Hidratado

Para elaborar o modelo ARIMA é necessário testar se a série é estacionária, para isso aplicou-se o teste ADF-GLS nas emissões de CO<sub>2</sub> do etanol, obtendo-se o seguinte resultado exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Testes de Raiz Unitária em Nível e na Primeira Diferença da Emissão de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado.

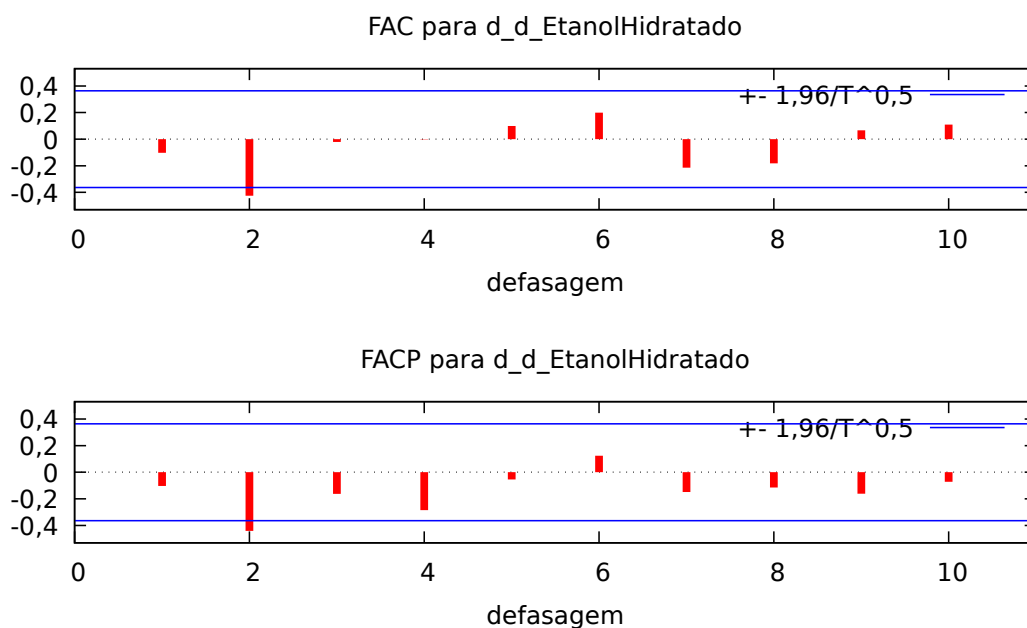
Teste em nível	ADF-GLS
Com constante	-0,760316
Teste em primeira diferença	
Com constante	-3,83396***

\*\*\*Significativo a 1%.

A partir desse resultado, verificou-se que a série não é estacionária, como resultado, aplicou-se a primeira diferença na série com o objetivo de torná-la estacionária, o que se verificou correto, portanto, o modelo final de previsão deverá conter uma diferença.

Para se identificar os parâmetros autorregressivo e o parâmetro de médias moveis aplicou-se uma diferença na série já diferenciada das emissões do etanol. A partir dessa série pode-se extrair os valores FAC e FACP:

Figura 5 – FAC e FACP da Emissão de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado na Segunda Diferença.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

A partir desse resultado, estima-se que, pela análise do valor de FAC, ao nível crítico de 5%, o parâmetro autorregressivo pode ser de até duas defasagens, e pela análise do valor de FACP, ao nível crítico de 5%, o parâmetro de médias móveis pode ser de até duas defasagens.

Faz-se então a verificação de qual o melhor modelo a partir dos parâmetros estimados. Nesse processo verificou-se que o modelo ARIMA (0, 1, 1) sem a constante é o melhor modelo para fazer previsão das emissões do etanol.

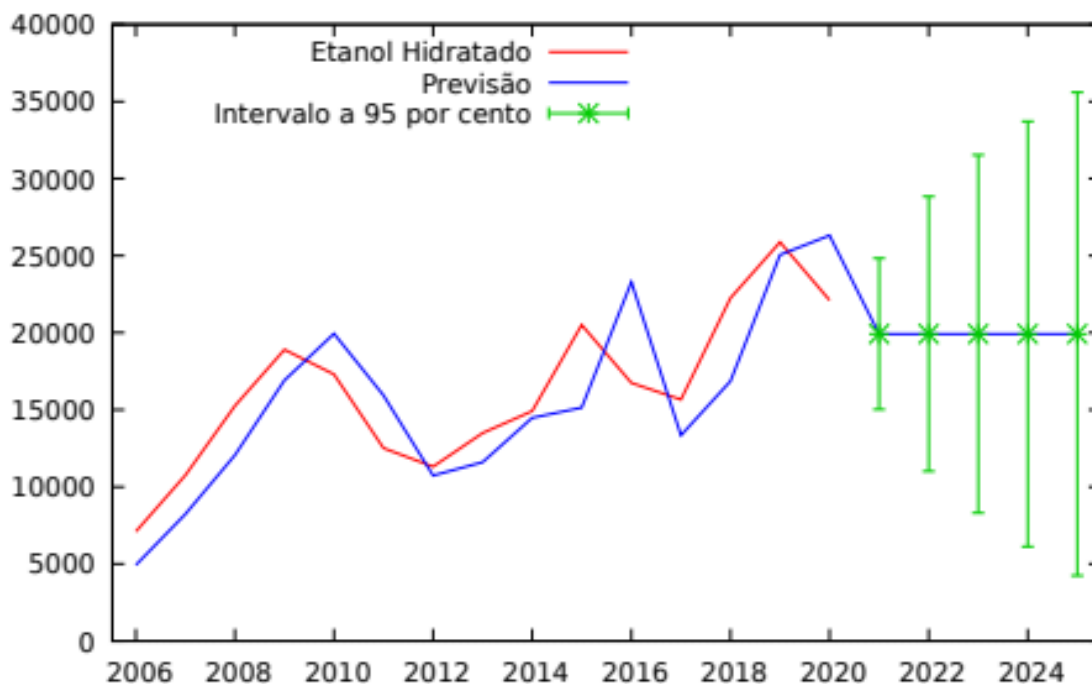
Tabela 2 – Resultado do Modelo ARIMA (0, 1, 1) para a Emissão de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado.

	Coefficiente	Erro Padrão	z	p-valor
$\theta_1$	0,519601	0,176607	2,942	0,0033 ***

\*\*\*Significativo a 1%.

A partir desse resultado pode-se, então, fazer a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado para os próximos anos. Para esta pesquisa buscou-se prever a emissões de CO<sub>2</sub> do etanol para os próximos 5 anos, obtendo-se os seguintes resultados:

Figura 6 – Previsão das Emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado no Brasil para o Período de 2021 a 2025.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Como mostra a Figura 6, a emissões de CO<sub>2</sub> do etanol devem ficar em torno do valor de 19923,4 GgCO<sub>2</sub> para os anos de 2021 a 2025, com um erro padrão de 2499,63 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 15024,2 GgCO<sub>2</sub> até 24822,5 GgCO<sub>2</sub>, para o ano de 2021, da mesma forma possui um erro padrão de 7997,54 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 4248,47 GgCO<sub>2</sub> até 35598,3 GgCO<sub>2</sub>, para o ano de 2025.

Tais valores são razoáveis considerando os altos e baixos registrado nos últimos anos, mas o valor deve ficar acima dos valores registrados em 2008 ou anterior, e se considerar-se a área de espaço de confiança, o etanol poderia produzir 19923400 créditos de carbono nesse período, caso o Brasil estivesse integrado ao mercado mundial de créditos de carbono.

#### 4.2.2 Gasolina C

Para elaborar o modelo ARIMA é necessário testar se a série é estacionária, para isso aplicou-se o teste ADF-GLS nas emissões de CO<sub>2</sub> da gasolina, obtendo-se o seguinte resultado apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Testes de Raiz Unitária em Nível, na Primeira Diferença e na Segunda Diferença da Emissão de CO<sub>2</sub> da Gasolina C.

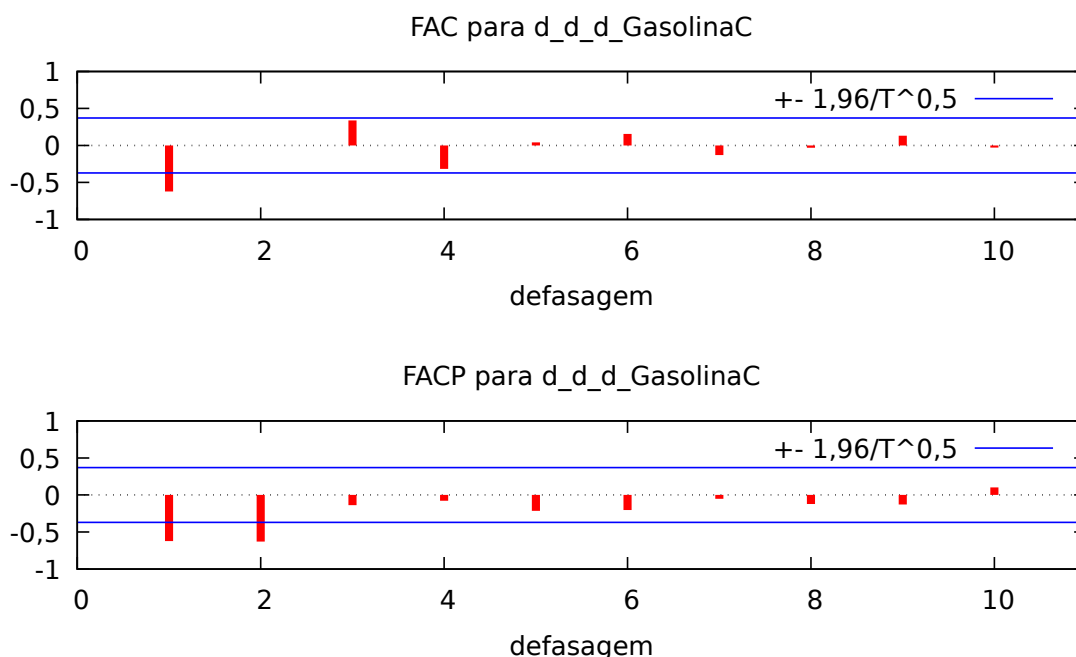
Teste em nível	ADF-GLS
Com constante	-0,45771
Com constante e tendência	-1,27974
<b>Teste em primeira diferença</b>	
Com constante	-1,51231
Com constante e tendência	-1,73244
<b>Teste em segunda diferença</b>	
Com constante	-1,08435
Com constante e tendência	-8,62907***

\*\*\*Significativo a 1%.

A partir desse resultado, verificou-se que a série não era estacionária, como resultado, aplicou-se a primeira diferença na série com o objetivo de torná-la estacionária, o que não ocorreu, por isso aplicou-se a segunda diferença na série, e se verificou correto, portanto, o modelo final de previsão deverá conter duas diferenças.

Para se identificar os parâmetros autorregressivo e o parâmetro de médias moveis aplicou-se uma diferença na série já diferenciada duas vezes das emissões da gasolina. A partir dessa série, a Tabela 5 apresenta os valores FAC e FACP.

Figura 7 – FAC e FACP da Emissão de CO<sub>2</sub> da Gasolina C na Terceira Diferença.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.



A partir desse resultado, estima-se que, pela análise do valor de FAC, ao nível crítico de 5%, o parâmetro autorregressivo pode ser de até um, e pela análise do valor de FACP, ao nível crítico de 5%, o parâmetro de médias moveis pode ser de até dois.

Faz-se então a verificação de qual o melhor modelo a partir dos parâmetros estimados. Nesse processo, conforme apresentado na Tabela 6, verificou-se que o modelo ARIMA (0, 2, 1) sem a constante é o melhor modelo para fazer previsão das emissões do etanol.

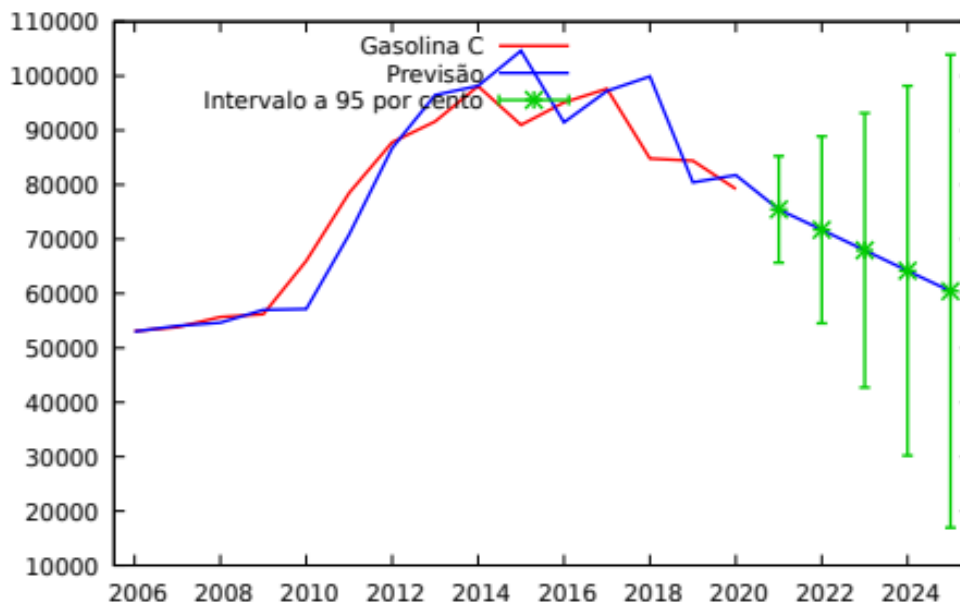
Tabela 4 – Resultado do Modelo ARIMA (0, 2, 1) para a Emissão de CO<sub>2</sub> da Gasolina C.

	Coefficiente	Erro Padrão	z	p-valor
$\theta_1$	-0,557907	0,168117	-3,319	0,0009***

\*\*\*Significativo a 1%.

A partir desse resultado pode-se, então, fazer a previsão das emissões de CO<sub>2</sub> da Gasolina C para os próximos anos. Para esta pesquisa buscou-se prever a emissões de CO<sub>2</sub> do etanol para os próximos 5 anos, obtendo-se os seguintes resultados:

Figura 8 – Previsão das Emissões de CO<sub>2</sub> da Gasolina C no Brasil para o Período de 2021 a 2025.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Pela previsão apresentada na Figura 7, as emissões de CO<sub>2</sub> da gasolina devem ser de 75474,4 GgCO<sub>2</sub> para 2021, com um erro padrão de 4998,29 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 65678,0 GgCO<sub>2</sub> até 85270,9 GgCO<sub>2</sub>, então o consumo deve diminuir, atingindo o valor 60436,7 GgCO<sub>2</sub> no ano de 2025, com um erro padrão de 22187,7 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 16949,6 GgCO<sub>2</sub> até 103924,0 GgCO<sub>2</sub>.

Essa estimativa é devida aos menores valores históricos do consumo da gasolina em relação aos valores mais recentes, esses valores poderiam ser alcançados se o etanol crescesse mais nos próximos anos, o que seria uma coisa boa do ponto de vista ambiental.

#### 4.2.3 Óleo Diesel

Para elaborar o modelo ARIMA é necessário testar se a série é estacionária, conforme o teste ADF-GLS apresentado na Tabela 7 aplicado nas emissões de CO<sub>2</sub> do diesel, obtendo-se o seguinte resultado.

Tabela 5 – Testes de Raiz Unitária em Nível e na Primeira Diferença da Emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel.

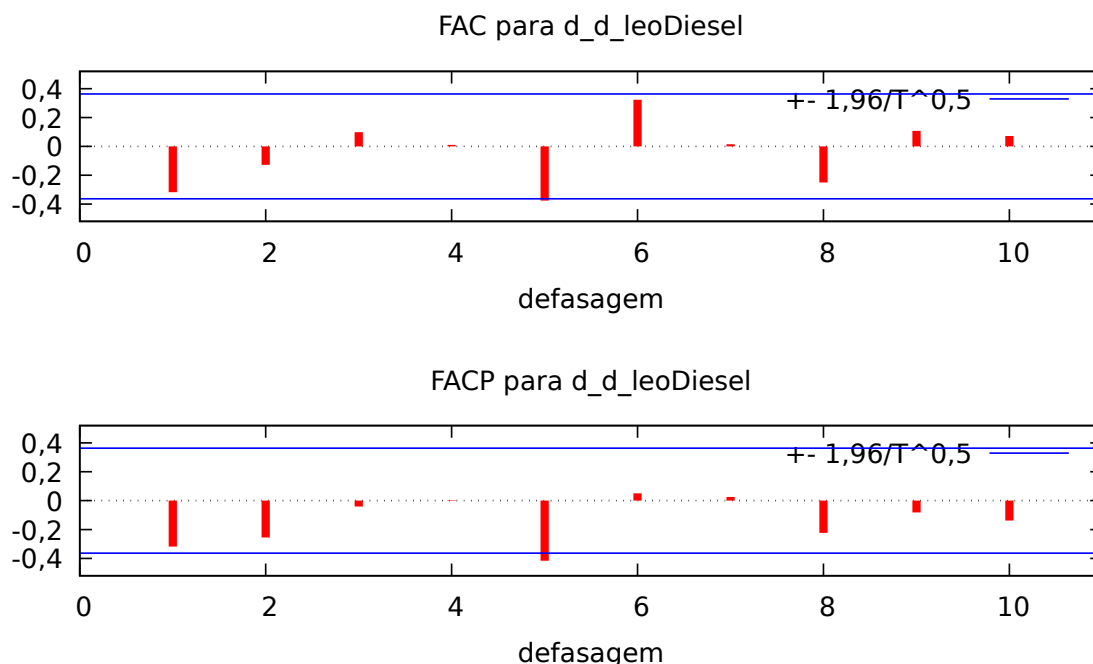
<b>Teste em nível</b>	<b>ADF-GLS</b>
Com constante	-0,408631
<b>Teste em primeira diferença</b>	
Com constante	-3,38798***

\*\*\*Significativo a 1%.

Conforme o teste, a série apresenta uma raiz unitária, isto é, não apresenta estacionariedade, logo se aplica primeira diferença na série com o objetivo de torná-la estacionaria, o que de fato o teste indicou que se torna estacionária.

O passo seguinte se refere a encontrar as possíveis ordens do modelo, para esta finalidade, a partir de uma diferença na série já diferenciada das emissões do diesel se obteve a FAC e FACP, conforme mostra a Tabela 8.

Figura 9 – FAC e FACP da Emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel na Segunda Diferença.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Os resultados da significância das defasagens da FAC e FACP indicam que o parâmetro autorregressivo e de média móvel podem chegar na ordem 5. O que não torna a construção do modelo de forma simples, portanto esta indicação apenas nos leva a construir diversas combinações para então, encontrar o modelo com os menores critérios de informação.

Após inúmeras tentativas para construir um modelo com parâmetros estimados significativos, encontrou-se dois modelos: ARIMA (4, 1, 3) com a constante e o modelo ARIMA (0, 1, 0) com a constante. No entanto, os critérios de informação apresentados na Tabela 9 indicam que o melhor modelo é aquele com apenas uma diferença na série, ou seja, o modelo ARIMA (0, 1, 0) com a constante. Esse resultado ocorreu principalmente pelo princípio da parcimônia, onde existe uma penalização por modelos com muitos parâmetros estimados, sendo então escolhido o modelo mais simples.

Tabela 6 – Critério de Akaike, Critério de Schwarz e Critério Hannan-Quinn dos modelos de previsão da Emissão de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel.

Modelos	Critério de Akaike	Critério de Schwarz	Critério Hannan-Quinn
ARIMA (4, 1, 3)	596,3458	608,9566	600,3801
ARIMA (0, 1, 0)	593,9050	596,7073	594,8015

A partir desse resultado pode-se, então, fazer a previsão da emissões de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel para os próximos anos. Para esta pesquisa buscou-se prever a emissões de CO<sub>2</sub> do diesel para os próximos 5 anos, obtendo-se os seguintes resultados:

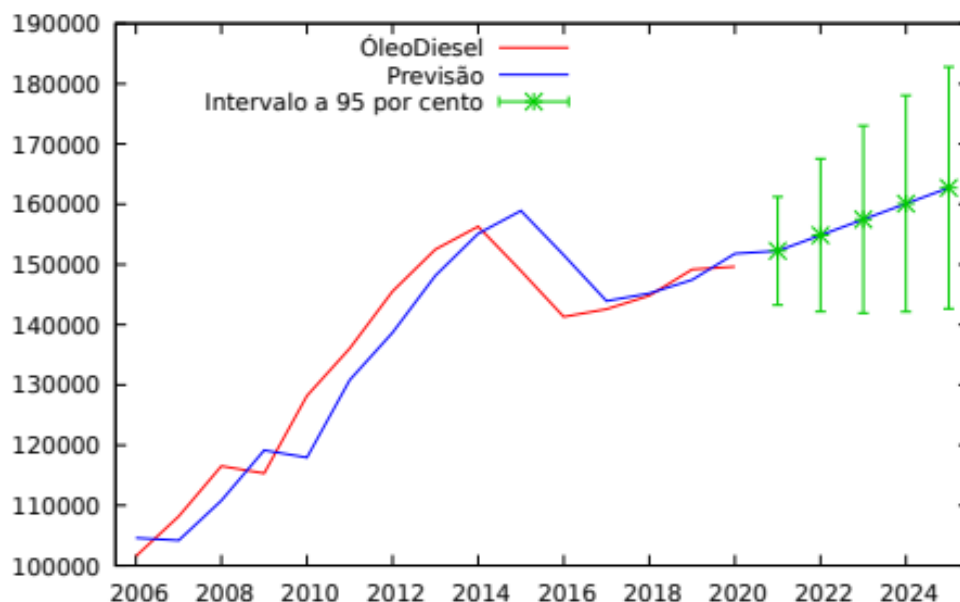
Tabela 7 – Resultado do Modelo ARIMA (0, 1, 0) para o Óleo Diesel Emissão de CO<sub>2</sub>.

	Coefficiente	Erro Padrão	z	p-valor
Constante	2621,26	836,447	3,134	0,0017***

\*\*\*Significativo a 1%.

A Figura 8 mostra a projeção das emissões de CO<sub>2</sub> do diesel de 152242 GgCO<sub>2</sub> para 2021, com um erro padrão de 4581,41 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 143263 GgCO<sub>2</sub> até 161222 GgCO<sub>2</sub>, então o consumo deve crescer linearmente, atingindo o valor 162727 GgCO<sub>2</sub> no ano de 2025, com um erro padrão de 10244,3 GgCO<sub>2</sub>, e intervalo de confiança de 95%, de 142649 GgCO<sub>2</sub> até 182806 GgCO<sub>2</sub>.

Figura 10 – Previsão das Emissões de CO<sub>2</sub> do Óleo Diesel no Brasil para o Período de 2021 a 2025.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

As estimativas do modelo são razoáveis considerando que o crescimento do consumo de diesel segue o crescimento do PIB, com o modelo superando o valor

mais alto registrado por este mesmo para 2015 já no ano de 2024, e se considerasse a área de espaço de confiança, a previsão não deve errar.

## **5. Considerações Finais**

A qualidade de vida e competitividade econômica dos países sofre forte influência da disponibilidade de energia desde a revolução industrial, porém o consumo dessas diversas formas de energia está também diretamente ligada a emissão de GEE, os quais tem impacto negativo ao meio ambiente, e podem levar a humanidade a viver em um mundo pior no futuro em diversos aspectos.

Por esse, motivo essa pesquisa calculou as emissões de CO<sub>2</sub> dos principais combustíveis usados no setor de Transporte Rodoviário no Brasil, tendo em vista que o CO<sub>2</sub> é o principal GEE emitido pelo ser humano, e identificou que o consumo de combustíveis cresceu bastante nos desde a década de 1990, e assim cresceram as emissões de CO<sub>2</sub>, com as emissões da Gasolina C passando de 25300,65 GgCO<sub>2</sub> em 1990 para 79233,85 GgCO<sub>2</sub> em 2020, da mesma forma as emissões do Óleo Diesel passou de 70983,3 GgCO<sub>2</sub> em 1990 para 149621,1 GgCO<sub>2</sub> em 2020.

Por outro lado, verificou-se as emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol Hidratado, o qual é um biocombustível com baixo impacto ao meio ambiente, considerando que o CO<sub>2</sub> liberado foi previamente sequestrado no processo de cultivo da cana-de-açúcar, essas emissões não gerariam impacto ambiental. Calculou-se quantos créditos de carbono seriam gerados pelo etanol, onde em 1990 foi de 13177,24 GgCO<sub>2</sub> para 22106,69 GgCO<sub>2</sub> em 2020, isso seria o mesmo que 13177240 créditos de carbono em 1990 para 22106690 créditos de carbono em 2020.

O principal fator para o crescimento do consumo do etanol foi a produção em massa carros equipados com motores flex-fuel, porém a crise no setor sucroenergético e a política de manutenção de preços dos derivados do petróleo fizeram com que o consumo de etanol caísse e o consumo de gasolina crescesse, isso foi ruim do ponto de vista ambiental. Pelo lado do diesel o crescimento da economia é o principal fator para seu crescimento, mas os estímulos para a aquisição de caminhões com financiamento pelo BNDES feito pelo governo, assim como a política de manutenção de preços dos derivados do petróleo, fizeram com que seu consumo crescesse muito em anos recentes, o que aumenta a degradação ambiental pelas altas emissões de CO<sub>2</sub>.

Esta pesquisa também estimou por meio do modelo ARMIA as emissões de CO<sub>2</sub> desses combustíveis nos próximos cinco anos. O resultado é que as emissões do etanol devem ficar em torno de 19923,4 GgCO<sub>2</sub> até 2025, as emissões da gasolina devem diminuir passando de 75474,4 GgCO<sub>2</sub> em 2021, para 60436,7 GgCO<sub>2</sub> em 2025, e as emissões do diesel devem crescer passando de 152242 GgCO<sub>2</sub> em 2021, para 162727 GgCO<sub>2</sub> em 2025.

Essa pesquisa, no entanto, não esgota todas as possibilidades de análises, e o assunto do setor de transporte rodoviário pode ser aprofundado por pesquisas posteriores que agreguem mais dados de novas fontes, e novos métodos. Uma possibilidade futura é o uso de um modelo de série temporal multivariado utilizando covariáveis que expliquem os impactos causados pelas emissões de CO<sub>2</sub> desses combustíveis.

## Referências

ALMEIDA, E. L. F. de; OLIVEIRA, P. V. de; LOSEKANN, L. Impactos da Contenção de Preços de Combustíveis no Brasil e Opções de Mecanismos de Precificação. **Revista de Economia Política**, v.35, n.3, p.531-556, Jul./Set. 2015.

ÁLVARES JR, Olimpio de Melo.; LINKE, Renato Ricardo Antonio. Metodologia simplificada de cálculo das emissões de gases do efeito estufa de frotas de veículos no Brasil. **CETESB**, v. 182, 2001.

BRASIL, ANP. **Vendas de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos> >. Acesso em: 09 junho 2022.

\_\_\_\_\_, BNDES. **RELATÓRIO DE GESTÃO DO EXERCÍCIO DE 2016**. 2017. Disponível em: < <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/ef1e0277-3b61-4dee-86e9-ea2ae2bc0098/Relatório+de+Gestão+2016.pdf?MOD=AJPERES&CVID> >. Acesso em: 29 junho 2020.

\_\_\_\_\_, EPE. **Balço Energético Nacional 2021: Ano Base 2020**. 2021

\_\_\_\_\_, MCT. Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-Quadro das nações unidas sobre Mudança do clima. 2010.

BUENO, R. L. S. Econometria de séries temporais. São Paulo: **Cengage Learning**, 2011.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. Texto para Discussão, **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, 2011.

CHIAPPINI, Gabriel. Produção de etanol cai 9% na safra 2020/21 e deve seguir em queda no próximo período. **epbr**, 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/producao-de-etanol-cai-9-na-safra-2020-21-e-deve-seguir-em-queda-no-proximo-periodo/>>

CRUVINEL, Rodrigo Rosa da Silva; PINTO, Paulo Victor Hermetério; GRANEMANN, Sérgio Ronaldo. Mensuração econômica da emissão de CO<sub>2</sub> da frota dos transportadores autônomos de cargas brasileiros. **Journal of Transport Literature**, v. 6, n. 2, p. 234-252, 2012.

DÖRNER, Stefan Hubertus; BRAUN, Mirian Beatriz Schneider. As políticas comerciais do Brasil entre 1994 e 2014 e seus efeitos sobre a produtividade da indústria automobilística. **Economia & Região**, v. 3, n. 1, p. 141-159, 2015.

EHLERS, R. S. **Análise de séries temporais**. In: **Notas de aula de séries temporais**. São Paulo: USP, 2007.

ELLIOTT, G., ROTHENBERG, T. J. & STOCK, J. H.. Efficient tests for an autoregressive unit root. **Econometrica**, 1996.

FRANCO, Frederico Victor. 2000/2018 - Evolução da produção e venda de Etanol no Brasil. **AGROLINK**, 2018. Disponível em:

<[https://www.agrolink.com.br/colunistas/2000-2018---evolucao-da-producao-e-venda-de-etanol-no-brasil\\_412862.html](https://www.agrolink.com.br/colunistas/2000-2018---evolucao-da-producao-e-venda-de-etanol-no-brasil_412862.html)>

GOMES, Vallência Maíra; FARIA, Alexandre Magno de Melo; DALLEMOLE, Dilamar. Estimativa da Emissão de Gás Carbônico Derivado do Consumo de Combustíveis do Brasil e Mato Grosso entre 2000 e 2008: Identificando Contenção de Externalidades Negativas e Tendências de Ajustamento a uma Economia de Baixo Carbono. **Revista de Estudos Sociais**, v. 12, n. 24, p. 129-152, 2010.

IPCC. **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge University Press, 2014.

\_\_\_\_\_. **Global warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. 2018.

\_\_\_\_\_. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: **Institute for Global Environmental Strategies**, 2006.

JANSSENS-MAENHOUT, Greet et al. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 3, p. 959-1002, 2019.

KOHLHEPP, Gerd. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estud. av.**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

MATTOS, Laura Bedeschi Rego de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa: O caso do Município do Rio de Janeiro**. 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.



MENDONÇA, Mário Jorge Cardoso de; GUTIEREZ, Maria Bernadete Sarmiento. Efeito estufa e o setor energético brasileiro. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada** (IPEA), 2000.

MORAES, Marcelo Lopes de; BACCHI, Mirian Rumenos Piedade. Etanol: do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 4, p. 5-22, 2015.

MORETTIN, P. A.; TOLÓI, C. M. C. **Análise de séries temporais** (2ed.). São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

MORETTIN, Pedro A. **Econometria Financeira: Um curso em séries temporais financeiras**. São Paulo: **Blucher**, 2011.

NOGUEIRA, Marta. ENTREVISTA-Consumo de gasolina e diesel recuará no país em 2015, diz Sindicom. **Routers**, 2015. Disponível em: <<https://br.noticias.yahoo.com/entrevista-consumo-gasolina-e-diesel-recuar-%C3%A1-no-pa%C3%ADs-221533794--finance.html>>

OLIVIER, Jos GJ; SCHURE, K. M.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2017 Report**. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017.

PINTO JR, Helder Queiroz. **Economia da energia : fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2007.

POYER, F. R.. **Crédito de Carbono: panorama das publicações no Brasil para os últimos dez anos (2009 a 2019)**. Porto Alegre: UFRGS, 2020.

SANTOS JR, Antônio Carlos Rodrigues dos. **Análise comparativa de modelos estatísticos para previsão de demanda de gasolina no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - **Universidade Federal Fluminense**, Niterói, 2018.

Silveira, Daniel. Consumo de etanol cresce 16,2%, enquanto gasolina cai 0,56% em 2019. **G1**, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/02/18/consumo-de-etanol-avanca-162percent-em-2019-e-de-gasolina-recua-056percent.ghtml>>

THE WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing 2021, **World Bank**, Washington, DC, 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos CEBRAP**, n. 79, p. 47-69, 2007.

Valor Online. Consumo de combustíveis no Brasil em 2020 caiu ao menor nível em 8 anos, aponta ANP. **G1**, 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/02/02/consumo-de-combustiveis-no-brasil-em-2020-caiu-ao-menor-nivel-em-8-anos-aponta-anp.ghtml>>