

**Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade**

**ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA DE EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NO  
BRASIL POR MEIO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE BOX & JENKINS**

**ANALYSIS OF THE HISTORICAL SERIES OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN  
BRAZIL BY THE APPLICATION OF BOX & JENKINS METHODOLOGY**

Jéferson Réus da Silva Schulz e Janis Elisa Ruppenthal

**RESUMO**

O presente estudo tem como objetivo analisar as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil de 1960 até 2013 por meio da metodologia de Box & Jenkins e realizar uma previsão *in-sample* para essa série histórica. Isso permitiria dimensionar a escalar em que as emissões de CO<sub>2</sub> crescem visando incursões específicas que possibilitem sua mitigação. A forma de análise dos dados consiste em uma aplicação da metodologia de Box & Jenkins. Os resultados indicam um crescimento nas emissões de CO<sub>2</sub> entre 1960 e 2013 no Brasil. Modelando a série, encontrou-se como melhor modelo explicativo um ARIMA (0,1,1), sendo a série temporal I(1), uma vez que realizou-se uma diferença para torná-la estacionária.

**Palavras-chave:** sustentabilidade, GEE, emissões de CO<sub>2</sub>, séries temporais, ARIMA.

**ABSTRACT**

The present study aims to analyze CO<sub>2</sub> emissions in Brazil from 1960 to 2013 using the Box & Jenkins methodology and to carry out an *in-sample* forecast for this historical series. This would allow to scale the scale in which the CO<sub>2</sub> emissions grow aiming at specific incursions that allow their mitigation. The form of data analysis consists of an application of the Box & Jenkins methodology. The results indicate an increase in CO<sub>2</sub> emissions between 1960 and 2013 in Brazil. Modeling the series, an ARIMA (0,1,1) was the best explanatory model, being the time series I (1), since a difference was made to make it stationary.

**Keywords:** sustainability, GHG, CO<sub>2</sub> emissions, time series, ARIMA.

## 1 INTRODUÇÃO

Os efeitos causados pelo processo de crescimento econômico sobre os recursos naturais e ambientais tornaram-se uma questão central, implicando o aumento da preocupação com a preservação do meio ambiente (BENGOCHEA-MORANCHO; HIGÓN-TAMARIT; MARTÍNEZ-ZARZOSO, 2001). Tal processo, relacionado às atividades humanas, acarreta a emissão de gases de efeito estufa (GEE), que parece ser a causa principal do aquecimento global e das mudanças climáticas (BENGOCHEA-MORANCHO; HIGÓN-TAMARIT; MARTÍNEZ-ZARZOSO, 2001).

Conforme o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental de Mudança Climática – IPCC) (2007), as alterações nas concentrações atmosféricas de GEE, aerossóis, cobertura terrestre e radiação solar, provocam modificações no balanço energético do sistema climático. Ainda segundo a referida fonte, as emissões globais de GEE devido às atividades humanas aumentaram desde a era pré-industrial em cerca de 70,00% entre 1970 e 2004.

Dentre os GEE, pode-se citar o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o perfluorcarbono (PFC), o hidrofluorcarbono (HFC) e o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), altamente nocivos ao meio ambiente quanto emitidos em grandes quantidades. Nesse contexto, salienta-se que o dióxido de carbono é o GEE antrópico de maior importância uma vez que as suas emissões anuais aumentaram cerca de 80,00% entre 1970 e 2004 (IPCC, 2007).

As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso cresceram acentuadamente desde 1750 como resultado das atividades humanas (IPCC, 2007). Atualmente, essas concentrações ultrapassam em muito as quantidades pré-industriais determinadas a partir de núcleos de gelo que cobrem milhares de anos (IPCC, 2007).

As atividades humanas perfazem a maior proporção da parcela de dióxido de carbono emitida diariamente no planeta, em que até 80,00% do  $\text{CO}_2$  é proveniente da queima de combustíveis fósseis e de usos industriais (COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE (CEPAL), 2016). Entre 2000 e 2010, as emissões cresceram mais rapidamente do que na década anterior, sobretudo em virtude do aumento da utilização de carvão para a geração de energia (CEPAL, 2016). Esses dados tornam-se ainda mais preocupantes considerando-se que, atualmente, a concentração de GEE na atmosfera caracteriza-se como a mais alta dos últimos 800 mil anos (CEPAL, 2016).

Diante desse cenário adverso, há concordância e evidências de que, com as atuais políticas de mitigação das mudanças climáticas e práticas de desenvolvimento sustentável relacionadas, as emissões globais de GEE continuarão a crescer nas próximas décadas (IPCC, 2007). Depreende-se disso que as medidas existentes para mitigar as emissões de GEE ainda são insuficientes em relação à escala em que essas emissões aumentam.

Portanto, considera-se necessário acompanhar a dinâmica e o comportamento das emissões de GEE para que se possa implementar ações estratégicas, no âmbito de políticas ambientais, eficientes no sentido de reduzir os efeitos nocivos por elas gerados. Desse modo, o presente estudo tem como objetivo analisar as emissões de  $\text{CO}_2$  no Brasil, de 1960 até 2013, por meio da metodologia de Box & Jenkins e realizar uma previsão *in-sample* para essa série histórica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O efeito estufa consiste em um mecanismo atmosférico que mantém a Terra aquecida sendo responsável por garantir a vida no planeta (ABREU; ALBUQUERQUE; FREITAS, 2014). No entanto, em excesso, as emissões de gases do efeito estufa têm ocasionado a elevação da temperatura dos oceanos e do ar, com riscos eminentes de mudança climática (ABREU;

ALBUQUERQUE; FREITAS, 2014). Esse cenário adverso tem repercutido em diversos segmentos, atingindo não apenas a esfera ambiental, mas também a econômica e a social. Por essa razão, a questão ambiental tornou-se pauta da agenda de discussões de conferências internacionais, em que líderes mundiais buscam por soluções para esse agravante.

A preocupação mundial com o aquecimento global abarca um novo enfoque em relação à natureza do problema ambiental, passando-se a considerar a existência de um efeito em cadeia, que se origina no meio ambiente e se estende à economia e ao comportamento social em geral (GODOY, 2013). Com efeito, a consequência da convergência de interesses em diminuir as emissões dos GEE fez com que as nações passassem a reunir-se com o intuito de discutir a respeito das implicações e das soluções para esse problema (GODOY, 2013).

O Brasil é signatário de diversos acordos multilaterais no esforço global de redução dos GEE, mesmo não tendo metas obrigatórias de mitigação de dióxido de carbono (LEAL et al., 2015). No entanto, deve-se considerar que, em anos recentes, as taxas de crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> têm sido consideravelmente significativas no Brasil, as quais parecem estar relacionadas ao aumento do uso do gás natural e à queda relativa na utilização do álcool (HILGEMBERG; GUILHOTO, 2006).

Em muitos países, sobretudo nos industrializados, o Produto Interno Bruto (PIB) depende principalmente de fontes primárias de energia, como os combustíveis fósseis, que consistem nos maiores responsáveis pelas emissões de GEE (CEPAL, 2016). De 2000 até 2015, reportando-se ao consumo de energia e respectivas emissões de CO<sub>2</sub>, o Brasil apresenta taxas médias anuais superiores às mundiais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN), 2016). Em relação aos demais países da América do Sul, o Brasil perdeu participação no produto da economia e aumentou na energia e nas emissões de CO<sub>2</sub>, tendo como referência o ano de 2015 (ABEN, 2016).

Há ainda que se mencionar que o volume total das emissões de GEE reduziu em mais de 40,00% desde o ano 2000 no Brasil com a diminuição da taxa de desmatamento, porém, as emissões provenientes do consumo de energia pelas indústrias e pelo transporte aumentaram substancialmente (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE), 2016). Os principais efeitos desses impactos ambientais negativos estão relacionados a existência de previsões de um aumento geral da temperatura entre 3°C e 6°C até 2100 no país e a projeções de fortes variações regionais nas precipitações, com aumento de intensidade nas regiões Sul e Sudeste e intensificação da seca nas regiões Centro Oeste, Norte e Nordeste (CEPAL, 2016).

Diante de um cenário de elevação da queima de combustíveis fósseis, os governos deparam-se com uma necessidade ecológica que implica na regulamentação das emissões de GEE com o intuito reduzir os impactos ambientais (CUNHA; SCALCO, 2013). Essas ações têm sido aceleradas pela intensificação do efeito estufa, reflexo da progressiva interferência do homem no sistema climático do planeta, que passa por um processo de aquecimento global, cujas consequências são irreversíveis e possivelmente catastróficas para as sociedades humanas e para os ecossistemas e sua biodiversidade (CUNHA; SCALCO, 2013). Com efeito, a urgência em implementar medidas mitigadoras desses impactos ambientais nocivos tem sido cada vez maior.

Acordos internacionais pautados na redução das emissões têm sido formalizados em fóruns e discussões que reúnem representantes de diversos países. Um deles é a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), elaborada na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, a Rio 92, em que representantes de 179 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2017).

O principal objetivo da UNFCCC consiste em estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera em um nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático global (MMA, 2017). Em 2009, durante a COP-15 (Conferência das Partes), realizada em Copenhague, o Brasil anunciou uma meta voluntária de redução das emissões de GEE entre 36,10% e 38,90%, projetadas até 2020 (MMA, 2017). Para atingir tal resultado, um Plano de mitigação, o Plano Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), foi implementado em 2010. Esse Plano faz uso de uma série de tecnologias de mitigação específicas para o setor agropecuário, dada a representatividade desse setor no total de emissões de GEE no Brasil.

Sob essa ótica, a inovação pode ser vista como um instrumento potencializador da produtividade sem desrespeitar a necessidade de reduzir os impactos ambientais negativos gerados pelas atividades produtivas. As inovações devem gerar resultados econômicos, sociais e ambientais positivos de forma simultânea, o que não é fácil de se fazer dadas as incertezas que as inovações trazem, principalmente quando são radicais ou com elevado grau de novidade em relação ao estado da arte (BARBIERI et al. 2010).

### 3 METODOLOGIA

Esse estudo utiliza dados sobre as emissões de CO<sub>2</sub> (kt) no Brasil, de 1960 até 2013, disponibilizados no site do Banco Mundial. O método de análise consiste em aplicar a metodologia de Box & Jenkins para modelar a série temporal e realizar uma previsão *in-sample* para as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil. Antes, convém explicitar alguns pressupostos dessa metodologia.

Considerando-se o seguinte modelo:  $y_t = \mu + \varepsilon_t + \theta\varepsilon_{t-1}$ , em que  $\varepsilon_t$  é um ruído branco. Como  $y_t$  depende do erro contemporâneo,  $\varepsilon_t$ , e do erro imediatamente passado, então o processo é chamado de médias móveis de ordem 1 e denotado como MA (1) (BUENO, 2011). Se o processo dependesse de  $\varepsilon_{t-2}$ , então seria chamado de MA (2) e assim por diante. Na forma geral, em um modelo MA (q), q é a ordem do modelo e  $\theta$  é o parâmetro do modelo.

Considerando-se o seguinte processo estocástico:  $y_t = c + \phi y_{t-1} + \varepsilon_t$ , em que  $\varepsilon_t$  é um ruído branco. O processo assim definido é chamado de autorregressivo de ordem 1 e denotado como AR (1), sendo a série explicada por seus valores passados e pelo termo de erro aleatório (BUENO, 2011). Se o processo dependesse de  $y_{t-2}$ , então seria chamado de AR (2) e assim por diante. Na forma geral, em um modelo AR (p), p é a ordem do modelo e  $\phi$  é o parâmetro do modelo.

Há modelos mistos, chamados de processos autorregressivos de médias móveis (ARMA). Nesses modelos, existe uma combinação dos processos AR (p) e MA (q), formando um ARMA (p, q). A equação geral de um modelo ARMA (1,1) tem o seguinte formato:  $y_t = \alpha + \phi y_{t-1} + \theta\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$ .

Para os modelos mencionados, assume-se a condição de estacionariedade da série temporal. Se a série, em nível, não for estacionária, é necessário diferenciá-la d vezes até torná-la estacionária. Logo, a série torna-se integrada de ordem d, I(d), em que d é número de vezes que a série foi diferenciada até tornar-se estacionária. Os modelos nesse formato são chamados de modelos autorregressivos integrados de médias móveis (ARIMA) (p, d, q). A equação geral de um modelo ARIMA (1,1,1) pode ser denotada como:  $D.y_t = \alpha + \phi y_{t-1} + \theta\varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$ , em que D representa o número de defasagens da série original.

Depois de estimado o modelo, deve-se proceder ao diagnóstico dos resíduos para verificar se seguem um formato de ruído branco, isto, é, sem memória, homocedásticos e normalmente distribuídos. Após essa etapa pode-se realizar previsões. Nesse estudo, após realizada a previsão, apresenta-se também as principais estatísticas de previsão para o modelo encontrado. Essas estatísticas consistem em medidas de desempenho da previsão realizada,

como o erro médio (EM), o erro absoluto médio (MAE), o erro quadrático médio (MSE), o erro absoluto percentual médio (MAPE) e o coeficiente de desigualdade de Theil (U).

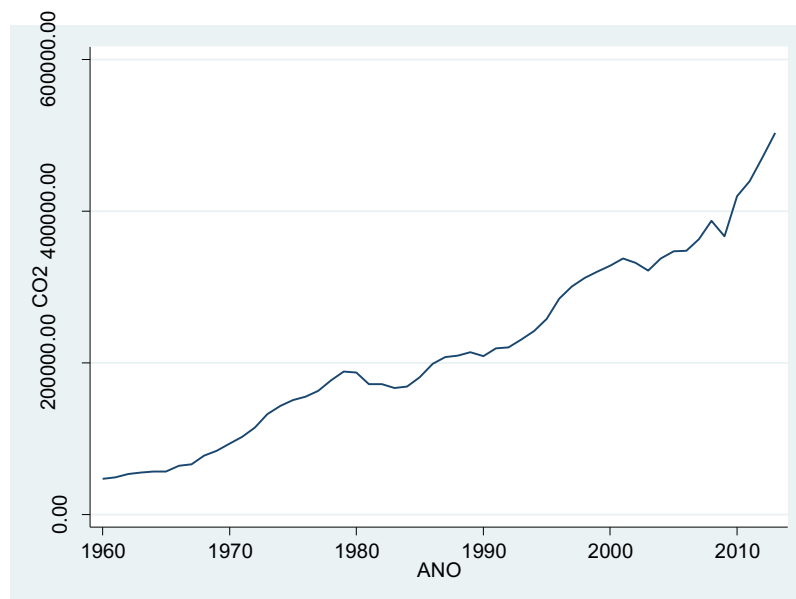
Ressalta-se que utilizar o método de séries temporais permite conhecer o mecanismo gerador da série em estudo. Nesse procedimento, a variável em análise é explicada por seus valores passados, sem a necessidade de ser incorporar variáveis exógenas ao modelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (kt) NO BRASIL DE 1960 ATÉ 2013

Observando-se o gráfico sequencial da série temporal das emissões de CO<sub>2</sub> (kt) em nível (Figura 1), verifica-se que há um comportamento indicativo de não estacionariedade, uma vez que, traçando-se uma linha horizontal imaginária, constata-se que os valores da série não oscilam acima e abaixo de um valor médio. O gráfico permite ainda constatar que a série apresenta uma componente de tendência. Logo, fazendo-se a inspeção visual da série, pode-se considerar que ela é não estacionária, o que sugere a presença de alguma raiz nos operadores de retardo dentro do círculo unitário.

Figura 1 – Série temporal das emissões de CO<sub>2</sub> (kt) em nível



Fonte: Elaborado com base nos dados do Banco Mundial (2017).

No entanto, a inspeção visual da série consiste em um método informal para verificar a estacionariedade de uma série temporal. Isto é, apenas com a inspeção visual não é possível inferir se a série em estudo apresenta ou não raiz unitária. Portanto, foram desenvolvidos testes formais para constatar a presença de alguma raiz nos operadores de retardo dentro do círculo unitário da série.

Dentre esses testes de raiz unitária pode-se citar o Dickey-Fuller (DF) (já em desuso), o Dickey-Fuller Aumentado (ADF), o Phillips-Perron (PP), o Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), o Elliot-Rothemberg-Stock (ERS) (DF-GLS), o Ng-Perron (NGP). Nesse estudo, são utilizados os testes ADF e KPSS, sendo considerada uma constante e a influência da

tendência. Salienta-se que por formulações teóricas na mecânica de cada teste, as hipóteses a serem testadas são invertidas nos testes ADF e KPSS.

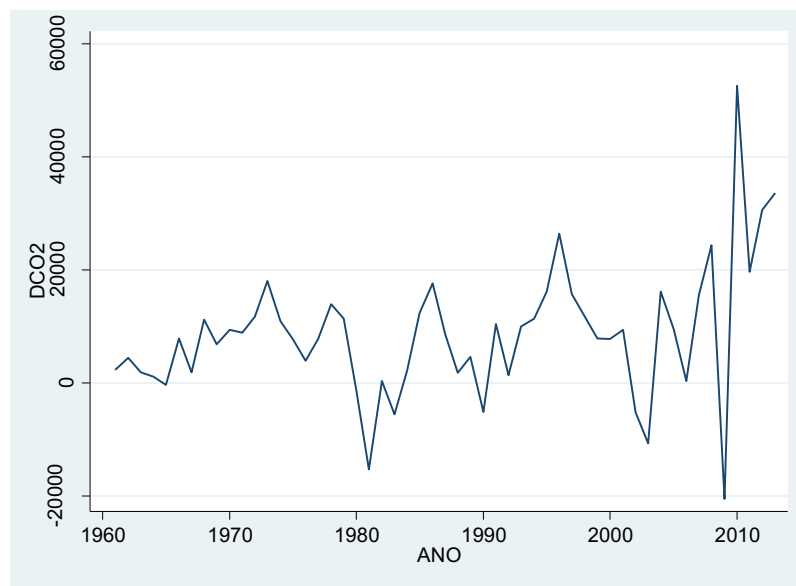
Para a série em nível, o teste KPSS indica a presença de raiz unitária e, portanto, não estacionariedade. O valor calculado da estatística LM (0,167) é maior que o valor crítico a 5,00% de nível de significância (0,146). Logo, não se aceita a hipótese nula indicativa de estacionariedade, uma vez que a série apresenta raiz unitária.

O teste ADF indica que a série em nível apresenta raiz unitária e, portanto, é não estacionária. O valor calculado da estatística tau (0,243) é maior que o valor crítico (-3,497) a 5,00% de nível de significância. Logo, aceita-se a hipótese nula indicativa de presença de raiz unitária, sendo a série não estacionaria.

Em vista disso, é necessário diferenciar a série em estudo para deixá-la estacionária. Logo, a série torna-se integrada de ordem  $d$  “I(d)”, em que  $d$  que indica o número de diferenças realizadas na série original. Com esse procedimento, a série em estudo perde uma observação a cada diferença realizada.

Conforme a Figura 2, verifica-se que a série em primeira diferença não apresenta a componente de tendência e, traçando-se uma linha horizontal imaginária, observa-se que seus valores oscilam acima e abaixo de um valor médio. A inspeção visual da série em primeira diferença sugere que ela é estacionária e que, portanto, não há presença de alguma raiz nos operadores de retardo dentro do círculo unitário.

Figura 2 – Série temporal das emissões de CO<sub>2</sub> (kt) em primeira diferença



Fonte: Elaborado com base nos dados do Banco Mundial (2017).

Procedendo-se com os testes de raiz unitária para a série em primeira diferença, verifica-se que, pelo KPSS, a série é estacionária a 5,00% de nível de significância (LM calculado = 0,357; LM crítico = 0,146). Com o teste ADF chega-se a mesma conclusão a 5,00% de nível de significância (tau calculado = -5,912; tau crítico = -2,928). Logo, pode-se inferir com segurança que, em primeira diferença, a série temporal das emissões de CO<sub>2</sub> (kt) não apresenta raiz unitária e é estacionária sendo integrada de ordem I(1).

Pode-se, agora, iniciar o processo de seleção do melhor modelo para a série. São testados diversos modelos para ver o que melhor se adequa a série em estudo. Como critérios de comparação, utiliza-se os critérios de informação *Akaike Information Criterion* (AIC) e



*Bayesian Information Criterion* (BIC), buscando-se o menor valor possível para cada uma dessas estatísticas. Também se considera o p-valor dos coeficientes, em que se adota como nível de significância 5,00%.

O Quadro 1 apresenta os modelos testados, sendo negritoado aquele que se julga melhor. Ressalta-se que para os modelos AR, MA e ARMA, utiliza-se a série em primeira diferença. Para os modelos ARIMA, faz-se uso da série original. Modelar uma ARMA (1,1) com a série em primeira diferença é o mesmo que modelar um ARIMA (1,1,1) com a série em nível.

Quadro 1 – Critérios de comparação entre os modelos estimados

Modelo	p-valor dos coeficientes	AIC	BIC
AR (1)	$\phi_1 = 0,275$	1.148,717	1.154,628
MA (1)	$\theta_1 = 0,445$	1.149,003	1.154,914
ARMA (1,1)	$\phi_1 = 0,165$ $\theta_1 = 0,344$	1.148,585	1.156,466
AR (2)	$\phi_1 = 0,287$ $\phi_2 = 0,075$	1.147,033	1.154,914
MA (2)	$\theta_1 = 0,551$ $\theta_2 = 0,000$	1.145,847	1.153,728
ARMA (2,2)	$\phi_1 = 0,146$ $\phi_2 = 0,358$ $\theta_1 = 0,144$ $\theta_2 = 0,006$	1.147,312	1.159,134
<b>ARIMA (0,1,2)</b>	<b><math>\theta_1 = 0,551</math></b> <b><math>\theta_2 = 0,000</math></b>	<b>1.145,847</b>	<b>1.153,728</b>
ARIMA (0,1,3)	$\theta_1 = 0,382$ $\theta_2 = 0,010$ $\theta_3 = 0,085$	1.144,789	1.154,641

Fonte: Elaboração própria (2017).

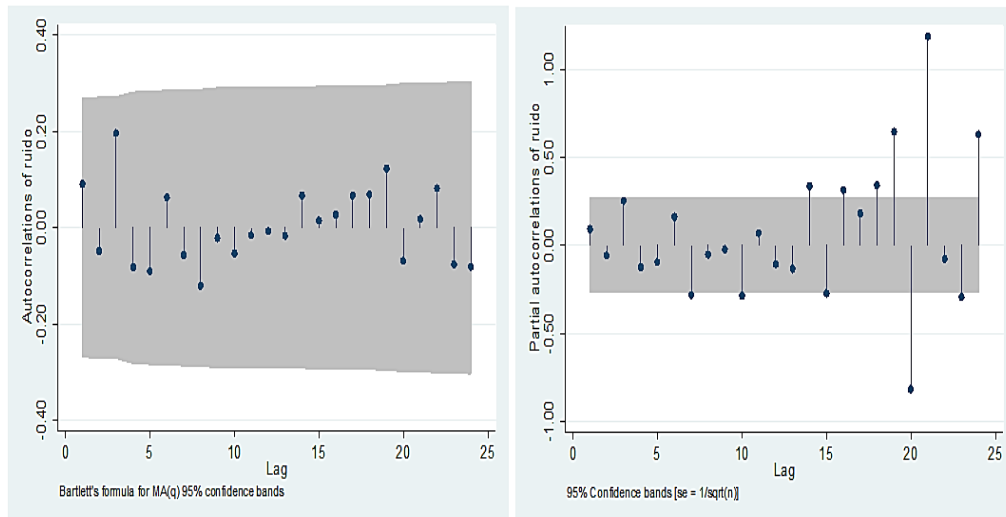
O modelo considerado melhor para essa série de dados é o ARIMA (0,1,1), uma vez que o coeficiente estimado  $\theta_2$  apresenta alta significância e o BIC é menor do que o do modelo ARIMA (0,1,3). Mesmo o AIC sendo maior do que o do modelo ARIMA (0,1,3), considera-se esse modelo o melhor visto que entre os dois critérios de informação, o BIC é consistente assintoticamente e tende a escolher um modelo mais parcimonioso do que o AIC, baseando-se no princípio da parcimônia. Além disso,  $\theta_3$  não é significativo para um nível de significância de 5,00%. Não se trata, pois, de um ARIMA (0,1,2), porque o parâmetro  $\theta_1$  é não significativo.

A equação representativa do modelo ARIMA (0,1,1) encontrado para a série de emissões de CO<sub>2</sub> (kt) do Brasil, é:  $D.CO_2_t = 8.748,563 + 0,429\varepsilon_{t-2}$ , com  $\sigma_{\varepsilon_t} = 1.1065,89$ , sendo  $\sigma_{\varepsilon_t}$  o desvio padrão do termo de ruído branco  $\varepsilon_t$  estimado. Esse modelo, conforme os critérios penalizadores AIC e BIC, é o que melhor se ajusta para a série no sentido de proporcionar uma melhor previsão. Pode-se, portanto, inferir que as emissões de CO<sub>2</sub> (kt) no Brasil dependem de  $\varepsilon_{t-2}$ . Depreende-se disso que a série em observação está imediatamente associada aos erros do modelo, como em qualquer outro processo de média móvel, tendo maior peso  $\varepsilon_{t-2}$ .

Outro aspecto importante na análise consiste em verificar se os resíduos do modelo seguem um formato de ruído branco. Isso implica observar se os resíduos do modelo estimado

apresentam determinadas características, como: não ter memória, serem homocedásticos e serem normalmente distribuídos.

Figura 3 – Diagnóstico dos resíduos pela FAC (função de autocorrelação) e pela FACP (função de autocorrelação parcial)



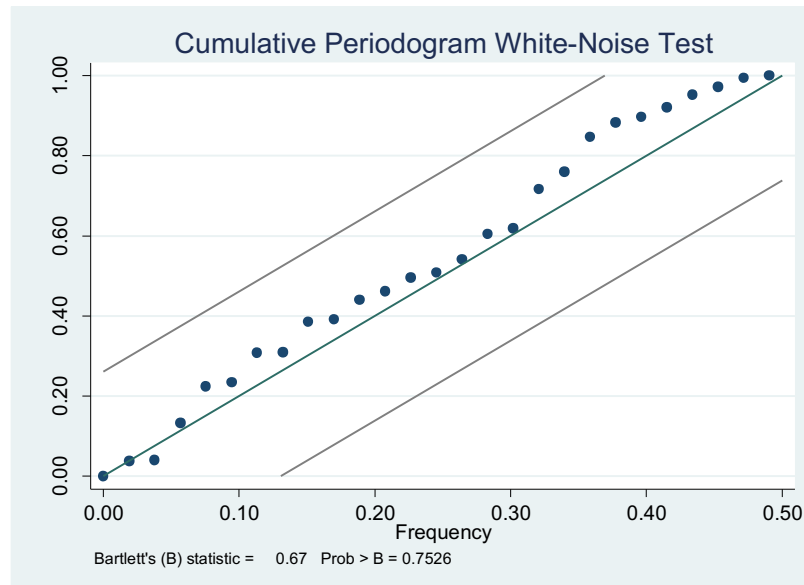
Fonte: Elaboração própria (2017).

Mesmo sendo verificados alguns pontos significantes na FACP, pode-se considerar que os resíduos são livres de memória (Figura 3). Isso é confirmado pelo Teste de Ljung-Box, em os altos p-valores para a estatística Q disposta no correlograma, indicam que os resíduos não estão serialmente correlacionados.

Pelo teste Jarque Bera, em que se testa a normalidade dos resíduos sob a hipótese nula, tem-se que os resíduos seguem uma distribuição normal para um nível de significância de 5,00% (p-valor = 0,1200). Com 24 lags atribuídas para o teste ARCH LM no intuito de verificar se existe problemas de heterocedasticidade, evidencia-se que o modelo é homocedástico a 5,00% de nível de significância (p-valor = 0,5193), isto é, livre do efeito ARCH (heterocedasticidade condicional autorregressiva).



Figura 4 – Verificação do comportamento de ruído branco nos resíduos do modelo estimado



Fonte: Elaboração própria (2017).

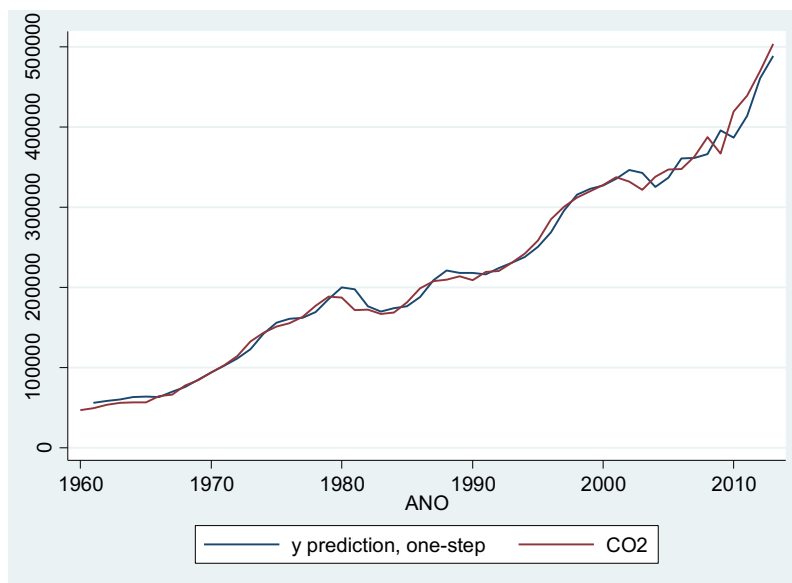
Ainda com relação à análise dos resíduos, fez-se o Teste Bartlett, que testa sob a hipótese nula se os dados provêm de um processo de ruído branco de variáveis aleatórias não correlacionadas, com média constante e variância constante. Nessas condições verifica-se que os resíduos do modelo estimado satisfazem as condições de ruído branco ( $p$ -valor = 0,7526). O mesmo pode ser confirmado pelo gráfico, em que se observa que os valores dos resíduos nunca aparecem fora das faixas de segurança (Figura 4).

#### 4.2 PREVISÃO *IN-SAMPLE* DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (kt) NO BRASIL

Identificado o melhor modelo para a série temporal das emissões de CO<sub>2</sub> (kt) no Brasil e realizado o diagnóstico dos resíduos, pode-se agora realizar previsões dessas emissões. Tal procedimento pode ser realizado sob duas abordagens. Uma delas é realizar a previsão de valores dentro da amostra (*in-sample*), a outra consiste em realizar a previsão de valores fora da amostra (*out-of-sample*). Nesse estudo, a previsão realizada é a *in-sample*.

Na previsão dentro da amostra, os valores são previstos em relação à variável em nível utilizada no modelo ARIMA e são calculados para o período da amostra. A previsão *in-sample* para as emissões de CO<sub>2</sub> (kt) no Brasil sugere que os valores previstos acompanham e aproximam-se consideravelmente dos valores reais, conforme pode se observar na Figura 4.

Figura 5 – Previsão *in-sample* para as emissões de CO<sub>2</sub> (kt) no Brasil.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Conforme evidencia a Figura 5, os valores previstos estão substancialmente alinhados aos valores da série original. Isto é, traçando-se um gráfico sequencial da série original e da série de valores preditos, verifica-se que o comportamento dos valores previstos é consideravelmente parecido com o comportamento dos valores reais da série. Isso indica que a previsão realizada apresenta uma boa qualidade.

Realizada a previsão para o modelo estimado, algumas medidas de desempenho são importantes para avaliar tal previsão. O quadro 2 apresenta as principais delas, o erro médio (EM), o erro quadrático médio (MSE), o erro absoluto médio (MAE), o erro absoluto percentual médio (MAPE) e o coeficiente de desigualdade de Theil (U).

Quadro 2 – Estatísticas do desempenho da previsão

<b>EM</b>	21,17
<b>MSE</b>	11.075,97
<b>MAE</b>	7.923,53
<b>MAPE</b>	0,000674
<b>U</b>	0,022110632

Fonte: Elaboração própria (2017).

Tem-se como referência o coeficiente de desigualdade de Theil, para o qual há valores padronizados para avaliar a previsão realizada. Esse coeficiente, quanto mais próximo de zero, indica maior precisão da previsão. Portanto, sendo  $U = 0,02$ , constata-se que a precisão da previsão empreendida é quase perfeita, considerando-se os critérios para análise de U.

Considerando-se o crescimento observado nas emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, de 1960 até 2013, ressalta-se que conhecer o comportamento da série histórica de emissões permite, além de dimensionar a escala desse aumento, traçar medidas estratégicas para mitigar esse quadro adverso e os problemas ambientais que isso acarreta. No entanto, as medidas para reduzir as emissões devem ser implementadas e pensadas cuidadosamente, uma vez que grande parte

dessas emissões é gerada pelo setor produtivo, vital para o processo de crescimento e desenvolvimento econômico.

A estratégia encontrada para fazer frente ao aumento de emissões no Brasil e reduzir os impactos negativos gerados, ampara-se na inovação. Nesse contexto, o surgimento do Fundo Nacional de Mudanças do Clima, que consiste em um instrumento chave da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) instituída em 2009, busca financiar projetos, estudos e empreendimentos que visem à mitigação (ou seja, à redução dos impactos) da mudança do clima e à adaptação a seus efeitos (CEPAL, 2016). Esse Fundo, de natureza contábil, está vinculado ao Ministério do Meio Ambiente e objetiva viabilizar ações inovadoras e transformadoras de organizações públicas e privadas em adaptação e mitigação como instrumento de financiamento da PNMC (CEPAL, 2016).

Portanto, o conhecimento do mecanismo gerador da série de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil, sendo ela explicada por seus valores passados, é importante para que se possa, além de dimensionar a escalar em que essas emissões crescem, realizar incursões específicas que possibilitem sua redução sem, contudo, comprometer os níveis de produtividade. Para tanto, acredita-se que as políticas ambientais de mitigação devem ser implementadas em um contexto de desenvolvimento e difusão tecnológica, visando fomentar a inovação não apenas em produtos, mas também em processos produtivos com o objetivo de coadunar produtividade e sustentabilidade. Isso se dá em vista de que parte considerável das emissões de GEE são oriundas das atividades produtivas realizadas no sistema econômico.

Com uma matriz energética fundamentada, principalmente, em fontes hidráulicas e biocombustíveis, há condições propícias para que o Brasil possa manter uma economia com baixa emissão carbono (OCDE, 2016). Ademais, baixo carbono é a expressão de ordem para a economia do século XXI e significa inovar em processos produtivos e soluções tecnológicas capazes de resultar em menor impacto sobre o clima do planeta, com destaque para a busca de eficiência e alternativas energéticas, redução de emissões e gestão em sustentabilidade (CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES), 2017). A inovação, portanto, tem um papel fundamental no processo de redução das emissões de CO<sub>2</sub> e demais GEE no Brasil, configurando como um elemento essencial para a mitigação dos impactos ambientais negativos no planeta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo teve como objetivo analisar as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil de 1960 até 2013 por meio da metodologia de Box & Jenkins e realizar uma previsão *in-sample* para essa série histórica. Modelando a série, encontrou-se como melhor modelo explicativo um ARIMA (0,1,1), sendo a série temporal I(1), uma vez que realizou-se uma diferença para torna-la estacionária. É importante salientar que no modelo estimado apenas o segundo parâmetro de médias móveis apresentou significância estatística. Na análise dos resíduos do modelo estimado, verificou-se que os mesmos seguem um formato de ruído branco, sem memória, homocedásticos e normalmente distribuídos.

A principal contribuição desse estudo consiste em apresentar o comportamento da série temporal de emissões de CO<sub>2</sub> (kt) ao longo dos anos, de 1960 até 2013 no Brasil. Isso permite dimensionar a escalar em que as emissões de CO<sub>2</sub> crescem visando incursões específicas que possibilitem a sua mitigação. Sugere-se que as medidas estratégicas para reduzir as emissões sejam acompanhadas pela adoção de tecnologias limpas, visando uma produção mais limpa sem comprometer a produtividade.

Dentre as limitações da pesquisa, pode-se citar a série temporal com poucas observações disponível para análise. Ressalta-se que a aplicação da metodologia de Box & Jenkins requer que o tamanho mínimo da série em estudo tenha 50 observações. A série utilizada atende a esse

requisito, no entanto, resultados mais interessantes do ponto de vista estatístico poderiam ser encontrados caso o número de observações fosse maior, utilizando-se, por exemplo, dados mensais sobre as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil. Contudo, muitas vezes o pesquisador encontra-se condicionado a trabalhar com os dados disponíveis.

Em vista da relevância do assunto, sugere-se como temas futuros para pesquisas, estudar a relação existente entre as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil e o produto da economia. Isso possibilitaria apreender sobre como essas variáveis se relacionam ao longo do tempo e qual a influência de uma sobre a outra. Verificar como as emissões se comportaram em períodos de crescimento econômico ou de recessão econômica pode ser útil, por exemplo, para o delineamento de políticas ambientais.

## REFERÊNCIAS

ABREU, M. C. S. de; ALBUQUERQUE, A. M.; FREITAS, A. R. P. de. Posicionamento estratégico em resposta às restrições regulatórias de emissões de gases do efeito estufa.

**R.Adm.**, São Paulo, v.49, n.3, p.578-590, jul./ago./set. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN). **Energia na América do Sul**. 2016. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/483/483.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

BARBIERI, J. C.; VASCONCELOS, I. F. G. de; ANDREASSI, T.; VASCONCELOS, F. C. de. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. **RAE**, São Paulo, v. 50, n. 2, p. 146-154, abr./jun. 2010.

BENGOCHEA-MORANCHO, A.; HIGÓN-TAMARIT, F.; MARTÍNEZ-ZARZOSO, I. Economic growth and CO<sub>2</sub> emissions in the European Union. **Environmental and Resource Economics**, v.19, n.2, p.165-172. 2001.

BUENO, R. L. S. **Econometria de Séries Temporais**. 2 Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE (GVCES). **Economia de Baixo Carbono**. Disponível em: <<http://eventos.gvces.com.br/index.php?r=site/conteudo&id=157>>. Acesso em 14 jun. 2017.

COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE (CEPAL).

**Avaliação do Fundo Clima**. Disponível em:

<[http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/170126\\_livro\\_s1601337\\_pt.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/170126_livro_s1601337_pt.pdf)>. Acesso em 14 jun. 2017.

CUNHA, C. A; SCALCO, P. R. Crescimento econômico brasileiro e emissão de CO<sub>2</sub>.

**REDES**, Santa Cruz do Sul, v. 18, n. 2, p. 214 - 230, mai./ago. 2013.

GODOY, S. G. M. de. Projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa: desempenho e custos de transação. **R.Adm.**, São Paulo, v.48, n.2, p.310-326, abr./maio/jun. 2013.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. G. Uso de combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, Belo Horizonte, 16 (1), p.49-99, jan./abr. 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2017.

LEAL, R. A.; ELY, R. A.; UHR, J. G. Z.; UHR, D. A. P. Ciclos econômicos e emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil: uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas. **RBE**, Rio de Janeiro v. 69 n. 1 / p. 53–73 jan./mar. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **OCDE - Avaliações de Desempenho Ambiental: Brasil 2015**. Disponível em: <[http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40895/1/S1700018\\_pt.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40895/1/S1700018_pt.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2017.

THE WORLD BANK (BANCO MUNDIAL). **CO<sub>2</sub> emissions (kt)**. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?locations=BR>>. Acesso em: 05 abr. 2017.