



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA RURAL**

MARIA BEATRIZ CUNHA PINHEIRO

**PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS
SELECIONADAS DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

**FORTALEZA, CE
2020**

MARIA BEATRIZ CUNHA PINHEIRO

PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS
SELECIONADAS DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural do Departamento de Economia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Economia Rural. Área de concentração: Economia de Recursos Naturais e Política Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos

FORTALEZA, CE
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C979p Cunha Pinheiro, Maria Beatriz.
Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira / Maria Beatriz Cunha Pinheiro. – 2020.
78 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Jose de Jesus Sousa Lemos.

1. Composição da Matriz Energética Brasileira. 2. Fontes alternativas de energia. 3. Preços internacionais do petróleo. 4. Previsões de produção de energia. I. Título.

CDD 338.1

MARIA BEATRIZ CUNHA PINHEIRO

PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS
SELECIONADAS DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural do Departamento de Economia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Economia Rural. Área de concentração: Economia de Recursos Naturais e Política Ambiental.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos (UFC)
Orientador

Prof. Dr. Vitor Hugo Miro Couto Silva (UFC)
Membro Interno

Prof. Dr. Kilmer Coelho Campos (UFC)
Membro Interno

Prof. Dr. Nicolino Trompieri Neto (IPECE)
Membro Externo

A Deus, o autor e consumidor da minha fé.
Aos meus pais, Wellington e Cecília a
quem devo tudo o que tenho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cecília e Wellington, cujas dedicação e amor, serviram para me ensinar e mostrar o valor da educação, ao mesmo tempo em que cooperaram na formação do meu caráter, além de terem me preparado para os desafios da vida.

Às minhas irmãs do coração, Priscilla, Isabelle e Thaynara que me amam como se tivéssemos os mesmos laços sanguíneos, juntamente nessa família, Dona Lanna, a mãe guerreira de todas nós, Anderson Nobre e Jonhy que têm cuidado com amor e carinho de todas as mulheres dessa família.

Aos meus familiares que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos, que sempre foram presentes em qualquer momento da minha vida e torceram para que este sonho se concretizasse. Em particular menciono minha mais nova amizade adquirida durante o mestrado, Natália Gurjão; o que inicialmente era apenas uma parceria de trabalho e orientações, tornou-se uma amiga que nunca será esquecida, uma amizade que romperá o plano físico da Universidade.

Ao meu querido professor orientador, Dr. José de Jesus Sousa Lemos, o maior incentivador da minha carreira acadêmica, em quem me inspiro profissionalmente, por desempenhar sua profissão com excelência, além do ser humano cheio de bondade e solicitude.

À banca examinadora que prontamente aceitou o convite de avaliar o trabalho e colaborar com valiosas contribuições. Em especial, Nádia Rodrigues, Doutoranda PPGER/UFC, que contribuiu com excelentes sugestões na direta construção deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Economia Rural da Universidade Federal do Ceará (PPGER/UFC), pelo ensino, dedicação, incentivo à pesquisa e contribuição à comunidade científica.

Aos funcionários do Departamento de Economia Agrícola, em especial à secretária do Programa, Carlene, que sempre se mostrou disponível em sanar dúvidas e ajudar em qualquer pendência administrativa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos concedida durante todo o período de estudo e pesquisa.

E, por fim, aos meus colegas e companheiros de mestrado, que contribuíram para tornar a jornada mais leve e por toda ajuda disponibilizada nestes dois anos de curso.

“E, quanto fizerdes por palavras ou por obras, fazei tudo em nome do Senhor Jesus, dando por Ele graças a Deus Pai.”(Apóstolo Paulo)

RESUMO

Em função da expansão do consumo, os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte geradora de energia em todo o mundo. Por serem recursos limitados, os investimentos para o desenvolvimento tecnológico direcionados ao setor de energia são cada vez mais necessários, pois acarretam o barateamento do consumo de energia e na consequente diversificação da matriz energética nacional. A produção da principal fonte energética mundial é fossilizada, a saber, o petróleo, e ainda possui produção oligopolizada. Isso posto, o trabalho tem como objetivo geral avaliar a composição relativa da Matriz Energética Brasileira, no que concerne à presença de fontes renováveis e não renováveis relativas ao período 1970-2018, e, então, posteriormente elaborar modelos de previsão da produção interna de energia relativos aos anos de 2019-2030, no tocante aquele lapso temporal. Com efeito, será considerada a instabilidade dos preços internacionais do petróleo. Especificamente, o trabalho averiguou a evolução relativa das fontes renováveis e não renováveis que compõem a Matriz Energética Brasileira entre os anos de 1970 e 2018, estimou modelos adequados de modo a prover a previsão para cada fonte energética e também avaliou os possíveis impactos dos preços do barril de petróleo sobre a produção de energia restrita ao período de 1970 a 2018 e para o período de 2019 a 2030. Os dados da pesquisa são originariamente extraídos da *International Energy Agency* (IEA) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), portanto são dados de natureza secundária. Na formação das previsões optou-se pela técnica Box-Jenkins em função de suas consistentes estimativas geradas pelo arcabouço matemático e estatístico na construção de previsões com base em séries temporais. Os resultados obtidos revelaram que a composição relativa da Matriz Energética Brasileira passou por mudanças significativas no decorrer do período estudado; o uso do petróleo superou o uso de lenha na geração de energia no Brasil, tornando-se a principal fonte geradora de energia. Por sua vez, as taxas geométricas de crescimento comprovaram a análise gráfica com o petróleo possuindo a maior taxa, de 2,8% e a lenha com taxa negativa de -4,6%. No Brasil, A fonte renovável que se mostrou mais promissora na geração de energia foi a cana-de-açúcar com uma TGC de 1,4% ao ano. A pesquisa mostrou, ainda, que, com exceção da lenha, todas as fontes energéticas são sensíveis em suas produções às alterações nos níveis de preços do barril de petróleo. Com efeito, quando os preços se encontrarem em graus intermediários e baixos, a produção interna tenderá a recuar. Por fim, o trabalho permitiu concluir que o Brasil ainda é dependente de fontes

fossilizadas para sua geração de energia, mesmo que possua potencial em fontes alternativas como a cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Composição da Matriz Energética Brasileira. Fontes alternativas de energia. Preços internacionais do petróleo. Previsões de produções de energia.

ABSTRACT

Due to the expansion of consumption, fossil fuels are still the main source of energy in the world. As they are limited resources, investments in technological development directed to the energy sector are increasingly necessary, as they result in lower energy consumption and the consequent diversification of the national energy matrix. As they are limited resources, investments in technological development directed to the energy sector are increasingly necessary, as they result in lower energy consumption and the consequent diversification of the national energy matrix. The production of the main world energy source is fossilized, namely oil, and still has oligopolized production. That said, the work has the general objective of evaluating the relative composition of the Brazilian Energy Matrix, with regard to the presence of renewable and non-renewable sources for the period 1970-2018, and then, later, to elaborate models for forecasting internal energy production for the years 2019-2030, regarding that time lapse. Indeed, the instability of international oil prices will be considered. Specifically, the work investigated the relative evolution of renewable and non-renewable sources that make up the Brazilian Energy Matrix between the years 1970 and 2018, estimated suitable models in order to provide the forecast for each energy source and also evaluated the possible impacts of the prices of the barrel of oil on energy production restricted to the period from 1970 to 2018 and for the period from 2019 to 2030. The research data are originally extracted from the International Energy Agency (IEA) and Empresa de Pesquisa Energética (EPE), so they are secondary data. In the formation of forecasts, the Box-Jenkins technique was chosen due to its consistent estimates generated by the mathematical and statistical framework in the construction of forecasts based on time series. The results obtained revealed that the relative composition of the Brazilian Energy Matrix went through significant changes during the studied period; the use of oil surpassed the use of firewood in the generation of energy in Brazil, becoming the main source of energy. In turn, the geometric growth rates proved the graphic analysis with oil having the highest rate, 2.8% and firewood with a negative rate of -4.6%. In Brazil, the renewable source that showed the most promise in the generation of energy was sugarcane with a TGC of 1.4% per year. The research also showed that, with the exception of firewood, all energy sources are sensitive in their production to changes in the price levels of a barrel of oil. Indeed, when prices are at intermediate and low levels, domestic production will tend to decline. Finally, the work allowed us to conclude that Brazil is still dependent on fossilized

sources for its energy generation, even if it has potential in alternative sources such as sugar cane.

Keywords: Composition of the Brazilian Energy matrix. Alternative energy sources. International oil prices. Energy Production Forecasts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da metodologia de Box e Jenkins	37
Figura 2 - Correlogramas residuais do modelo ARIMA (1,1,0) da fonte petróleo	55
Figura 3 - Correlograma residual do modelo ARIMA (1,1,1) da fonte gás natural	56
Figura 4 - Correlograma residual do modelo ARIMA (1,1,1) da fonte hidroelétrica	56
Figura 5 - Correlograma residual do modelo ARIMA (2,2,0) da fonte lenha	57
Figura 6 - Correlograma residual do modelo ARIMA (1,1,1) da fonte cana	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Produção de energia não renovável no Brasil entre 1970 e 2018	44
Gráfico 2- Produção de energia renovável no Brasil entre 1970 e 2018	45
Gráfico 3- Preços do barril de petróleo entre 1970 e 2018	46
Gráfico 4- Participação relativa da produção de energia não renovável no Brasil entre 1970 e 2018	47
Gráfico 5- Participação relativa da produção de energia renovável no Brasil entre 1970 e 2018	47
Gráfico 6- Comportamento das séries de produção de energias não renováveis (1970-2018)	49
Gráfico 7- Comportamento das séries de produção de energias não renováveis (1970-2018)	50
Gráfico 8- Comportamento da série de preços do barril de petróleo (1970-2018)	50
Gráfico 9- Previsão da produção de energia via lenha (2019-2030)	60
Gráfico 10- Previsão da produção de energia via petróleo no cenário otimista (2019-2030)	61
Gráfico 11- Previsão da produção de energia via petróleo no cenário intermediário (2019-2030)	62
Gráfico 12- Previsão da produção de energia via petróleo no cenário pessimista (2019-2030)	62
Gráfico 13- Previsão da produção de energia via gás natural no cenário otimista (2019-2030)	63
Gráfico 14- Previsão da produção de energia via gás natural no cenário intermediário (2019-2030)	64
Gráfico 15- Previsão da produção de energia via gás natural no cenário pessimista (2019-2030)	64
Gráfico 16- Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário otimista (2019-2030)	65
Gráfico 17- Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário intermediário (2019-2030)	66
Gráfico 18- Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário pessimista (2019-2030)	66

Gráfico 19- Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário otimista (2019-2030)	67
Gráfico 20- Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário intermediário (2019-2030)	68
Gráfico 21- Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário pessimista (2019-2030)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias históricas, Coeficientes de Variação (CV) e Taxas Geométricas de Crescimento (TGC) das participações relativas das fontes energéticas selecionada entre 1970 e 2018	48
Tabela 2 - Testes ADF e KPSS de raiz unitária	52
Tabela 3- Principais modelos ajustado para as fontes de energia selecionadas	53
Tabela 4 - Modelos ajustados para previsão das fontes de energias selecionadas	53
Tabela 5- Dependência linear dos valores previstos da produção em relação aos preços do barril de petróleo	58
Tabela 6 – Valores previstos para produção de lenha como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030	59
Tabela 7 – Valores previstos para produção de petróleo como fonte não renovável de energia para o período 2019- 2030	61
Tabela 8 – Valores previstos para produção de gás natural como fonte não renovável de energia para o período 2019- 2030	63
Tabela 9 – Valores previstos para produção de hidroelétrica como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030	65
Tabela 10 –Valores previstos para produção de cana-de-açúcar como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030	67
Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson das séries previstas das fontes energéticas	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis utilizadas	31
Quadro 2 - Cenários de previsão de produção de energia	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF	Dickey e Fuller Aumentado
AIC	Critério de Akaike
ARIMA	Auto Regressive Integrated Moving Average
ARMA	Autorregressivos e Médias Móveis
AR	Autorregressivo
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CPI-U	Consumer Price Index
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EQM	Erro Quadrático Médio
FAC	Funções de Autocorrelação
FACP	Funções de Autocorrelação Parcial
G-20	Vinte maiores economia do mundo
IEA	International Energy Agency
KPSS	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin
MA	Médias Móveis
MAPE	Média dos Valores Absolutos dos Erros Percentuais
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OPEP	Organização dos Países Exportadores do Petróleo
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
SBIC	Critérios Bayesianos de Schwartz
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
TGC	Taxas Geométricas de Crescimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos	21
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i>	<i>21</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i>	<i>22</i>
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 Contexto histórico da Matriz Energética Brasileira	23
2.2 Composição da Matriz Energética Brasileira	25
<i>2.2.1 Fontes brasileiras de energia não renovável</i>	<i>25</i>
<i>2.2.2 Fontes brasileiras de energias renováveis</i>	<i>26</i>
2.3 Modelos de previsões da produção de fontes energéticas	29
3 METODOLOGIA	31
3.1 Participação relativa e crescimento médio das fontes energéticas	31
3.2 Modelo de previsão das variáveis endógenas	32
3.3 Modelo de Box e Jenkins	33
<i>3.3.1 Modelos de séries temporais autoregressivo (AR)</i>	<i>33</i>
<i>3.3.2 Modelos de séries temporais médias móveis (MA)</i>	<i>34</i>
<i>3.3.3 Modelos de séries temporais autorregressivos e médias móveis (ARMA)</i>	<i>35</i>
<i>3.3.4 Técnica para testar a estacionariedade de uma série temporal</i>	<i>35</i>
<i>3.3.5 Testes de raiz unitária aplicados nas séries</i>	<i>37</i>
3.4 Teste Ljung-Box para verificar se os ruídos são aleatórios	39
3.5 Testes e medidas de acurácia das previsões	39
<i>3.5.1 Raiz do erro quadrático médio</i>	<i>40</i>
<i>3.5.2 Correlação de Pearson</i>	<i>40</i>
<i>3.5.3 Medida de erro</i>	<i>40</i>
3.6 Previsões 2019-2030 das fontes energéticas não renováveis e renováveis	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Comportamento das séries temporais	44
4.2 Evolução temporal da composição relativa da Matriz Energética Brasileira	46
4.3 Estimação e identificação de modelos ARIMA	51
<i>4.3.1 Testes de raiz unitária</i>	<i>51</i>
<i>4.3.2 Estimação do modelos</i>	<i>52</i>

<i>4.3.2.1 Modelos de previsões para energias não renováveis</i>	54
<i>4.3.2.2 Modelos de previsões para energias renováveis</i>	54
4.3.3 Verificação da capacidade de predição dos modelos estimados	55
4.4 Previsões	58
4.4.1 Previsões da produção de energia	59
<i>4.4.1.1 Projeções para a produção de lenha 2019-2030</i>	59
<i>4.4.1.2 Projeções para a produção de petróleo (2019-2030)</i>	60
<i>4.4.1.3 Projeções para a produção de gás natural (2019-2030)</i>	63
<i>4.4.1.4 Projeções para a produção de hidroelétrica (2019-2030)</i>	65
<i>4.4.1.5 Projeções para a produção de cana-de-açúcar (2019-2030)</i>	67
4.4.2 Robustez dos modelos de previsão	68
5 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Há uma concordância na literatura sobre a importância do suprimento energético nas relações econômicas por ser este insumo para produção, fator de desenvolvimento das cidades, e até condicionante do Produto Interno Bruto (PIB) de uma nação, mesmo que na formação do PIB o fornecimento de energia tenha pequeno percentual de participação. Contudo sem o fornecimento e distribuição de energia não há possibilidades de realização das atividades econômicas (KENNEDY; BACHMANN, 2016).

Qualquer que seja a economia moderna, incluindo a brasileira, o suprimento energético se constitui num dos principais ou mais relevante direcionador do crescimento econômico. A falta de uma infraestrutura adequada que comprometa, por exemplo, o fornecimento de energia, resulta em um aumento das importações de petróleo e dos seus derivados, afetando assim a balança comercial brasileira (MATTOS *et al.*, 2008).

O estado de alerta no Brasil se iniciou no começo da década de 1970 no contexto das duas crises do petróleo (1973 e 1979). Na ocasião, houve uma diminuição na produção e oferta de petróleo, por parte dos principais países produtores que se cartelizaram na Organização dos Países Exportadores do Petróleo (OPEP). Conseqüentemente, verificou-se um aumento generalizado nos preços desta commodity. Diante daquelas circunstâncias, o Brasil, que na época detinha apenas uma pequena fração de autonomia na produção de petróleo, buscou pela primeira vez diversificar sua matriz energética ao investir em pesquisa e desenvolvimento (P&D) para a criação de energias alternativas. Com efeito, em 1975, inaugurou-se o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que tinha como principal objetivo substituir o uso de combustíveis fósseis por combustíveis produzidos a partir da biomassa, sobretudo a cana-de-açúcar em veículos automotores (MORAES; BACCHI, 2014).

Entre os anos de 1970 e 1990, a lenha, que até então era uma das principais fontes energéticas, experimentou redução em seu consumo de 2,9% ao ano. Após as crises dos anos de 1970, o Brasil passou a investir em fontes hidráulicas e de cana-de-açúcar, cujas taxas de crescimento atingiram 6,6% ao ano no período de 1970 a 2005 (BRONZATTI; NETO, 2008).

Em 2001, o país encarou mais um desafio no setor energético. Desta vez a crise seria mais especificamente no setor elétrico, em que forçou por diversas vezes o governo a criar programas de racionamento. Pires *et al* (2002) destacam que a crise no setor elétrico foi uma junção de fatores, como o modelo estatal vigente na época, a crise financeira enfrentada no mesmo período e falta de um modelo regulatório adequado ao setor. Desde então, diversas

ações foram criadas visando garantir um abastecimento normal de energia, como as criações de planos decenais para ampliação do fornecimento e que preveem o consumo interno.

A expansão da demanda por recursos energéticos é um cenário observado em todo o mundo. Os combustíveis fósseis têm a primazia no consumo, e, portanto, por ser um recurso finito, tornou-se uma preocupação nos quesitos de eficiência e conservação de energia, isto é, há uma necessidade de viabilização de outras fontes energéticas (BEZERRA, 2016).

De acordo com a Resenha Energética Brasileira (BRASIL, 2018a), houve um esforço para reduzir a participação do petróleo e seus derivados nas matrizes energéticas de países desenvolvidos. Nos países que compõem o bloco da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) a redução foi de 16,7 pontos percentuais do petróleo e derivados em suas matrizes energéticas entre os anos de 1973 e 2017. No Brasil, a retração foi de 9,4 pontos percentuais para o mesmo período. Ou seja, isto evidencia que o país segue a tendência mundial. Em ambos os cenários, a causa da redução do uso de combustíveis fósseis está atrelada, principalmente, aos choques nos preços do petróleo ocorridos na década de 1970. Entretanto, a partir de 2016 com a redução nos preços do barril de petróleo, tem-se observado uma reversão nesta tendência.

Outro destaque dado pela Resenha Energética Brasileira (BRASIL, 2018a), dizem respeito aos déficits líquidos na demanda total por derivados de petróleo de 339 mil bep/dia e 160 mil bep/dia ocorridos em 2013 e 2014, respectivamente. Em decorrência dessa crise energética que perdura até o presente momento, o Brasil possui uma matriz energética que se utiliza essencialmente de recursos hídricos e fósseis, uma vez que a geração de energia elétrica é quase que totalmente pela força das águas.

Guerra *et al.* (2014), Silveira (2017), Mujiyanto e Tiess (2013) concordam que para qualquer país são necessários investimentos em políticas de conscientização do consumo e de desenvolvimento tecnológico que visem a eficiência e o barateamento da energia, além de priorizar a diversificação da sua matriz energética, não somente devido às preocupações ambientais, mas também pela manutenção das atividades econômicas.

A partir desta explanação, e, visto que a produção do petróleo é oligopolizada, há uma influência direta dos grupos que dominam o mercado na definição dos preços, ocasionando instabilidade no fornecimento e, conseqüentemente, comprometendo o planejamento do suprimento energético para um futuro próximo. Por essa sinergia de fatores é que surge o seguinte questionamento: Mudanças nos preços do barril de petróleo influenciarão a composição da matriz energética do Brasil ao ponto de mudar o perfil da matriz que produzirá energia a fim de abastecer a demanda interna como meta de longo prazo?

A indagação anterior está fundamentada nos interesses de suprimento de uma crescente demanda interna, além de buscar respostas para o sustento de um futuro crescimento econômico que depende do abastecimento energético. Desta forma, faz-se necessário testar a seguinte hipótese: Oscilações imprevisíveis nos preços do barril irão comprometer a produção interna das principais fontes de energia.

Guerra *et al.* (2014) enfatizam que um crescente número de pesquisadores concordam com a insolvência da utilização de energia fossilizada e o fim do barateamento do petróleo, e por conseguinte há a necessidade de substituí-lo por energias renováveis, mesmo que os esforços políticos ainda sejam insignificantes diante das responsabilidades sociais e ecológicas. Ademais, a crescente escassez dos recursos e aumentos nos preços do petróleo tendem a forçar essas mudanças.

O estudo de produção de energia advinda de fontes diferentes pode ser de grande relevância para subsidiar o planejamento energético, ajudar na elaboração de políticas que garantam segurança. Por meio destes estudos se estima os investimentos necessários em infraestrutura e em pesquisa e desenvolvimento (BRASIL, 2018b).

Há vários estudos desenvolvidos no tocante ao Brasil que visam, principalmente, analisar o consumo de energia, com destaque para a energia elétrica. Por exemplo, Silveira (2017) por meio de pesquisa bibliográfica verificou a insustentabilidade da Matriz Energética Brasileira por ter fontes não renováveis como maior provedora de energia. Neste mesmo sentido, Bondarik, Pilatti e Horst. (2018) concluíram que é necessário para o país fortalecer programas de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas, como a biomassa. Enquanto isso, na literatura internacional existe uma série de estudos que buscam prever, para determinadas regiões, o consumo e a oferta de energia por meio de estimações econométricas. Nesta perspectiva, este estudo poderá contribuir para fazer previsões de produções de fontes renováveis e não renováveis de energia para o Brasil.

1.1 Objetivos

A seguir, os objetivos específicos que foram investigados no transcorrer da pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a composição relativa da Matriz Energética Brasileira, bem como criar modelos de previsão de produção dos itens renováveis e não renováveis que a compõem tendo

como referência os anos de 1970 e 2018, levando em consideração a instabilidade dos preços internacionais do barril de petróleo que não são conduzidos pela lógica de mercado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estimar a evolução temporal da composição relativa de itens renováveis e não renováveis que compõem a matriz energética entre os anos de 1970 e 2018;
- Estimar modelos de previsão de fontes selecionadas de energias não renováveis e renováveis para o Brasil com base no período de 1970 a 2018;
- Avaliar os prováveis impactos dos preços do petróleo sobre os modelos de previsão de produção de energias não renováveis e renováveis a serem estimados na pesquisa para o Brasil entre os anos de 1970 e 2018;
- Estabelecer previsões de produção interna de fontes renováveis e não renováveis de energia com base nos modelos estimados para o período de 2019 a 2030.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O fornecimento de energia é condição fundamental para um crescimento econômico sustentável, por ser um insumo primordial à indústria, o comércio, os serviços, dentre outros setores, além de proporcionar bem-estar social (PAIXÃO; MIRANDA, 2018).

Dranka e Ferreira (2018) acrescentam que o consumo de energia em geral é uma característica trivial a nações em desenvolvimento, onde o Brasil está inserido neste contexto. Desta forma, a temática energética é frequentemente usado na literatura sob diferentes formas.

2.1 Contexto histórico da Matriz Energética Brasileira

O Brasil, peculiarmente, é composto por diferentes matérias-primas necessárias à geração de energia. Ainda que em quantidades divergentes, isto não foi empecilho para o suprimento da demanda interna, tampouco para a dependência externa do petróleo.

Diante de um cenário biológico heterogêneo no Brasil, a Matriz Energética Brasileira foi inicialmente explorada a partir da necessidade de locomoção. Logo nos primórdios da industrialização brasileira, utilizou-se inicialmente da queima da lenha, em que o consumo atingia mais de 75%. Desde então foram surgindo necessidades de diversificação nesta matriz energética que suprisse o país no contexto de um acentuado crescimento urbano e industrial, no qual se destacam a eletricidade, para a indústria, famílias e transporte, além do gás e petróleo para também compor indústrias e transportes (CEMIG, 2012; EPE, 2007).

No período compreendido entre as décadas de 1940 e 1960 a produção energética brasileira era predominantemente estatal. Por esta razão, foram criadas grandes empresas como a Petrobrás e Eletrobrás com a finalidade de garantir o abastecimento interno. O monopólio energético brasileiro, juntamente com as regulamentações de custos de serviços operou de forma eficiente por longos anos, isto concorreu para a expansão da capacidade energética do país (GUERRA *et al.*, 2014).

A partir dos anos de 1960, durante o governo militar houve aumentos consideráveis no consumo energético impulsionado pelas grandes construções nos setores de transportes e civil, cujo objetivo era o progresso nacional. Neste mesmo período a expansão energética foi observada através das edificações de usinas hidroelétricas, como as de Ilha Solteira, de Tucuruí e a Usina de Itaipu, além das usinas nucleares Angra 1 e Angra 2 (SILVEIRA, 2017).

Em 1970, com a primeira crise mundial devido aos choques nos preços do petróleo, investimentos em pesquisas e desenvolvimento foram direcionados para o então subproduto

da indústria açucareira, o álcool, com intuito de agregá-lo juntamente à gasolina em forma de combustível. O Plano Nacional do Álcool (Proálcool) foi criado com o propósito de tentar fazer a substituição quase que total dos derivados de petróleo por álcool. Mais tarde, o Proálcool receberia maiores investimentos devido ao segundo choque do petróleo (MORAES; BACCHI, 2014).

Ainda nos anos 1970, a crise do petróleo obrigou o governo a impor regulamentações na venda de combustíveis, como a mistura de 10% do álcool na gasolina. Em 1973, entretanto surgiram problemas entre a qualidade do etanol e a tecnologia dos carros da época, isto estimulou as inovações às indústrias açucareiras e automobilísticas que passaram a adaptar seus carros ao iniciante combustível (STATTMAN; HOSPES; MOL, 2013).

A consequência deste investimento foi um desenvolvimento no setor açucareiro que a partir da produção de etanol atingiu um crescimento em mais de 28 vezes em 20 anos, e um aumento na frota de veículos abastecidos que alcançou a marca de 4,6 milhões. Finalmente o setor açucareiro passou a incorporar a Matriz Energética Brasileira em 10% do total de energia produzida pela matriz (OLIVEIRA, 2002).

Com um vigoroso crescimento econômico e demográfico brasileiro, a demanda interna por energia no século XX também acompanhou este mesmo ritmo. De acordo com a série histórica de consumo de energia, em 1970 o consumo interno foi estimado em 68,01 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), à época uma população de 93 milhões de habitantes. Em compensação, na virada do século a demanda por energia mais que dobrou, atingiu 197,06 milhões de tep mediante uma população de cerca de 170 milhões de pessoas (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Na década de 1990 houve um crescimento de 49% no consumo energético, contudo a capacidade instalada expandiu apenas 35%. Diante de uma possível crise no abastecimento, foi graças ao sistema termelétrico que o Brasil adiou o racionamento de energia. O uso das reservas de águas também foi o meio encontrado para suprir este descompasso de consumo e oferta de energia. O uso destas fontes gerou riscos de déficit energético cada vez mais crescentes (TOLMASQUIM, 2000).

Em 2 de julho de 2003, um decreto da Presidência da República instituiu um grupo de trabalho encarregado de fazer estudos a respeito da viabilidade de tornar o biodiesel como mais uma fonte de energia alternativa, assim foi elaborado um relatório que serviu para estabelecer o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Juntamente com estes estudos, um marco regulatório para o setor de biocombustíveis se iniciou; este marco

considerou a diversidade de oleaginosas disponibilizadas no Brasil como garantia de suprimento e qualidade frente aos já existentes combustíveis (CASTRO, 2011).

O Brasil se tornou autossuficiente em petróleo em 2006 quando foi anunciado pela Petrobrás extensas reservas de petróleo e gás nas camadas de pré-sal do litoral do Espírito Santo e de São Paulo. Também neste mesmo período começou a se verificar um crescimento da demanda por biocombustíveis. Com isso, além da preocupação com questões ambientais, o interesse brasileiro em diversificar sua matriz energética concentrara-se principalmente na inserção de fontes alternativas a gasolina no mercado interno, sobretudo no mercado externo (KOHLHEPP, 2010).

Nas últimas décadas o setor energético brasileiro tem passado por diversas mudanças na composição de sua matriz. Cabe destacar que a produção e o consumo de gás natural aumentaram e, portanto foram desenvolvidas maiores infraestruturas para o transporte e importação. Ademais foram descobertas novas reservas de gás natural no assoalho marítimo que ainda precisam de instalações próprias para seu armazenamento e, conseqüentemente um fomento para esta indústria (CONFORT; MOTHE, 2014).

2.2 Composição da Matriz Energética Brasileira

O Brasil pode ser considerado, em termos de energia primária *per capita*, eficiente energeticamente, pois obtém resultados econômicos iguais à média *per capita* mundial. Contudo usando apenas metade da energia média *per capita* mundial. Além disso, para garantir maior progresso econômico precisa aumentar a disponibilidade de energia visando sempre melhoria de vida da população (GOLDEMBERG; MOREIRA, 2005).

De acordo com o Balanço Energético Nacional, em 2017, o total de energia disponibilizada no Brasil alcançou 291 Mtep (Megateps), se comparado ao ano anterior, houve um aumento de 1,3%, e este crescimento foi motivado pelo incremento nas ofertas de gás natural e energia eólica, e ainda contribuiu para a retomada da atividade econômica em 2017. Naquele ano o PIB brasileiro cresceu 1% em relação ao ano anterior. Outro destaque de 2017 foi a elevação da participação de energias alternativas na Matriz Energética Brasileira. Assim manteve o Brasil como um dos maiores produtores de energias renováveis (EPE, 2018a).

2.2.1 Fontes brasileiras de energia não renovável

Para Goldemberg e Lucon (2007), o Brasil se tornou uma referência mundial no estudo e desenvolvimento petrolífero. Isso garantiu ao país autossuficiência na produção de petróleo, em 2006, com o descobrimento da camada de pré-sal.

Em 2005, na cidade de Santos, em São Paulo, houve os primeiros indícios de petróleo na camada de pré-sal. No prosseguimento dos estudos, um segundo poço foi escavado contendo volumes equivalentes a cinco e oito bilhões de barris de petróleo e gás natural (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015).

Na Matriz Energética Brasileira também cabe destaque para o gás natural, cuja oferta poderá crescer até 2050 com a descoberta do pré-sal. Desta forma, o gás natural brasileiro pode ter condições de competir com o gás natural importado, principalmente vindo da Bolívia, isto influenciará diretamente na definição dos preços dos insumos no Brasil (EPE, 2018b).

2.2.2 Fontes brasileiras de energias renováveis

O caso brasileiro tem evoluído na busca por incrementos em soluções alternativas para geração de energia, mesmo ainda não sendo significativo, já há incentivos governamentais para o desenvolvimento de biocombustíveis (LAMAS; GIACAGLIA, 2013). De acordo com a Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018, deve haver um aumento de 1% no percentual da participação de biodiesel no diesel a partir de 2019, isto acarretará um crescimento de 15% em volume até 2023.

Ao tratar de fontes de energia alternativas, a produção de biocombustíveis no Brasil, o destaque é para a cana-de-açúcar, de onde provém o etanol, para as áreas produtoras de soja e mamona, de onde se extrai o biodiesel, estas plantações tem se expandido a cada década, alcançando valores recordes de colheita (KOHLHEPP, 2010).

No Brasil, o etanol tem a tecnologia mais avançada para ser produzido. A produtividade da cana-de-açúcar para gerar o etanol é quase o dobro da produtividade do milho para se produzir etanol nos Estados Unidos. Portanto, com o advento do etanol surgiu uma alternativa de produção de energia limpa e mais econômica (CARVALHO; BORTOLINI; BARCELLOS, 2014).

Os biocombustíveis são considerados menos poluidores e a produção é obtida de forma mais limpa. Eles podem ser substitutos dos derivados de petróleo. Entretanto, há evidências segundo as quais com o passar do tempo a utilização dessa fonte de energia causaria danos aos veículos e contaminaria o solo, o que provocaria uma escassez na própria

produção da matéria-prima dos biocombustíveis (CARVALHO; BORTOLINI; BARCELLOS, 2014).

Os biocombustíveis se derivam de biomassa renovável que substituem total ou parcialmente os combustíveis fósseis em motores à combustão ou em outra geração de energia. No Brasil, os biocombustíveis mais utilizados são o etanol, extraído da cana-de-açúcar, e o biodiesel, oriundo de óleos vegetais ou de gordura animal, adicionado ao diesel, no qual é gerado pelo petróleo. A queima desses biocombustíveis emite menos poluidores na atmosfera quando comparados aos combustíveis fósseis tradicionais. Ademais, as emissões de gás carbônico geradas pelo etanol são reabsorvidas pelas plantações de cana-de-açúcar gerando uma parcial compensação. O biodiesel também oferece vantagens ambientais, tais como, emitir, em média 48% menos monóxido de carbono, 47% menos material particulado, estes penetrantes nos pulmões, e 67% menos hidrocarbonetos (BRASIL, 2017).

Farina e Rodrigues (2018) concluíram que o uso dos biocombustíveis é uma realidade na substituição dos combustíveis fossilizados, é economicamente viável e, também, capaz de suprir a demanda crescente do mercado brasileiro de forma sustentável.

A produção de energia proveniente do setor agrícola no Brasil representa cerca de 32% do total de energia ofertada; isto torna o país líder mundial na produção de agroenergias. A explicação para esta liderança é decorrente de sua grande extensão territorial e por uma série de recursos naturais que tornam possíveis a produção de insumos necessários à geração de biomassa. Desta forma, o Brasil é modelo para outras nações na produção de energias alternativas aos combustíveis fósseis (BRASIL, 2017).

Cabe destacar também o uso da lenha no meio rural como fonte de energia. De acordo com a série temporal do Balanço Energético Brasileiro, a lenha inicia a série, em 1970, como a principal fonte energética com representação de 46% do consumo final do país. Isso se deve ao fato de maior parte da população à época residir no campo. Em 2004 o consumo da lenha deixou de ser a fonte energética mais utilizada, passando a representar 8% do consumo final. Portanto se verifica a substituição da lenha na geração de energia. Tal substituição tomou força principalmente, na Revolução industrial devido os derivados do petróleo apresentarem vantagens no transporte, manuseio e consumo em relação à madeira (MANTOVANI; NEUMANN; EDLER, 2016).

O uso energético da lenha se dá de três diferentes formas: pelo desmatamento das matas; pelo reflorestamento ou pelo manejo sustentável de matas nativas. Desta forma, para utilização da madeira na produção de energia pode ser feita diretamente pela queima da madeira ou pela queima de resíduos aproveitados da exploração florestal e utilização de óleos

essenciais na produção de carvão vegetal. A lenha é demandada pelo setor agropecuário e industrial, pelas indústrias siderúrgicas por meio do carvão vegetal. No Brasil, 40% da lenha é convertida em carvão vegetal, sendo a maior parte deste consumido pelas residências (MANTOVANI; NEUMANN; EDLER, 2016).

Conforme Mantovani, Neumann e Edler (2016), os produtores de lenha defendem que esta fonte de energia também apresenta vantagens ambientais semelhantes às apresentadas pela cana-de-açúcar, a saber: a liberação de dióxido de carbono absorvido durante o crescimento das árvores em lugares que haja reflorestamento, cabe destacar que a liberação do dióxido de carbono é ocasionada em cada etapa da produção da lenha, diferentemente se houvesse queimadas das florestas para utilização de agricultura e pecuária, em que a liberação desse gás tóxico é gerada apenas na etapa das queimadas.

No entanto, a energia hidroelétrica é a fonte geradora mais expressiva no Brasil. A capacidade total do país alcança dois terços da capacidade total instalada. A geração de energia por meio da força das águas é considerada limpa e com muitas outras vantagens. Contudo, há a dependência de condições hidrológicas nesta fonte, isso se tem constatado através da seca intensiva de anos anteriores que colocou em risco a produção de energia elétrica no país, o que incentivou a buscar meio de diversificar a geração de energia elétrica. Há uma necessidade de expandir o fornecimento de energia por meio de inserção de fontes renováveis, otimizar a geração de energia intermitente, que é o caso da energia hidráulica, além de analisar o papel da energia fossilizada diante do contexto mundial (SILVA; MARCHI NETO; SEIFERT, 2016).

Para Tolmasquim (2012), a Matriz Energética Brasileira é e continuará sendo um exemplo para os demais países, por possuir uma parcela considerável de energias renováveis em sua matriz, e esta tendência mostra um incremento cada vez maior destas energias pelos próximos anos.

O Brasil já é destaque no setor de produção energética por possuir uma participação expressiva de energias renováveis. Em 2017, a composição das energias renováveis no quadro energético foi de 42,9%. Ao mesmo tempo em que a matriz energética mundial representou 13,7% de produção de energia renovável em 2015. Nesta condição, o Brasil se encontra diante de um grande desafio, que é manter a boa participação de fontes de energias renováveis em sua matriz. (EPE, 2018b).

Tolmasquim (2012) enfatiza a energia gerada pelos ventos, energia eólica, por estar apresentando reduções de custos em sua geração. Em 2005 era viável a produção de energia eólica a partir de R\$ 300/MWh. Em 2011 os preços se encontravam na faixa de R\$99/MWh a

R\$105/MWh, ou seja, um terço do valor anterior. Isto é consequência do aumento da capacidade instalada. A propósito, em 2004, a capacidade instalada era de apenas 30 MW, ao passo que no ano de 2016 foi para 8000 MW.

Outro destaque é dado a energia solar que apresentou inicialmente, desenvolvimento nos painéis fotovoltaicos de 65% entre os anos de 1985 e 1995. Desta forma a previsão é alcançar um equilíbrio junto aos combustíveis fósseis em 2025, portanto dobraria a taxa de crescimento da inserção desta energia no consumo interno (IEA, 2000).

2.3 Modelos de previsões da produção de fontes energéticas

Em diversos países têm surgido estudos que buscam prever oferta e demanda por energia em diferentes aspectos, seja por interesse no desenvolvimento econômico, seja relacionado aos aspectos ambientais ou até mesmo a preocupação com a escassez, dado o uso de energia originária de matéria-prima intermitente.

Shuyu Li e Rongrong Li (2017) desenvolveram um estudo sobre o consumo de energia para a província de Shandong, na China, onde a principal fonte de geração de energia é o carvão. Com base no forte crescimento econômico associado ao consumo de energia e, dada a preocupação de suprimento futuro, um dos instrumentos utilizados na pesquisa foi o modelo ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*). De acordo com os resultados a previsão foi um crescimento da demanda em 44% em relação a uma tonelada de carvão para o ano de 2020. O estudo conclui que para esta província é necessário haver diversificação da matriz energética para o suprimento interno e manutenção do crescimento econômico.

Enquanto isso, Wang *et al.* (2018) verificaram a dependência da China em relação ao petróleo estrangeiro para o ano de 2030, utilizando uma metodologia semelhante de predição, metodologia ARIMA. Os pesquisadores concluíram que o nível de dependência chinesa passará de 65% em 2016 para 80% em 2030, portanto um alto nível de sujeição que traz preocupações e incertezas para um futuro próximo no fornecimento de energia daquele populoso país.

A Índia, que devido sua rápida industrialização e urbanização e, além de ter como principal fonte de energia o carvão, é o segundo maior país consumidor e importador de carvão, também se tornou o terceiro maior país emissor de gases do efeito estufa. Por estas razões Li, Yang e Li (2019) desenvolveram uma pesquisa de previsão do consumo do carvão para o ano de 2030, no qual se verificou um aumento em 150 milhões de toneladas equivalentes ao petróleo no consumo de carvão para o ano 2030 se comparado ao ano de

2017. Entre o período de 2018-2030 a taxa anual de crescimento do consumo de carvão está estimada em 2,5%.

Baseados no crescimento per capita, oferta de energia interna, infraestrutura instalada no país, políticas governamentais e disponibilidade de recursos, Mujiyanto e Tiess (2013) fizeram previsões para a demanda de energia para a Indonésia, país cuja economia é a maior do sudeste asiático e um dos membros do G-20 (vinte maiores economias do mundo). Os autores fizeram previsão para o ano de 2025 da oferta interna de energia. Constataram que o consumo de energia naquele país deve aumentar em três vezes entre 2010 e 2030, enquanto a produção tradicional de energia não será suficiente para acompanhar uma taxa de 1,9% ao ano de crescimento populacional.

Em outra perspectiva, Kennedy e Bachmann (2016) desenvolveram uma pesquisa sobre a oferta de energia como fator essencial para produção em qualquer ativo físico da economia. Usando uma modelagem que distingue energia incorporada nos bens de capital, em outros bens que consomem energia, do lado da demanda, do lado da oferta, que é a energia utilizada na distribuição e produção, os resultados mostraram que o crescimento econômico é gerado a partir do uso da energia na construção de bens de capital, ao invés de utilizá-la para consumo final. A pesquisa que foi feita entre os anos de 1990 e 2008 corroborou com o cenário apresentado no período.

3 METODOLOGIA

Conforme exposto anteriormente, o trabalho tem como objetivo principal avaliar a composição relativa da Matriz Energética Brasileira, bem como criar modelos de previsão de produção dos seus componentes renováveis e não renováveis entre os anos de 1970 e 2018, levando em consideração a instabilidade dos preços internacionais do barril de petróleo que são definidos por um sistema oligopolizado de mercado.

O trabalho utilizou informações da produção das diferentes fontes de energia não renováveis e renováveis que compõem a Matriz Energética Brasileira que estão disponibilizadas na Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A EPE é uma agência de estudos e pesquisas de fomento e planejamento energético vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME) do Brasil.

A pesquisa também utilizou os preços internacionais do barril de petróleo produzido em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, que foram fornecidos pela *International Energy Agency* (IEA) e deflacionados pelo *Consumer Price Index* (CPI-U), índice de preços ao consumidor dos Estados Unidos. A IEA é uma das principais empresas de estatística energética do mundo e a qual possui a série completa dos preços do barril do período compreendido pela pesquisa

As variáveis utilizadas estão divididas em dois segmentos: endógenas e exógenas. A seguir, no Quadro 1 a descrição e classificação de cada variável. Todas estão compreendidas dentro do período de 1970 a 2018.

Quadro 1 - Variáveis utilizadas

Classificação	Descrição
<p>Variáveis endógenas Unidade: 10^3 tep (Tonelada equivalente ao petróleo)</p>	<p>$X_{1t} = \text{PETR}_t$: produção brasileira de petróleo; $X_{2t} = \text{GASN}_t$: produção brasileira de gás natural, $X_{3t} = \text{HIDRO}_t$: produção brasileira energia hidráulica; $X_{4t} = \text{LENHA}_t$: produção de lenha; $X_{5t} = \text{CANA}_t$: produção de etanol (cana-de-açúcar como matéria prima).</p>
<p>Variável exógena Unidade: Dólar (US\$)</p>	<p>$P_{it} = \text{PREC}_t$: preço do barril de petróleo.</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Participação relativa e crescimento médio das fontes energéticas

Em busca de cumprir o primeiro objetivo do estudo, que consiste em estimar a composição relativa de itens renováveis e não renováveis que compõem a Matriz Energética Brasileira foi calculado a composição relativa da matriz energética por meio da divisão do total anual produzido de cada fonte de energia (petróleo, gás natural, hidroelétrica, lenha e cana-de-açúcar) pelo total de energia produzida por essas fontes. Em seguida, para fazer as estimativas de tendência de longo prazo, são utilizadas as taxas geométricas de crescimento (TGC), em que uma variável aleatória é tomada no seu logaritmo natural de acordo com a Equação (1):

$$\ln(Y_t) = \alpha + \beta T + \varepsilon_t \quad (1)$$

Na Equação (1) T corresponde ao tempo ($T = 0, 1, 2, \dots, N$). O coeficiente log-linear α é o valor esperado da variável observada Y_t no período zero ou quando o valor de β for igual a zero. O coeficiente angular β é a derivada de $\ln(X_t)$ em relação ao tempo. Ao multiplicar por 100 a equação aferiu a variação média percentual de X_t , no período sob investigação. O termo ε_t , por hipótese, é o ruído branco e se distribui normalmente em torno de uma média zero. Com estas hipóteses os coeficientes lineares e a TGC podem ser estimados utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (WOOLDRIDGE, 2012). Caso β seja significativamente positivo Y_t tem tendência crescente. Caso contrário, sendo β estatisticamente negativo, a tendência em longo prazo será decrescente para a participação relativa da i -ésima fonte utilizada no estudo (WOOLDRIDGE, 2012; GUJARATI e PORTER, 2011).

3.2 Modelo de previsão das variáveis endógenas

Para atingir o segundo objetivo, inicialmente assumiu-se que, por definição, o valor esperado $E(Y_t)$ de uma variável aleatória Y_t , diferirá do seu valor observado em decorrência de ruídos brancos, definidos por Θ_t na Equação (2)

$$E(Y_t) = Y_t + \Theta_t \quad (2)$$

Da equação (2), segue-se que:

$$Y_t = E(Y_t) - \Theta_t \quad (2a)$$

Desta forma, as variáveis endógenas de produção das diferentes fontes de energia, podem ser representadas genericamente de Y_{it} , cujo valor previsto ou esperado é $E(Y_{it})$.

Para que seja possível fazer previsões associadas às equações (2) e (2a), é necessário que a série da variável aleatória Y_{it} seja estacionária e o termo Θ_t seja ruído branco, isto significa que a série precisa ter média zero, variância constante e possuir autocorrelação nula. A seguir apresentam-se as condições para que uma série seja considerada ruído branco (BOX e JENKINS, 1976; WOOLDRIDGE, 2012; GREENE, 2012).

$$\xi_t \sim N(0; \sigma^2) \quad (3)$$

$$E(\xi_t) = E(\xi_t \mid \xi_{t-1}, \xi_{t-2}, \dots) = 0; \quad (4)$$

$$E(\xi_t, \xi_{t-j}) = \text{Cov}(\xi_t, \xi_{t-j}) = 0; \quad (5)$$

$$\text{Var}(\xi_t) = \text{Var}(\xi_t \mid \xi_{t-1}, \xi_{t-2}, \dots) = \sigma \quad (6)$$

Neste estudo se assume que o termo aleatório Θ_t , é função dos preços do barril de petróleo determinado exogenamente em mercados não competitivos;

$$\Theta_t = f(P_t) \quad (7)$$

Para estimar os valores esperados de X_t utiliza-se de modelos ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*) definidos por Box e Jenkins (1976). A seguir, a síntese do modelo de Box-Jenkins no que se aplica a esta pesquisa.

3.3 Modelo de Box e Jenkins

Os modelos de Box e Jenkins, (1976), que se utilizam de análise probabilística com um modelo matemático, são conhecidos tecnicamente como metodologia ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*), aplicados a séries estacionárias que, por definição, são aquelas que apresentam média e variância constante em toda a sua realização. Caso a série não apresente estacionariedade, é necessário utilizar mecanismos que a torne estacionária.

Após alcançar a estacionariedade, pode-se definir três modelos ARIMA: modelo autorregressivo; modelo médias móveis, e modelos mistos, autorregressivos e médias móveis.

3.3.1 Modelos de séries temporais autorregressivo (AR)

Um modelo de série temporal autorregressivo de ordem P pode ser escrito da seguinte forma:

$$Y_t = \mu + \sum \psi_k \cdot u_{(t-k)} = \mu + \psi(B) \cdot u_t \quad (8)$$

Em que o filtro linear ψ é definido por:

$$\psi(B) = \theta(B) / \varphi(B) \quad (9)$$

Como descrito anteriormente, o primeiro passo de aplicação do modelo de Box e Jenkins é verificar a estacionariedade da série, isto se dá para que se identifique o modelo mais apropriado na estimação dos parâmetros. Entretanto, caso a série seja não-estacionária, pode-se utilizar o procedimento no qual se obtém uma primeira diferenciação da série descrita na Equação (2):

$$Y_t = Y_t - Y_{t-1}, \text{ sendo } t = 2, \dots, n \quad (10)$$

Em seguida, estima-se a função de autocorrelação entre os resíduos. Neste caso, se a função de autocorrelação se estabilizar nas primeiras defasagens, tem-se que a série passou a ser estacionária.

Seja a seguinte série temporal Y_t representada na equação seguinte:

$$Y_t = \emptyset_0 - \emptyset_1 Y_{t-1} - \emptyset_2 Y_{t-2} - \dots - \emptyset_p Y_{t-p} + \xi_t \quad (11)$$

em que, $\emptyset_0, \emptyset_1, \dots, \emptyset_p$ são parâmetros, e que o modelo descrito na equação é autoregressivo (AR) de ordem P. Este modelo descreve a relação entre o valor atual e os valores históricos da própria variável dependente. Desse modo, o modelo autorregressivo é um método de previsão por meio de dados históricos da própria variável. (LI; YANG; LI, 2019).

3.3.2 Modelos de séries temporais médias móveis (MA)

Na composição do modelo ARIMA, também está contido o modelo de Médias Móveis (MA), na qual a série temporal é resultado da combinação dos ruídos brancos ξ do presente período e dos períodos passados. Portanto, o modelo de Médias Móveis de ordem q MA(Q) é definido na Equação 12:

$$Y_t = \xi_t - \theta_1 \xi_{t-1} + \theta_2 \xi_{t-2} + \dots + \theta_q \xi_{t-q} \quad (12)$$

No qual θ_i é o parâmetro que descreve como Y_t se relaciona com o valor ξ_{t-i} com $i = 1, 2, \dots, q$.

3.3.3 Modelos de séries temporais autorregressivos e médias móveis (ARMA)

Os modelos AR de ordem P e MA de ordem Q associados a uma série temporal estacionária podem ser estimados conjuntamente. Neste caso são identificados como modelos ARMA (P,Q). A definição do modelo é expressada na Equação (13)

$$Y_t = c + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_2 Y_{t-2} - \dots - \phi_p Y_{t-p} + \xi_t - \theta_1 \xi_{t-1} + \theta_2 \xi_{t-2} + \dots - \theta_q \xi_{t-q} \quad (13)$$

3.3.4 Técnica para testar a estacionariedade de uma série temporal

Para que seja possível fazer previsões e que estas estejam corretas e adequadas, é necessário verificar se as séries utilizadas no estudos possuem raízes unitárias. Para tanto se realizaram testes antes de partir para a estimação dos coeficientes associados ao modelo ARIMA. Caso a hipótese de presença de raiz unitária na série em estudo, é imprescindível a sua transformação em estacionária.

O método de transformação mais comum constitui-se em tomar uma ou duas diferenças consecutivas da série original, deste modo a série se tornará estacionária. O número de diferenças, nomeado de D, utilizados para se atingir a estacionariedade na série é denominado de ordem de integração. (BOX e JENKINS, 1976). Quando se inclui a ordem de integração ao modelo ARMA, tem-se um novo modelo, ARIMA (p, d, q) descrito na Equação 14:

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \xi_t - \theta_1 \xi_{t-1} - \dots - \theta_q \xi_{t-q} \quad (14)$$

em que: $w_t = \Delta^d Y_t$

Para estimar os parâmetros das equações utilizadas no trabalho foram feitos, inicialmente testes de estacionariedade. Quando detectada a não estacionariedade, se utilizou do procedimento definido na Equação (10) visando à obtenção da estacionariedade da série.

Os pressupostos estabelecidos anteriormente, assumem que o termo aleatório tem distribuição normal, média zero e variância constante (Equação 3). A suposição mostrada na Equação (4) estabelece que o valor esperado do resíduo de ruído branco sempre será nulo, considerando os resíduos de períodos anteriores. A hipótese da Equação (5) estabelece que os resíduos que são ruídos brancos não podem ser autoregressivos. Por fim, na Equação (6) é exposto que para ser considerado ruído branco, o resíduo deve possuir variância constante ao

longo de toda série, isto é, ser homocedástico. (WOOLDRIDGE, 2012; GUJARATI e PORTER, 2011).

Outra possibilidade para verificar se a distribuição dos resíduos ocorre de forma aleatória é por meio da análise de correlogramas, em que é verificado se a distribuição ocorre de forma errática em torno da média zero e variância constante. Para isto foram empregadas as funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parciais (FACP) que permitiram observar os comportamentos das séries temporais, para estabelecimento do melhor modelo. (DETZEL *et al.*, 2011)

Os testes de Box- Pierce, modificado por Ljung e Box completam a sequência de alternativas para verificação do comportamento dos ruídos. (MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998). Todos esses procedimentos foram realizados neste trabalho.

Na escolha dos modelos estatisticamente apropriados, a busca também se deu por modelos mais parcimoniosos (quanto menor o número de regressores, melhor o modelo de ajustamento), que mostrem bem o comportamento da variável. Neste caso os critérios utilizados foram o critério de Akaike (AIC), os critérios bayesianos de Schwartz (SBIC) e $SIGMA^2$ (variância da série). Este último representa a volatilidade da série. Os modelos que apresentaram menores magnitudes nas estimativas de AIC, BIC e $SIGMA^2$ foram os melhores no ajuste dos dados e permitiram apresentar modelos mais rigorosos estatisticamente para a construção das previsões (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2013).

O critério de Informação de Akaike pressupõe a existência de um modelo real, no qual se descrevem os dados desconhecidos avaliando todos os modelos possíveis e escolhe-se o que seja mais apropriado a série sob análise. A seguir, a equação 15 do critério AIC:

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2p + 2 \frac{p(p+q)}{n-p-1} \quad (15)$$

Em que $L(\hat{\theta})$ é a função de máxima verossimilhança do modelo e p, o número de variáveis explicativas do modelo e n o número de observações.

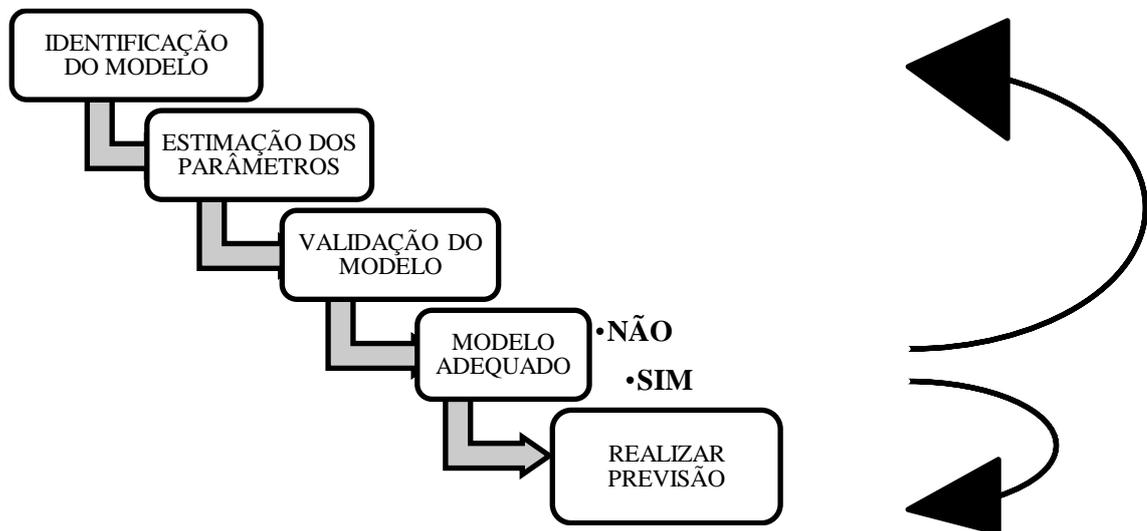
O critério Bayesiano de Schwarz (SBIC) estima a existência de um modelo verdadeiro que descreve as variáveis dependentes em relação às variáveis explicativas, entre os modelos selecionados. Este critério maximiza a estatística probabilística que identifica o verdadeiro modelo dentre todos previstos. A equação 16 expõe o critério SBIC:

$$BIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + p \log(n) \quad (16)$$

No qual, $L(\hat{\theta})$ é a função de máxima verossimilhança do modelo e p , o número de variáveis explicativas do modelo e n o número de observações.

A seguir, o resumo da metodologia desenvolvida por Box e Jenkins

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de Box e Jenkins



Fonte: PINTO (2006)

3.3.5 Testes de raiz unitária aplicados nas séries

Em modelos envolvendo análise de séries temporais, faz-se necessário conferir se as séries são estacionárias ou não. Em caso de não estacionariedade, o resultado pode levar a um fenômeno conhecido como regressão espúria (BUSCARIOLLI; EMERICK, 2011). Verificar a estacionariedade de uma série temporal significa analisar se a média e variância associada à realização da série são constantes ao longo do tempo e a covariância entre dois períodos depende apenas da distância, do intervalo ou da defasagem dos intervalos de tempo. Ou seja:

$$E(Y_t) = \mu \quad (17)$$

$$\text{Var}(Y_t) = E(Y_t - \mu)^2 = \sigma^2 \quad (18)$$

$$\text{Cov} = E[(Y_t - \mu)(Y_{t+k} - \mu)] \quad (19)$$

De acordo com Gujarati e Poter (2011), pode se considerar o seguinte modelo de série temporal AR(1)

$$y_t = \phi y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (20)$$

Para que esta série seja estacionária ϕ precisa atender a restrição de $|\phi| < 1$, desta forma as hipóteses de estacionariedade podem ser escritas como:

$$H_0: \phi = 1, y_t \text{ não é estacionário} \quad (21)$$

$$H_0: |\phi| < 1, y_t \text{ é estacionário} \quad (21a)$$

Na Equação (20) pode ser feita a seguinte modificação algébrica:

$$y_t - y_{t-1} = \phi y_{t-1} - y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (22)$$

Considerando $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ a equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta y_t = (\phi - 1)y_{t-1} + \varepsilon_t = \pi y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (23)$$

Ou

$$\Delta y_t = \pi y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (24)$$

Após estimar o parâmetro π testa-se as seguintes hipóteses:

$$H_0: \pi = 0, y_t \text{ não é estacionário} \quad (25)$$

$$H_0: \pi < 0, y_t \text{ é estacionário} \quad (25a)$$

Os testes que verificaram a estacionariedade das séries temporais aplicados no trabalho são os testes de Dickey e Fuller Aumentado (ADF) e o Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), Além da análise gráfica, este método não possui, contudo, eficiência suficiente para atestar a não estacionariedade.

O teste de Dickey e Fuller considera o erro como um ruído branco. Entretanto o erro pode ser apenas um processo estacionário qualquer, e isso pode causar distorções no poder do teste. Assim a forma de corrigir esse detalhe é adotar o teste ADF que faz uso da seguinte regressão (BUENO, 2011).

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (26)$$

$$\text{Em que: } \gamma = -(1 - \sum_{i=2}^p \alpha_0) \text{ e } \beta_1 = \sum_{i=2}^p \alpha_j \quad (27)$$

No qual, α_0 é o intercepto; γ é a ordem do modelo auto-regressivo do comportamento da série temporal; Y a variável dependente ; Δ operador de diferença; ε_t a estrutura do ruído branco, no qual assume ser idêntica e independentemente distribuída.

De acordo com Silva e Machado (2009) avalia-se a hipótese nula do teste ADF, ou seja, $\gamma=0$, em que se rejeita quando o τ calculado é maior que o τ crítico de Dickey e Fuller tabelado, portanto a série é estacionária. Caso H_0 não seja rejeitado se deve fazer um novo teste até a hipótese nula ser rejeitada, o critério de informação utilizado foi o critério de Schwarz para determinar o número de defasagens.

O segundo teste utilizado na pesquisa para verificar a estacionariedade das séries é o KPSS (KWIATKOWSKI et al.,1992). Esses autores consideram que a hipótese nula é aceita

nos demais testes, principalmente em séries econômicas agregadas, por isso a hipótese nula deste teste é a afirmação segundo a qual a série observada é estacionária contra a hipótese alternativa de existência de raiz unitária. Maddala e Kim (1998) consideram o teste KPSS uma espécie de teste comprobatório e desta forma constata a eficácia da análise obtendo resultados mais robustos na verificação da ordem de integração da série temporal.

O teste KPSS é dado da seguinte forma:

$$\sum_{t=1}^T \frac{s_t^2}{T^2 \hat{\upsilon}^2} \quad (28)$$

Em que:

$$\hat{\upsilon}^2 = \sigma^2 + \frac{2}{T} \sum_{t=j}^T \omega\left(\frac{j}{M+1}\right) \sum_{t=j+1}^T \hat{e}_t \hat{e}_{t-j} \quad (29)$$

$$\text{e } \sigma^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \hat{e}_t^2}{T} \quad (30)$$

3.4 Teste Ljung-Box para verificar se os ruídos são aleatórios

Por meio do teste de Ljung-Box (LJUNG; BOX, 1978) se verifica se há autocorrelação entre os resíduos, constitui em analisar características de um possível ruído branco, ou seja, $\varepsilon^{\text{iid}} \sim N(0, \sigma^2)$, portanto, os resíduos não devem ser correlacionados ou apenas possuir pequena correlação. Desta forma a hipótese nula é

$$H_0 : \rho_1(e) = \rho_2(e) = \dots = \rho_k(e) = 0 \quad (31)$$

A estatística de teste de Ljung-Box possui distribuição Qui-Quadrado com k-n graus de liberdade.

$$Q = N(N+2) \sum (N-k)^{-1} r_k^2 \quad (32)$$

em que k é o número de defasagens utilizadas, r_k é o valor estimado do k-ésimo coeficiente de autocorrelação serial e n o número de lags que está sendo testado. Assim, o valor-p é dado como a Prob $[Q \geq \chi^{2gl}]$, isto é, a distribuição Qui-Quadrado.

Se Q^* é significativamente diferente de zero em níveis elevados de probabilidade de erro, diz-se que a autocorrelação de resíduos como um conjunto é significativamente diferente de zero e os choques aleatórios do modelo estimado são ruído branco.

3.5 Testes e medidas de acurácia das previsões

Como um dos principais objetivos a serem alcançados pelo trabalho é fazer previsões da produção de energia das fontes selecionadas da Matriz Energética Brasileira para o período 2019-2030, fez-se necessário o uso de testes que verifiquem a consistência dos valores previstos.

3.5.1 Raiz do erro quadrático médio

O teste de Raiz do erro Quadrático Médio (RMSE) calcula o desvio médio dos erros de cada previsão em relação ao valor observado contido na série temporal. Quanto mais próximo de zero for o RMSE melhor é a capacidade preditiva do modelo. De acordo com a equação (33), o RMSE se obtém da seguinte forma:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \hat{x}_t)^2 \quad (33)$$

x_t e \hat{x}_t são os valores observados e previstos, respectivamente; N é o tamanho da amostra.

3.5.2 Correlação de Pearson

Outro teste feito foi para verificar a aderência dos valores previstos em relação aos valores observados, o teste de correlação de Pearson:

$$r = \frac{\sum Z_x Z_y}{N} \quad (34)$$

Z_x e Z_y são os desvios padrão das variáveis x e y que neste trabalho representam os valores observados (x) e os valores previstos (y); N será o tamanho da amostra.

O coeficiente de Pearson varia entre -1 a 1 estes valores sugerem a força da relação entre as variáveis, caso a correlação assuma o valor zero, isto indica que não há relação linear entre as variáveis. (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009) Quanto mais aproximado de um for este coeficiente de correlação, mais aderente os valores observados estarão aos valores previstos. Portanto, melhor e mais robusta será a série dos valores previstos.

3.5.3 Medida de erro

Para as previsões que utilizam Box e Jenkins também é necessário utilizar a medida do erro e verificar a eficácia da previsão obtida. Makridakis *et. al.* (1998) sugerem que o cálculo seja feito por meio da média dos valores absolutos dos erros percentuais (MAPE), pois pela

fórmula dos erros percentuais não se consegue medir o erro ao longo do tempo, mas apenas o erro percentual durante a série. Estimaram-se os valores absolutos dos erros percentuais de acordo com a o tamanho da série a partir da equação (34).

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right|}{n} \times 100 \quad (35)$$

Em que y_t são os valores observados, \hat{y}_t os valores previstos e n o número de observações.

3.6 Previsões 2019-2030 das fontes energéticas não renováveis e renováveis

Buscando atender o quarto objetivo que é testar a influência dos preços do petróleo sobre os modelos de previsão, parte-se da Equação (2a) definida anteriormente. Aquela equação estabelece que:

$$Y_t = E(Y_t) - \Theta_t \quad (2a)$$

A hipótese testada foi que os preços do barril de petróleo influenciam o modelo de previsão através dos ruídos associados a essas previsões. Assume-se que o distanciamento do valor esperado em relação ao verdadeiro valor da variável ao longo do tempo se dá em função dos preços sobre os ruídos da estimação. Assim, definiu-se anteriormente na Equação (7) que:

$$\Theta_t = f(P_t) \quad (7)$$

Esta relação de dependência será através do modelo linear simples definido na equação (36)

$$\Theta_t = \acute{\alpha}_0 + \acute{\alpha}_1 P_t + v_t \quad (36)$$

Em que v_t é também considerado, por hipótese, ruído branco.

Ao substituir a equação (36) na equação (2a) obtém-se o modelo de estimação da variável endógena sendo influenciada pela variável exógena P_t , Neste caso, a influência se dará, por hipótese, por meio dos ruídos, como segue na Equação (37):

$$Y_t = E(Y_t) - [\acute{\alpha}_0 + (\acute{\alpha}_1 P_t + v_t)] \quad (37)$$

Uma hipótese alternativa que ocorreu de ser testada, caso o modelo da Equação (36) não se adéque, foi que os preços do barril de petróleo influenciam na previsão da produção. Imputou-se que o distanciamento do valor esperado em relação ao verdadeiro valor da

variável ao longo do tempo se dá de forma linear com os preços influenciando diretamente a produção de determinada fonte de energia, por meio da Equação (38).

$$E(Y_t) = \alpha_0 + \alpha_1 P_t + \mu_t \quad (38)$$

Caso o coeficiente α_1 seja estatisticamente diferente de zero significa que a evolução dos preços do barril de petróleo influencia na previsão da produção interna do item energético via ruído branco ou diretamente na previsão da produção.

Mesmo sendo autossuficiente na produção de petróleo, o preço do barril é uma cotação internacional regido por um pequeno grupo de produtores dos principais países exportadores de petróleo, como dito anteriormente. Além de produzir petróleo suficiente para a demanda interna, o Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e parte da produção é destinada à produção de etanol, o que torna o país o segundo no ranking mundial de exportações e consumo de etanol. O etanol é o principal substituto de petróleo na geração de energia brasileira e de alguns países. No início dos anos 2000, com a queda do preço do açúcar no mercado mundial e com o início das discussões a cerca das emissões de CO₂ por parte dos combustíveis fósseis, o Brasil retomou o Proálcool. Entretanto, a rentabilidade de se produzir etanol se inicia quando os níveis de preços do barril de petróleo se encontram partir de US\$ 40,00/barril (KOHLHEPP, 2010).

Tomando o nível de preço do barril que torna a produção de etanol rentável, as previsões da produção dos itens energéticos que são influenciados pelos preços do barril de petróleo foram feitas por meio de cenários. Foram criados três cenários de preços do petróleo que foram utilizados na formatação das previsões da produção de energia em fontes que se mostraram sensíveis, sob a óptica estatística, na formação das expectativas de suas produções.

As previsões foram feitas para os anos de 2019 a 2030, portanto doze anos. Considerando que os dados acerca da produção de energia no Brasil de um determinado ano são divulgados no segundo semestre do ano seguinte, a pesquisa abrange o ano de 2019 na amostra, mesmo não este não sendo o ano vigente.

Para fazer as simulações hierarquizou-se a série dos preços do barril de petróleo em ordem crescente. Em seguida dividiu-se a série em três partes tomando o valor de US\$ 40,00/barril o valor mínimo. Os cenários foram definidos sob a óptica do produtor, isto é, para o Brasil. Numa expectativa de preços do petróleo em ascensão, acima de US\$ 40,00/barril, os produtores das fontes energéticas não renováveis e renováveis tendem a elevar as suas produções. Em um cenário de preços em queda, igual ou menor que US\$ 40,00/barril não compensarão produzir fontes energéticas alternativas devido ao custo de produção associado a

essas fontes que ainda são elevados. Para o produtor melhor são os preços altos, em que é estimulada a produção interna da fonte afetada pelos preços internacionais do barril de petróleo. Definido assim, os cenários estão especificados no Quadro 2.

Quadro 2 - Cenários de previsão de produção de energia.

Cenários	Descrição
Cenário 1: otimista	$76,70 < P_t < 119,24$
Cenário 2: intermediário	$53,86 < P_t < 82,79$
Cenário 3: pessimista	$40,12 < P_t < 64,22$

Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as estimativas do trabalho foram realizadas usando o software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 20.0 e o software *Eviews*® 9.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está dividido em seções de acordo com os objetivos elencados pela pesquisa, para que desta forma seja possível analisar as estimativas obtidas ao longo do trabalho e verificar previsões para a Matriz Energética Brasileira.

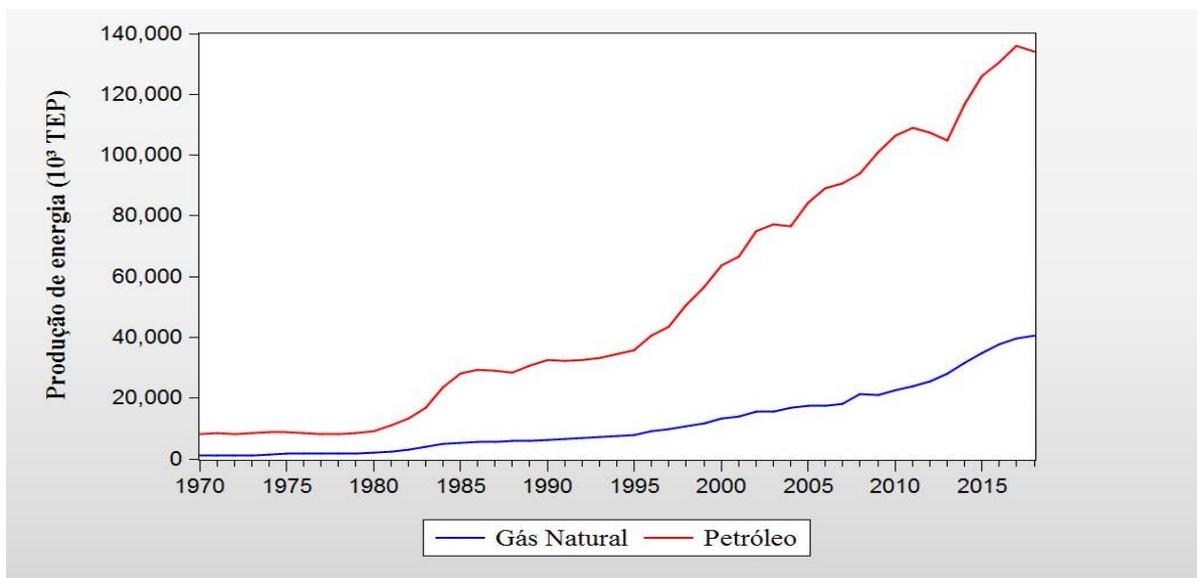
A Matriz Energética Brasileira é composta por diferentes tipos de energia, que a fazem ser considerada uma das mais diversificadas do mundo. A pesquisa utilizou as principais fontes energéticas da matriz, nas quais a participação relativa representa quase que o total da Matriz Energética Brasileira compreendida na série temporal de 1970 a 2018.

De acordo com os dados disponíveis pela EPE, uma parte das fontes energéticas apresentou redução na produção no decorrer dos anos, como a produção de carvão vegetal, carvão mineral e outros derivados do petróleo, que as tornam quase que insignificantes sob o ponto de vista estatístico, enquanto há novas fontes inseridas no contexto da produção brasileira que por esta razão ainda não apresentam dados suficientes para que de acordo com a literatura sejam considerados uma série temporal.

4.1 Comportamento das séries temporais

Selecionadas as séries utilizadas no estudo, inicialmente se verificou o comportamento das variáveis ao longo dos anos. No Gráfico 1 se observa a distribuição dos dados originais de produção de energia das fontes não renováveis, petróleo e gás natural no período 1970-2018.

Gráfico 1 - Produção de energia não renovável no Brasil entre 1970 e 2018

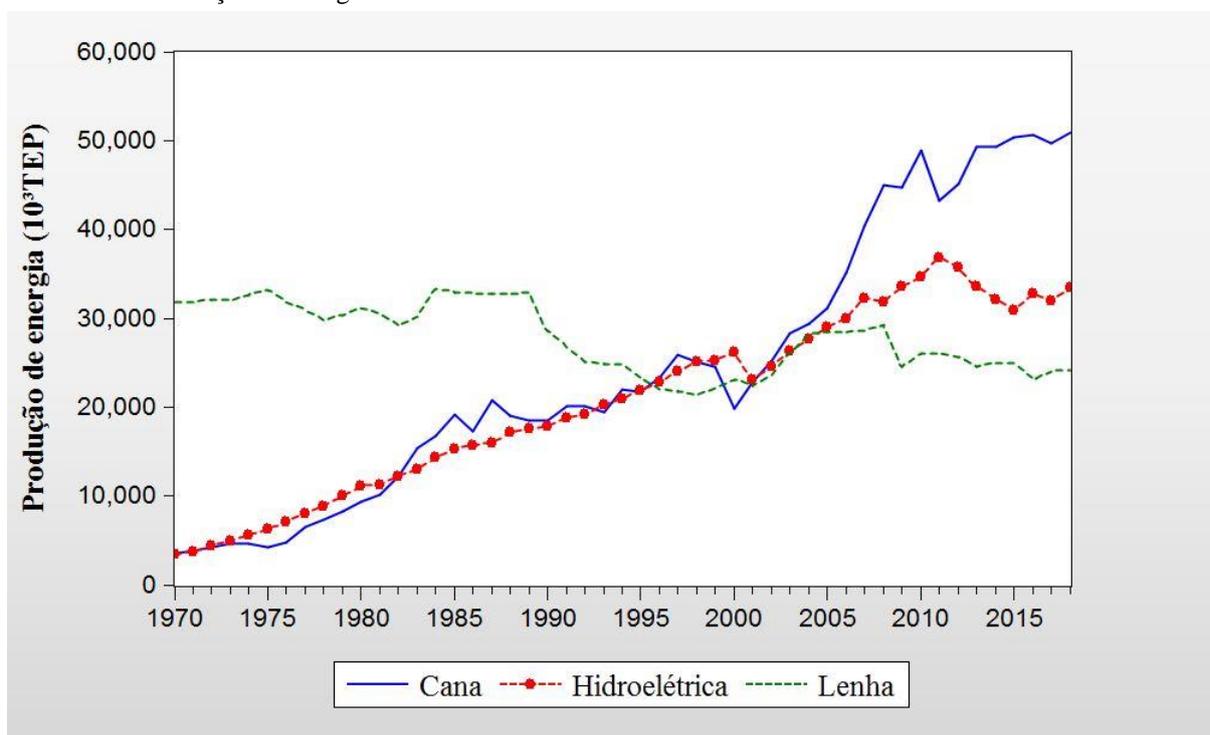


Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

No período de referência, é notável ascendência do uso do petróleo como fonte geradora de energia, mesmo havendo algumas oscilações, a produção de petróleo mantém uma tendência em seu crescimento considerável no decorrer dos anos. A produção de gás natural mantém um crescimento estável em grande parte do período de estudo. Contudo, na última década (2010) a produção alcança crescimentos mais elevados tornando-se a segunda principal fonte não renovável geradora de energia.

No Gráfico 2 estão contidos os dados observados das fontes renováveis: cana-de-açúcar, hidroelétrica e lenha entre 1970 e 2019.

Gráfico 2 - Produção de energia renovável no Brasil entre 1970 e 2018

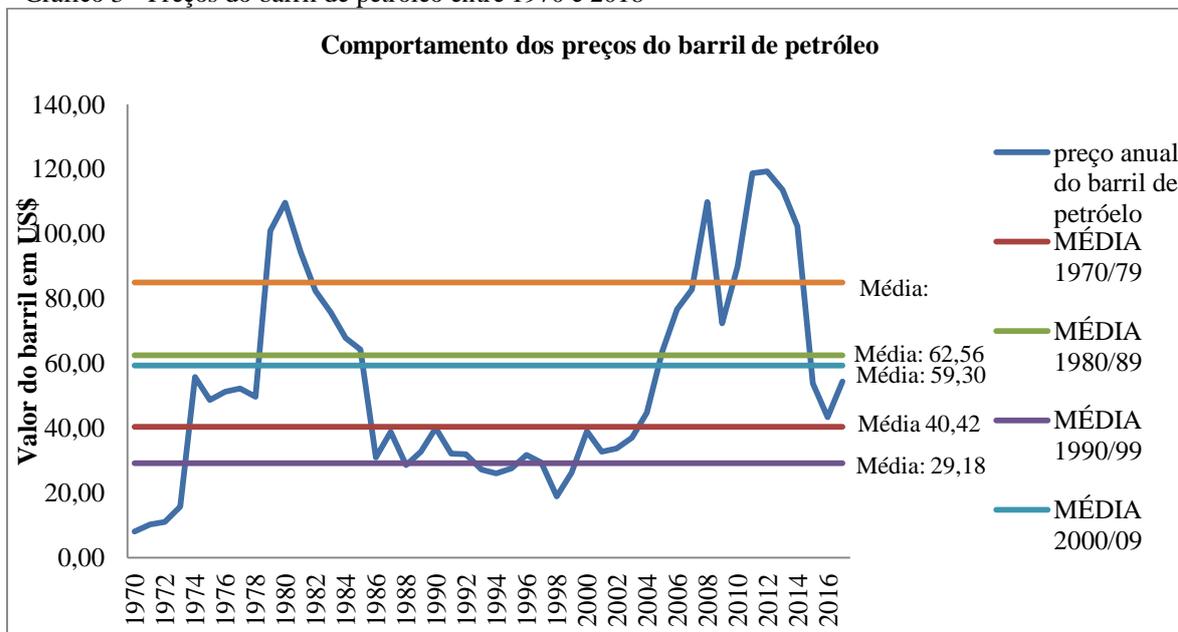


Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

As fontes renováveis, com exceção da lenha, se comportam no decorrer da série sempre de forma ascendente na matriz brasileira. A energia oriunda das hidroelétricas desde 1970 possui notoriedade na produção de energia brasileira. Entretanto, em anos recentes, a cana-de-açúcar tem superado a produção de energia ficando apenas atrás da produção petrolífera. Isto se iniciou, principalmente após a segunda crise do petróleo nos anos de 1970, devido à dependência de uma única fonte geradora de energia, com o objetivo de substituição em larga escala. Nos anos 1970, o Brasil, como dito anteriormente e visto no Gráfico 2, tinha a lenha como maior fonte produtora de energia considerada uma fonte renovável. Contudo com as práticas extrativistas que em muitos casos ocorridas na ilegalidade, a substituição era inevitável e ocorreu de forma gradativa ao longo dos anos.

No Gráfico 3, é mostrada a trajetória dos preços do barril de petróleo, em torno das média desses preços observadas nas décadas 1970, 1980, 1990, 2000 e 2010. Observa-se que esses preços ultrapassam a média US\$ 85,00/barril nos anos da década de 1980 e também neste milênio.

Gráfico 3 - Preços do barril de petróleo entre 1970 e 2018



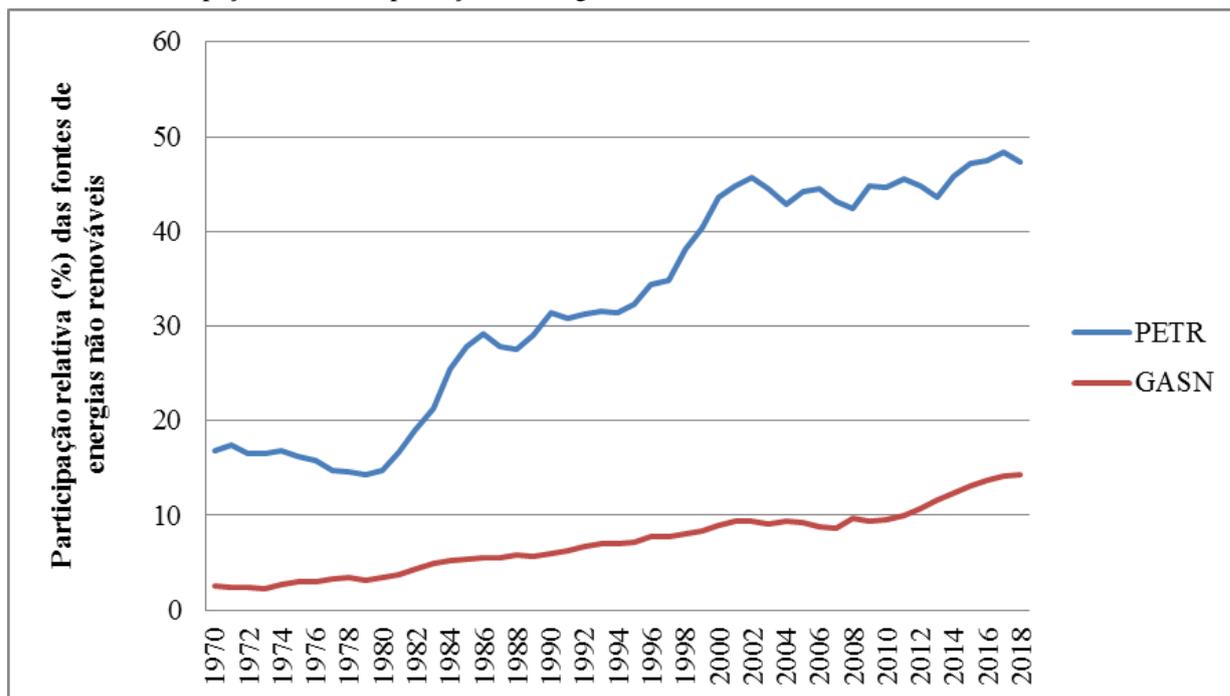
Fonte: Elaborado a partir dos dados da IEA (2018).

Os preços mais altos ocorridos nos anos 1980 são em decorrência das duas crises do petróleo ocorridas na década anterior, em que houve um aumento generalizado dos preços com diminuição da produção por parte da OPEP. Enquanto ao final da série é observada situação pior ao encontrado na década de 1980, atingindo a marca de US\$ 119,24/barril. Esta instabilidade verificada em toda a série dificulta pesquisas de previsão, o que compromete o planejamento energético de um país. Portanto, diante deste cenário a busca pela diversificação deve ser cada vez maior por parte de países que, assim como o Brasil, ainda possuem uma matriz energética fossilizada.

4.2 Evolução temporal da composição relativa da Matriz Energética Brasileira

As estimações referentes às TGCs de cada fonte de energia selecionada foram obtidas após o cálculo da participação relativa de cada fonte na matriz energética, em que a soma destas representam quase a totalidade da produção de energia brasileira. O Gráfico 4 mostra a participação relativa das fontes não renováveis.

Gráfico 4 - Participação relativa da produção de energia não renovável no Brasil entre 1970 e 2018

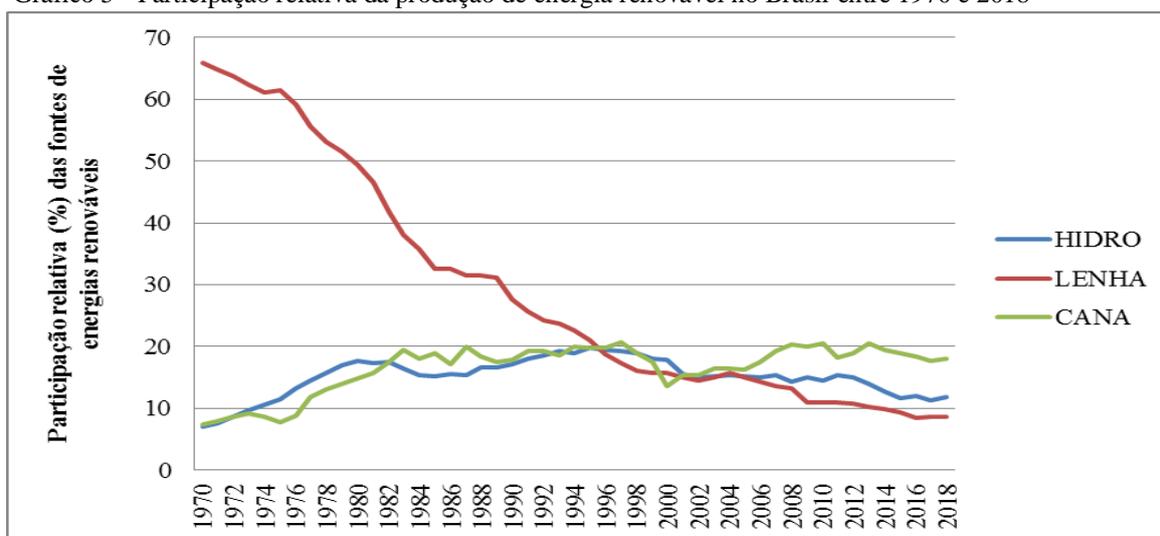


Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

O Gráfico 4 confirma a prevalência da produção de petróleo no período estudado. A evolução do padrão de produção de energia no Brasil dentro do período compreendido por este estudo (1970-2018), com a produção petrolífera se destacando entre todas as fontes que compõem a matriz de energia no Brasil.

A seguir, o Gráfico 5 com a participação relativa das fontes de energias renováveis produzidas no Brasil.

Gráfico 5 - Participação relativa da produção de energia renovável no Brasil entre 1970 e 2018



Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

O Gráfico 5 remete a produção de energia utilizando fontes renováveis. O destaque inicial é para a produção de lenha que no início da série é líder na geração de energia, a principal fonte produtora de energia do país que com o passar dos anos alcança níveis cada vez menores na produção brasileira. Enquanto a produção originária da fonte hidráulica marca uma gradativa evolução devido aos investimentos em construções de usinas com o objetivo de tirar proveito do potencial hidrológico do país. A cana-de-açúcar representa o surgimento de uma energia alternativa, visando a substituição quase que total em relação aos combustíveis fósseis.

Com a participação relativa de cada fonte se obteve as respectivas taxas geométricas de crescimento com o intuito de inferir a cerca da evolução temporal da composição relativa de itens renováveis e não renováveis que compõem a matriz energética entre os anos de 1970 e 2018, que é o primeiro objetivo do trabalho. Na Tabela 1 estão expostas as TGCs obtidas para cada fonte e estatísticas descritivas das variáveis.

Tabela 1 - Médias históricas, Coeficientes de Variação (CV) e Taxas Geométricas de Crescimento (TGC) das participações relativas das fontes energéticas selecionada entre 1970 e 2018

FONTE	R² ajustado	α	TGC (% a.a)	MÉDIA (tep)	CV (%)	MÁXIMO (tep)	MÍNIMO (tep)
PETR _t	0,88	-1,87 (0,00)	2,80% (0,00)	52,76	78,71	135.907	8.154
GASN _t	0,95	-3,62 (0,00)	3,60% (0,00)	12,24	91,40	40.560	1.169
HIDRO _t	0,02	-2,00 (0,00)	0,30% (0,10)	20,57	49,04	36.837	3.422
LENHA _t	0,99	-0,34 (0,00)	-4,60% 0,00	27,77	13,80	33.340	21.261
CANA _t	0,46	-2,18 (0,00)	1,40% (0,00)	24,31	63,26	50.895	3.601

Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

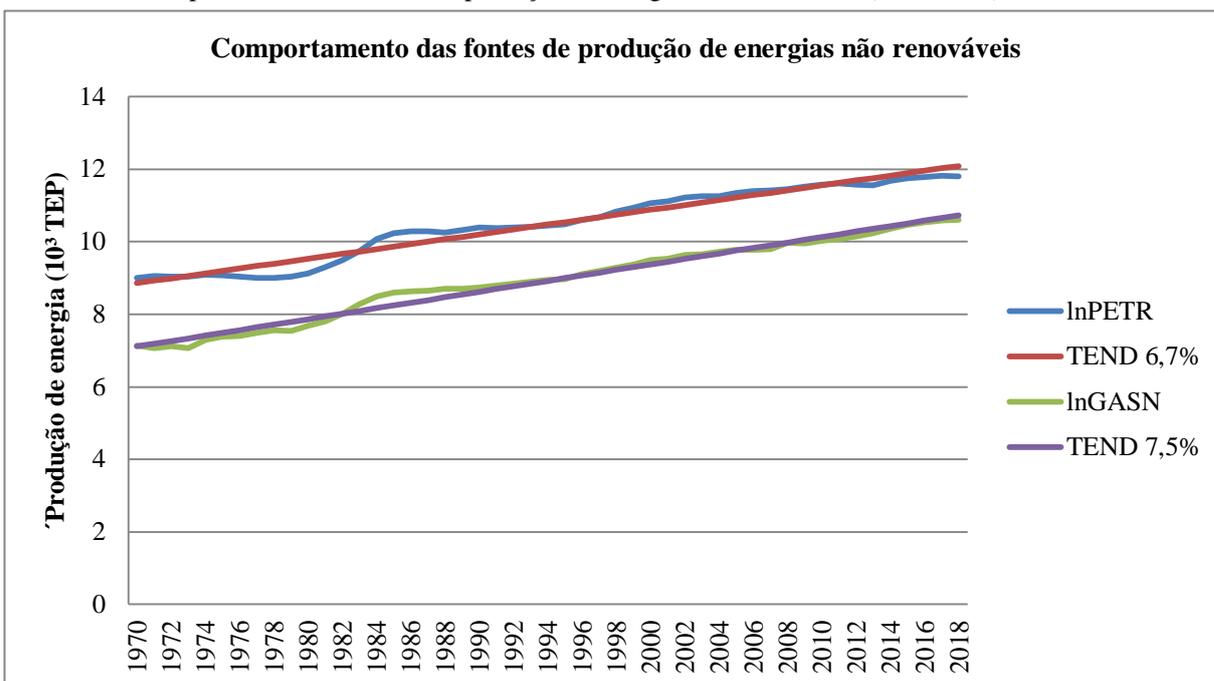
Todas as TGCs e os coeficientes linear (α) contidas na Tabela 1 se apresentaram significantes diferentes de zero em ao menos 1% de probabilidade de erro. A maior taxa geométrica de crescimento foi para o gás natural, 3,6% ao ano, também foi o maior coeficiente de variação, o que demonstra grande dispersão dos dados em torno da média e baixa homogeneidade na série, isto significa um incremento significativo por parte do gás natural no cenário de produção de energia. A substituição da lenha corroborou com uma TGC negativa, -4,6% a.a. O constante uso da energia hidráulica desde os anos de 1970 também ficou evidenciado na TGC de 0,3% a.a, isto significa que este insumo energético foi usado quase que de forma linear na produção de energia brasileira. Petróleo e cana-de-açúcar que

são substitutos principalmente na combustão de veículos, apresentaram TGCs positivas e CVs altos devido a crises e programas energéticos ocorridos durante o período investigado. Na Tabela 1 também são mostrados as médias, máximos e mínimos dos valores observados nas séries de produção de energia. A maior média foi observada na produção de energia oriunda do petróleo (52,76 tep), enquanto a menor (12,24 tep) para a outra fonte não renovável, o gás natural. Entre os valores máximos e mínimos cabe destacar o etanol, que utiliza a cana como fonte, que se posiciona apenas atrás da produção máxima petrolífera.

Os gráficos a seguir mostram como se comportam as variáveis em torno da tendência de crescimento das produções após a linearização das variáveis. A análise gráfica, como mencionado anteriormente, é um método de verificar como as séries se comportam ao longo do tempo em torno de sua média e variância.

A seguir, o Gráfico 6 com as séries das fontes de energias não renováveis após a linearização.

Gráfico 6 – Comportamento das fontes de produção de energias não renováveis (1970-2018)



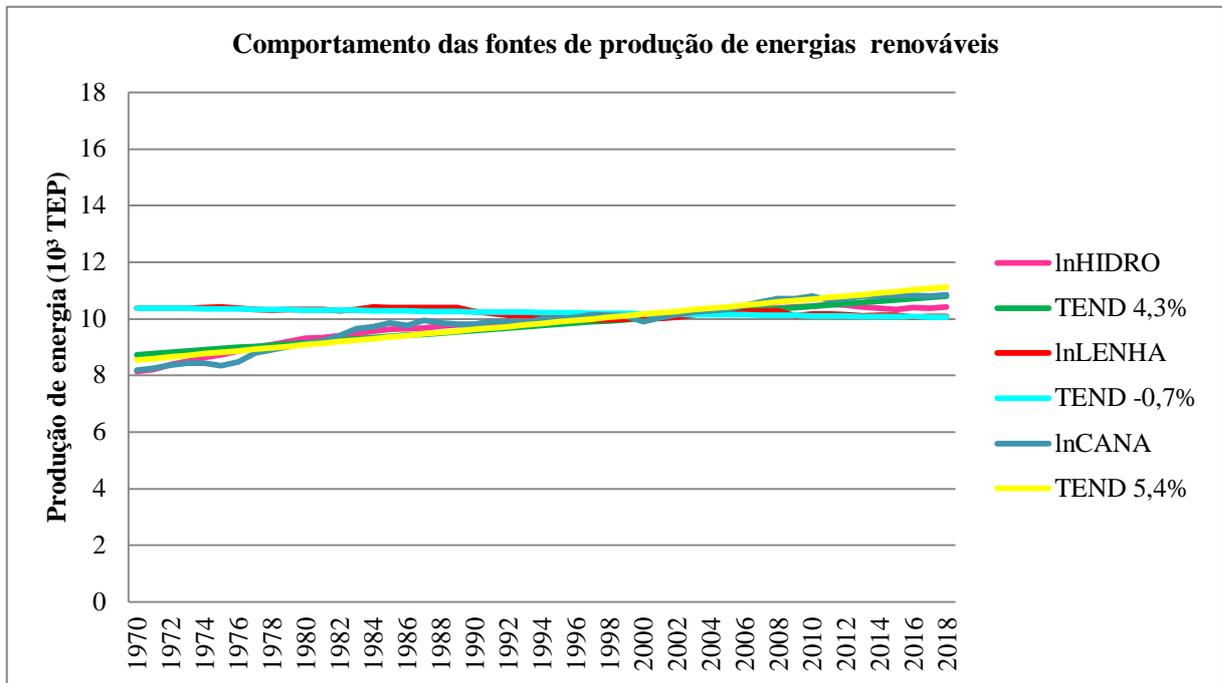
Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

De acordo com a análise do Gráfico 6, há indícios de que as séries temporais de energias não renováveis, petróleo e gás natural, não possuem média constante ao longo do período de estudo. Percebe-se uma variação em torno da TGC das respectivas fontes.

No Gráfico 7, as variáveis de produção de energia também foram analisadas a partir da tendência de crescimento de cada fonte. As séries das fontes também se comportam

irregularmente em torno de sua média, ou seja, um forte indício de raiz unitária nas séries de energias renováveis.

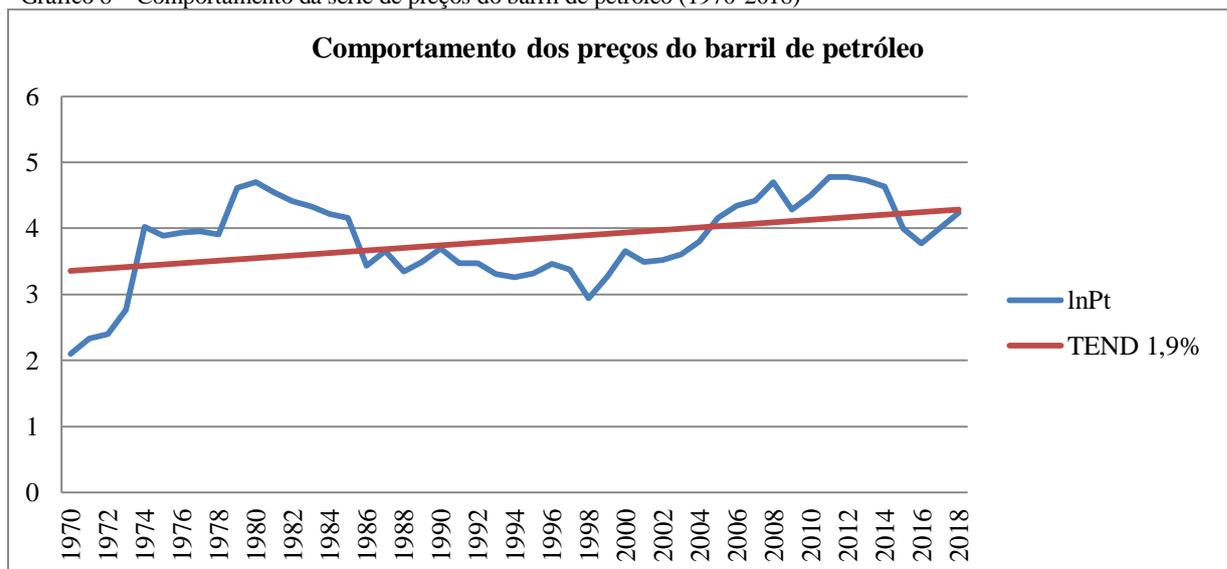
Gráfico 7 – Comportamento das fontes de produção de energias renováveis (1970-2018)



Fonte: Elaborado a partir dos dados do Balanço Energético 2018 (EPE, 2018a).

A próxima análise gráfica, Gráfico 8, é para a variável independente deste estudo, os preços internacionais do barril de petróleo.

Gráfico 8 – Comportamento da série de preços do barril de petróleo (1970-2018)



Fonte: Elaborado a partir dos dados da IEA (2018).

A série de preços do barril de petróleo foi a que se mostrou mais irregular em torno da tendência anual de crescimento, portanto fortes indícios de raiz unitária nesta série temporal.

4.3 Estimação e identificação de modelos ARIMA

Conforme o segundo objetivo do trabalho, que é estimar e identificar modelos para fazer previsões das fontes de energia selecionadas, foi utilizado o modelo ARIMA para estimar a produção de energia devido a esse modelo apresentar versatilidade na análise de dados em séries temporais. Para estimação e verificação da melhor modelagem dos modelos ARIMA, foram realizados procedimentos indicados pela literatura.

As variáveis utilizadas no trabalho foram postas em logaritmo natural seguindo as recomendações bibliográfica que estabelecem que sejam feitos ajustes nas séries para auxiliar na retirada de raízes unitárias (MAKRIDAKIS *et al.*, 1998) (De LURGIO, 1998).

4.3.1 Testes de raiz unitária

Os gráficos referentes às séries originais de produção de energia e preços do barril de petróleo permitiram analisar o comportamento das séries temporais. Entretanto a análise gráfica de verificação de estacionaridade não é comprobatória, por esta razão buscou-se corroborar a existência da sazonalidade das séries e consequentemente, as não estacionaridades. Para investigação da estacionaridade, que é parte do processo de identificação do melhor modelo, foram feitos dois testes de raiz unitária, ADF e KPSS.

Na Tabela 2, encontram-se os dois testes realizados para verificar se há ou não raiz unitária nas séries. Pelo teste ADF, a maioria das variáveis mostraram não significância estatística quando estão em nível (p-valor acima de 0,05). Com exceção da energia hidroelétrica que se mostrou estacionária em nível com intercepto e os preços do petróleo que possuem raiz unitária em nível com intercepto, todos com significância de 5%. Portanto, de acordo com o teste de Dickey e Fuller Aumentado (ADF), as fontes de energia selecionadas e os preços do barril de petróleo são estacionários em primeira diferença a um nível de significância de 5%. Destaque também para a série de preços do barril de petróleo que se mostrou estacionária em nível com intercepto.

De acordo com o teste de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), que ao contrário do teste ADF, diz que, caso hipótese nula seja aceita, isto significa que a série é estacionária e não há raiz unitária, mostrou que a maior parte das variáveis são estacionárias apenas em primeira diferença tanto com intercepto quanto com intercepto e tendência.

A seguir, na Tabela 2, mostram-se os testes realizados para verificar as estacionariedades das séries. As variáveis estão apresentadas nos seus valores em logaritmos naturais e em suas respectivas primeiras diferenças.

Quando em primeira diferença, as variáveis são discriminadas inicialmente com a letra d. Mediante os testes, se comprovou que as fontes selecionadas de produção de energia são estacionárias em primeira diferença. Isto significou que no decorrer do trabalho os dados estimados se deram com no mínimo uma diferenciação.

Tabela 2 - Testes ADF e KPSS de raiz unitária

	ADF			KPSS	
	Intercepto	Tendência e Intercepto	Nenhum	Intercepto	Tendência e Intercepto
$\ln\text{PETR}_t$	-0,99 ^{NS}	-2,81 ^{NS}	1,59 ^{NS}	0,89 (0,46)	0,11 (0,14)
$d\ln\text{PETRO}_t$	-2,94*	-2,93 ^{NS}	-2,34*	0,08 (0,46)	0,07 (0,14)
$\ln\text{GASN}_t$	-1,18 ^{NS}	-2,54 ^{NS}	3,95 ^{NS}	0,91 (0,46)	0,15 (0,14)
$d\ln\text{GASN}_t$	-5,69*	-5,70*	1,78 ^{NS}	0,07 (0,46)	0,05 (0,14)
$\ln\text{HIDRO}_t$	-6,82*	-2,54 ^{NS}	5,44 ^{NS}	0,85 (0,46)	0,22 (0,14)
$d\ln\text{HIDRO}_t$	-4,05*	-6,21*	-2,22*	0,69 (0,46)	0,14 (0,14)
$\ln\text{LENHA}_t$	-1,29 ^{NS}	-1,70 ^{NS}	-0,80 ^{NS}	0,55 (0,46)	0,09 (0,14)
$d\ln\text{LENHA}_t$	-5,92*	-5,85*	-5,91*	0,07 (0,46)	0,07 (0,14)
$\ln\text{CANA}_t$	-2,16 ^{NS}	-1,50 ^{NS}	3,74 ^{NS}	0,85 (0,46)	0,16 (0,14)
$d\ln\text{CANA}_t$	-5,96*	-6,28*	-3,11*	0,34 (0,46)	0,06 (0,14)
$\ln\text{PREC}_t$	-2,86*	-2,61 ^{NS}	0,51 ^{NS}	0,26 (0,46)	0,09 (0,14)
$d\ln\text{PREC}_t$	-6,40*	-6,43*	-6,37*	0,18 (0,46)	0,12 (0,14)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Nota: * Significativo ao nível de 5%; NS: Não significativo; valores em parênteses representam a significância estatística.

4.3.2 Estimação do modelos

Como mostrado anteriormente nos testes de estacionaridade, foi necessário diferenciar as séries originais de produção de energia para que as séries apresentassem oscilação em torno da média e uma variância aproximadamente constante. Deste modo a diferenciação suficiente foi de d igual a 1 na maioria das séries e d igual a 2 para a fonte lenha, o que implica em não empregar os modelos ARMA nas estimações das séries.

Dentre os modelos disponíveis, foram selecionados quatro possíveis melhores modelos para cada série das produções de cada fonte de energia. A Tabela 3 descreve a análise feita por intermédio dos critérios AIC, SIGMA² e SBIC na escolha dos modelos. O modelo que apresentou os menores valores em cada critério é o modelo a ser estimado na metodologia de Box e Jenkins.

Tabela 3 - Principais modelos ajustado para as fontes de energia selecionadas

FONTES	ARIMA (1,1,1)			ARIMA (1,1,0)			ARIMA (2,1,0)			ARIMA (2,2,0)		
	AIC	SIGMA ²	SBIC									
lnPETR	-2,75*	0,003*	-2,6*	-2,78*	0,003*	-2,66*	-2,36*	0,004*	-2,24*	-2,61 ^{NS}	0,003 ^{NS}	-2,49 ^{NS}
lnGASN	-2,34*	0,004*	-2,23*	-2,24*	0,005*	-2,16*	-2,24*	0,005*	-2,16*	-2,05 ^{NS}	0,006 ^{NS}	-1,97 ^{NS}
lnHIDR	-3,22*	0,001*	-3,10*	-2,98*	0,002	-2,90*	-3,02*	0,002*	-2,94*	-2,84 ^{NS}	0,003 ^{NS}	-2,77 ^{NS}
lnLENHA	-3,03 ^{NS}	0,002 ^{NS}	-2,92 ^{NS}	-3,07 ^{NS}	0,002 ^{NS}	-2,99 ^{NS}	-3,05 ^{NS}	0,002 ^{NS}	-2,98 ^{NS}	-2,49*	0,004*	-2,41*
lnCANA	-1,68*	0,009*	-1,56*	-1,61*	0,01*	-1,53*	-1,59*	0,01*	-1,52*	-1,19 ^{NS}	0,01 ^{NS}	-1,12 ^{NS}

* Significativo ao nível de 5%; NS: Não significativo.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Alguns modelos mostraram coeficientes não significantes sob o ponto de vista estatístico (p -valor $> 0,05$). O modelo ARIMA (2,2,0) não foi significativo para todas as fontes, com exceção da lenha que se mostrou significativa apenas com este modelo. Nesta série foi necessário fazer duas diferenciações devido ao comportamento desta fonte ao longo do período estudado. A produção de energia oriunda da lenha apresentou significantes reduções no passar dos anos, a tendência decrescente da fonte é a causa da necessidade de aplicação de duas diferenças para alcançar significância estatística no modelo. A única fonte que apresentou em seu modelo uma constante significativa foi a produção de petróleo como o modelo ARIMA (1,1,0) com a série diferenciada uma vez. A produção de gás natural e hidroelétrica e cana-de-açúcar mostraram melhor desempenho nos critérios no modelo ARIMA(1,1,1) sem constante, além de obterem coeficientes significativos e precisarem de apenas uma diferenciação.

A Tabela 4 expõe os resultados obtidos com os ajustamentos dos modelos para cada variável, que foram feitos para estimar as previsões de produção de cada fonte energética sem levar em consideração a variável exógena, preços internacionais do barril de petróleo. Desta forma é alcançado o segundo objetivo do trabalho de estimar modelos de previsão para cada fonte de energia selecionada da Matriz Energética Brasileira entre os anos de 1970 e 2018.

Tabela 4 - Modelos ajustados para previsão das fontes de energias selecionadas

Coeficientes Estimados	Variável Dependente (Modelo Ajustado)				
	lnPETR _t ARIMA(1,1, 0)	lnGASN _t ARIMA(1,1,1)	lnHIDRO _t ARIMA(1,1,1)	lnLENHA _t ARIMA(2,2,0)	lnCANA _t ARIMA(1,1,1)
Constante	0,055*	SEM CONSTANTE	SEM CONSTANTE	SEM CONSTANTE	SEM CONSTANTE
AR(1)	0,654*	0,913*	0,996*	-0,586*	0,974*
AR(2)	-	-	-	-0,345*	-
MA(1)	-	0,536*	0,727*	-	0,855*
R ² Ajustado	0,997	0,996	0,994	0,835	0,984

Continua

Coeficientes Estimados	Variável Dependente (Modelo Ajustado)				
	lnPETRt ARIMA(1,1,0)	lnGASNt ARIMA(1,1,1)	lnHIDROt ARIMA(1,1,1)	lnLENHAt ARIMA(2,2,0)	lnCANAt ARIMA(1,1,1)
R ² Estacionário	0,43	-0,07	0,27	0,29	-0,05
Ljung-Box	13,89	17,644	22,117	13,132	15,596
RMSE	0,057	0,072	0,047	0,057	0,1
MAPE	0,429	0,60	0,348	0,425	0,795

*Significativo ao nível de 5%.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

4.3.2.1 Modelos de previsões para energias não renováveis

A fonte de produção de energia petróleo com modelo escolhido ARIMA (1,1,0), exposto na Tabela 5, apresentou teste de Ljung-Box significância 0,675, o que comprova que os ruídos da série não se constituem em passeios aleatórios, mas sim ruídos brancos. A constante e o AR(1) do modelo foram estatisticamente significantes, concluindo que o modelo autorregressivo é característico da fonte petróleo. Destaca-se também o RMSE que mostrou alta precisão entre os valores observados e os valores previstos e MAPE de 0,42% de erro no ajuste. O R² ajustado apresentou alto poder de explicação do modelo.

Ainda na Tabela 5, a fonte gás natural obteve via critérios o modelo ARIMA(1,1,1) sem constante, isso significou que essa variável foi regredida com seus próprios valores defasados (AR) e modelou o termo do erro por meio de uma combinação linear de termos de erros contemporâneos e passados. A significância de 0,34 no teste de Ljung-Box mostrou que a hipótese aceita é a hipótese nula de que os resíduos não são autocorrelacionados, portanto os erros são considerados ruídos brancos. As medidas de acurácia dos modelos e dos valores previstos, RMSE e MAPE, apresentaram baixas estimativas, com MAPE mostrando 0,60% de possibilidade do ajuste está errado e 0,072 no RMSE. Mesmo significativo o R² estacionário se mostrou negativo, contudo o R² ajustado mostrou alto poder de explicação do modelo.

4.3.2.2 Modelos de previsões para energias renováveis

Para fonte HIDRO, o melhor modelo ajustando de acordo com a Tabela 5, também ocorreu com o modelo ARIMA(1,1,1) sem constante, com significância de 0,13 no teste Q, comprovando que a série não é um passeio aleatório e sim que os resíduos são ruídos brancos, ou seja, não há correlação nos resíduos. Com este modelo, as medidas desempenho MAPE,

RSME foram consideradas quase nulas o que comprova a consistência e acurácia do modelo, e bom ajuste de modelo com o R^2 ajustado.

O mesmo modelo também foi selecionado para a fonte CANA. Neste caso, a significância estatística apenas se manifesta em valores de qui-quadrado acima de 0,48. Portanto, também se rejeita hipótese de que os ruídos não são aleatórios. O modelo também apresentou baixos valores no MAPE e RSME, o que significa alta precisão no modelo escolhido. Mesmo com um R^2 estacionário negativo, o R^2 ajustado apresentou 98,4% de variação total das observações explicadas pelo modelo escolhido.

Por último, a fonte LENHA foi a única série que precisou ser explicada por intermédio de duas observações passadas e duas defasagens no modelo, ARIMA(2,2,0) (Tabela 5). Este modelo apresentou p-valor de 0,66 no teste de Ljung-Box, assim seus resíduos são ruídos brancos. As estimativas de precisão do modelo escolhido foram consideradas nulo, o que permiti concluir que este modelo é o melhor para esta fonte. O modelo apresentou R^2 estacionário de 0,29 e 0,835 no R^2 ajustado.

4.3.3 Verificação da capacidade de predição dos modelos estimados

Feitos os melhores ajustes, a etapa seguinte é a verificação do modelo por meio dos correlogramas FAC e FACP dos resíduos para confirmar que os resíduos gerados são ruídos brancos. A seguir, a Figura 2 do correlograma do modelo escolhido para a fonte petróleo.

Figura 2 - Correlogramas residuais do modelo ARIMA(1,1,0) da fonte petróleo.

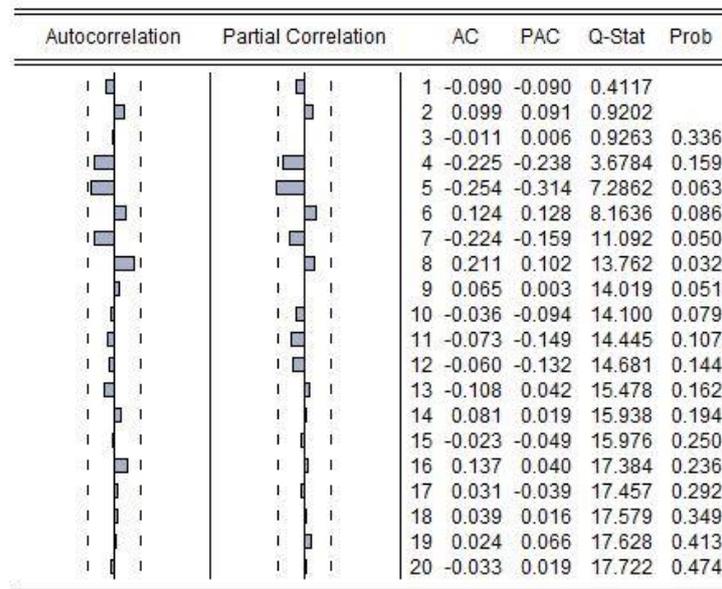
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.100	0.100	0.5077	
		2	-0.011	-0.021	0.5135	0.474
		3	0.002	0.005	0.5137	0.773
		4	-0.091	-0.093	0.9626	0.810
		5	-0.097	-0.080	1.4881	0.829
		6	-0.030	-0.017	1.5411	0.908
		7	-0.192	-0.194	3.6915	0.718
		8	-0.188	-0.171	5.8063	0.563
		9	0.005	0.006	5.8076	0.669
		10	-0.027	-0.057	5.8551	0.754
		11	-0.132	-0.185	6.9857	0.727
		12	0.028	-0.029	7.0396	0.796
		13	-0.018	-0.082	7.0612	0.854
		14	0.042	-0.020	7.1849	0.892
		15	0.141	0.026	8.6351	0.854
		16	0.230	0.175	12.587	0.634
		17	-0.074	-0.136	13.008	0.672
		18	0.101	0.072	13.828	0.679
		19	-0.020	-0.065	13.861	0.738
		20	-0.106	-0.064	14.818	0.734

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Para comprovar que os resíduos gerados da série de produção de petróleo são aleatório e verificar o melhor modelo para esta série, percebeu-se na Figura 2 o rápido declínio ao longo das *lags* (posição), outro fator relevante é o Q teste (Ljung-Box) que cresce com o passar das posições com insignificância estatística a pelo menos 10% de probabilidade de erro.

Semelhantemente, ocorre na Figura 3, as FAC e FACP do modelo ARIMA(1,1,1) para a produção de gás natural diminui significativamente para zero, tendendo para zero, mesmo que em algumas *lags* retorne o crescimento. O teste Q, novamente apresenta valores progressivos e não significantes, mostrando que a série gera ruídos brancos.

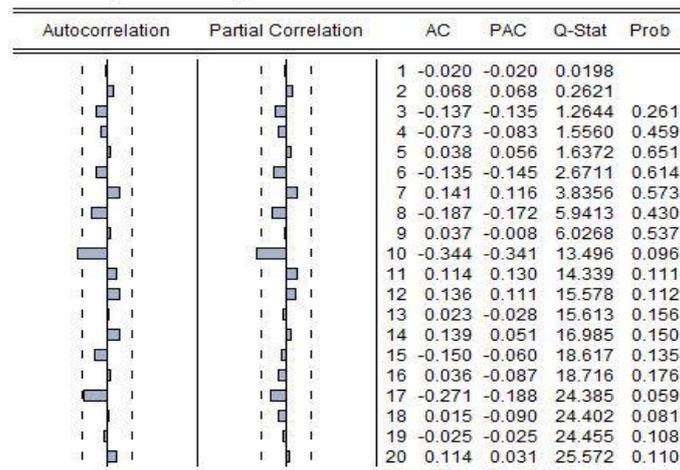
Figura 3 - Correlograma residual do modelo ARIMA(1,1,1) da fonte gás natural.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Na Figura 4 é mostrado o comportamento da fonte hidroelétrica nas FAC e FACP.

Figura 4 - Correlograma residual do modelo ARIMA(1,1,1) da fonte hidroelétrica

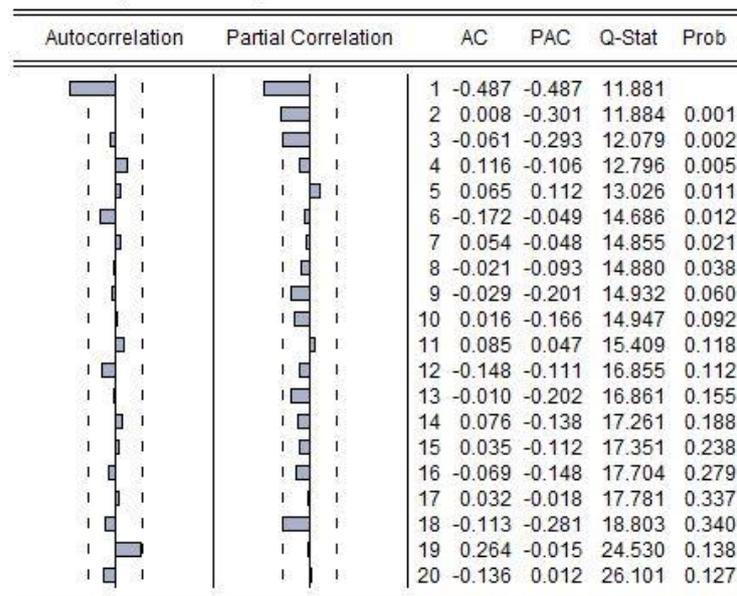


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

As FAC e FACP do modelo ARIMA (1,1,1) da produção de energia em hidroelétrica demonstram um decaimento sem um padrão o que permitiu concluir se os resíduos gerados são aleatórios com uma defasagem e pelo teste Q, ausência de autocorrelação serial a 5% de significância, além de verificar o melhor modelo a ser estimado para a série.

Na Figura 5 encontra-se o correlograma com FAC e FACP, respectivamente.

Figura 5 - Correlograma residual do modelo ARIMA(2,2,0) da fonte lenha.

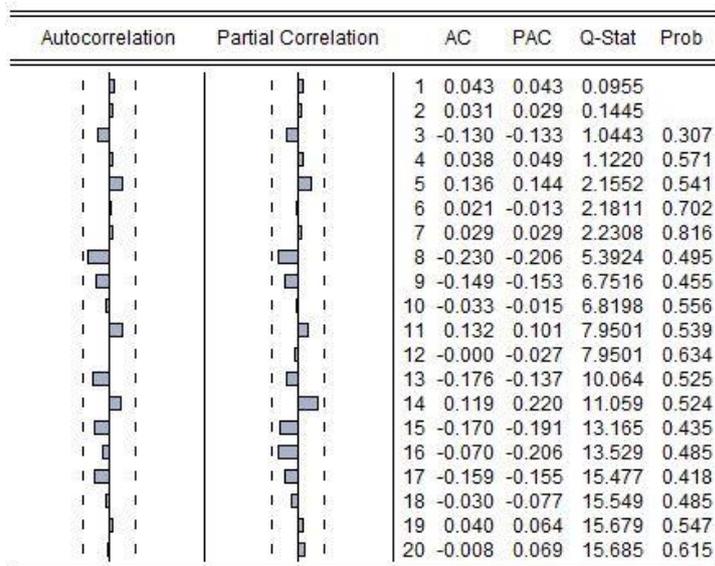


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

O modelo ARIMA(2,2,0), assim como os modelos anteriores, mostrou ser o mais adequado, com duas defasagens para alcançar a estacionariedade e sem autocorrelação serial.

Por último, a Figura 6 com a demonstração da FAC e FACP para o modelo escolhido da fonte cana-de-açúcar como principal fonte geradora do etanol.

Figura 6 - Correlograma residual do modelo ARIMA(1,1,1) da fonte cana.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Conforme a Figura 6 é possível identificar que os resíduos se mostraram não correlacionados por estarem dentro dos limites de confiabilidade. Ademais os resíduos possuem média zero e variância constante, portanto são ruídos brancos. Destaque também para o decaimento ao longo das *lags* sem apresentar um padrão definido.

4.4 Previsões

Conforme estabelecido no terceiro objetivo, que é avaliar possíveis impactos do preço do barril de petróleo nos modelos de previsão de cada fonte de energia, foram testadas duas possibilidades para aferir se os preços impactaram as previsões da produção futura das fontes selecionadas. Primeiro foi verificado se os preços influenciam a produção via ruídos brancos, conforme explicitados nas equações (2a), (35) e (36). Neste caso, os resultados não se mostraram significativos em níveis toleráveis de erro. Deste modo, não se pode inferir quaisquer conclusões a cerca da influência dos preços do barril de petróleo sobre a produção energética brasileira por meio dos ruídos gerados de cada modelo.

Em seguida, foi testado se a influência do preço do barril de petróleo se dá diretamente na previsão da produção obtidas através dos modelos gerados, isto é, a distância entre valor esperado da produção e o valor observado ao longo do tempo é verificada de forma linear com a produção de energia em função dos preços como mostrado anteriormente na Equação (37). A Tabela 5 detalha os resultados derivados desta hipótese.

Tabela 5 - Dependência linear dos valores previstos da produção em relação aos preços do barril de petróleo

Coeficientes Estimados	Variável Dependente (valores previsto da produção)				
	lnPETRt ARIMA(1,1,0)	lnGASNt ARIMA(1,1,1)	lnHIDROT ARIMA(1,1,1)	lnLENHAt ARIMA(2,2,0)	lnCANAt ARIMA(1,1,1)
Coefficiente Linear	26172,25*	-1649,14 ^{NS}	12200,79*	27938,65*	13264,21*
Coefficiente angular	500,04*	330,78*	180,75*	-15,30 ^{NS}	207,34*
R ² Ajustado	0,13	0,38	0,32	0,02	0,15

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Nota: * Significativo ao nível de 5%; NS: Não significativo.

Observa-se que todos os coeficientes angulares, com exceção do estimado para a previsão da produção de lenha, são significativos ao menos ao nível de 5%. Este estudo constata a influência dos preços internacionais do barril de petróleo sobre a produção das principais fontes energéticas produzidas no Brasil. Com esta conclusão foi possível elaborar a previsão da produção energética brasileira para os anos de 2019-2030.

4.4.1 Previsões da produção de energia

Após verificar a relação entre os valores previstos nos modelos de previsão das fontes de energia em relação aos preços dados do barril de petróleo (exceção da produção de lenha), foram estabelecidas previsões da produção para os anos de 2019 a 2030 a partir da divisão da série de preços em cenários e, assim, foi alcançado o quarto objetivo do trabalho. Vale ressaltar que apesar do trabalho estar sendo concluído no começo do ano de 2020, não se dispõe ainda das produções das fontes de energias não renováveis e renováveis para o ano de 2019. A previsão é que esses resultados apenas sejam publicados em meados do ano de 2020. Sendo assim, a previsão que foi feita neste trabalho para o ano de 2019 poderá ser comparada com o verdadeiro valor observado em 2019 quando essa informação estiver disponível. Essa comparação servirá inclusive para mostrar se os valores previstos na pesquisa se aproximaram dos valores observados. Este será um teste de qualidade das evidências encontradas neste estudo.

Nos tópicos a seguir serão mostrados os valores projetados nesta pesquisa das quantidades prováveis que serão produzidas das fontes de energia não renováveis e renováveis para os anos de 2029 e 2030.

4.4.1.1 Projeções para a produção de lenha 2019-2030

Como demonstrado anteriormente, apenas a previsão de lenha como fonte de energia não mostrou, sob o ponto de vista estatístico, resposta às variações do preço do barril e petróleo. Desta forma, os valores previstos para produção de energia derivada da lenha foi prevista apenas para o modelo ARIMA(2,2,0)

Tabela 6 – Valores previstos para produção de lenha como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030

Ano	Produção prevista (tep)
2019	23807,75
2020	24018,95
2021	24078,28
2022	24037,05
2023	24107,63
2024	24147,48
2025	24166,80

Continua

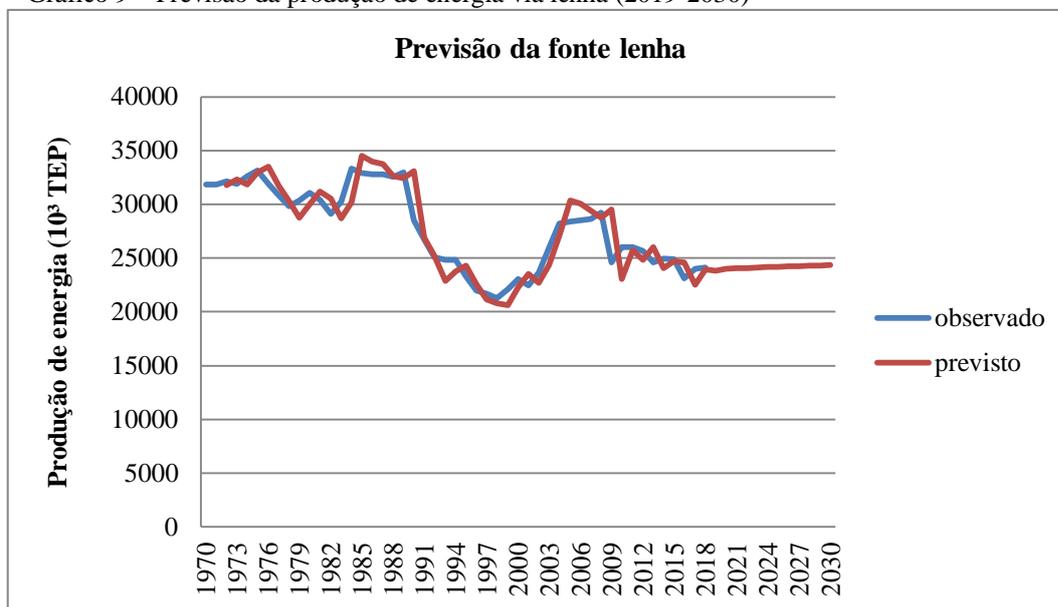
Conclusão

Ano	Produção prevista (tep)
2026	24208,90
2027	24244,83
2028	24276,60
2029	24313,04
2030	24348,27

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

No Gráfico 9 a trajetória da produção de energia da fonte LENHA entre os anos de 1970 a 2030.

Gráfico 9 – Previsão da produção de energia via lenha (2019-2030)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

A seguir, como estabelecidos os cenários no Quadro 2, as previsões que foram feitas para as fontes que se mostraram sensíveis aos preços internacionais do barril de petróleo. Os valores previstos foram gerados para o Brasil como produtor, o que significa aumento da produção de energia caso ocorra aumentos nos preços do barril de petróleo. Caso contrário retração na produção interna de energia. Assim, as previsões estão divididas em cenário otimista, intermediário e pessimista para cada fonte.

4.4.1.2 Projeções para a produção de petróleo (2019-2030)

Como visto anteriormente, a previsão da produção de petróleo no Brasil é afetada diretamente pelos preços dados internacionalmente do barril de petróleo. A seguir, na Tabela

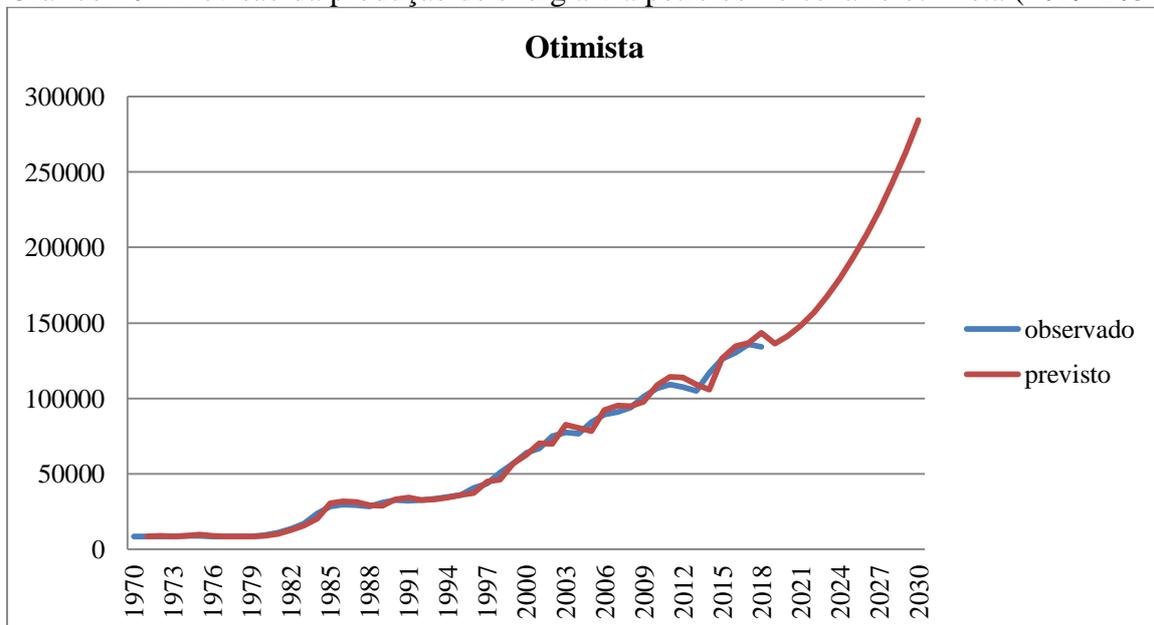
7 e nos Gráficos 10, 11 e 12 são mostrados como se comporta a produção de energia via petróleo com aumento e baixa nos preços, além da previsão quando os preços estão em níveis considerados aqui intermediários.

Tabela 7 – Valores previstos para produção de petróleo como fonte não renovável de energia para o período 2019- 2030

Cenários fonte Petróleo			
Ano	Otimista	Intermediário	Pessimista
2019	136262,53	13516,78	133987,64
2020	141275,63	138480,15	136615,53
2021	148228,29	143822,26	141071,75
2022	157076,11	151051,53	147125,85
2023	167513,72	159485,08	154310,85
2024	179559,94	169195,95	162526,11
2025	192968,18	180019,64	171633,16
2026	208054,03	192007,94	181660,79
2027	224540,52	205231,28	192512,5
2028	242699,37	219573,42	204282,87
2029	262731,06	235461,81	217604,52
2030	284526,85	252589,87	231898,29

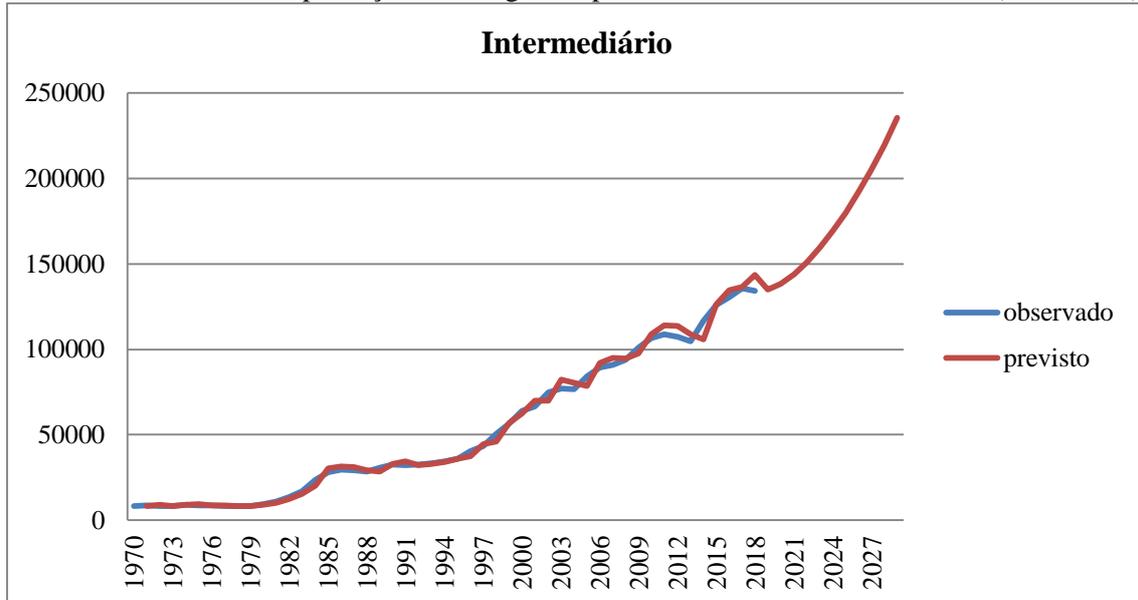
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 10 - Previsão da produção de energia via petróleo no cenário otimista (2019-2030).



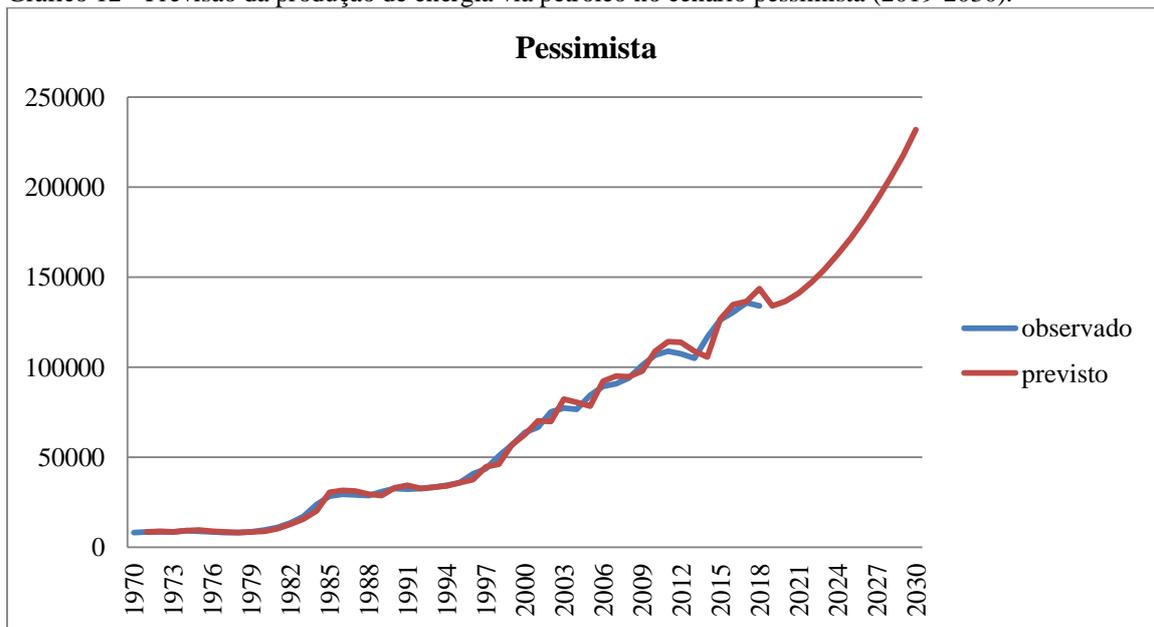
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 11 - Previsão da produção de energia via petróleo no cenário intermediário (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 12 - Previsão da produção de energia via petróleo no cenário pessimista (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

A previsão mostra que a produção de energia utilizando o petróleo como fonte a partir do ano 2019 aumentará de forma exponencial caso os preços do barril de petróleo se encontrem em patamares elevados, isto é, acima do preço mínimo estabelecido, US\$ 40,00/barril. Caso os preços oscilem em torno do valor mínimo, a partir do cenário intermediário, haverá queda na produção interna e a opção mais rentável será a importação do barril de petróleo.

4.4.1.3 Projeções para a produção de gás natural (2019-2030)

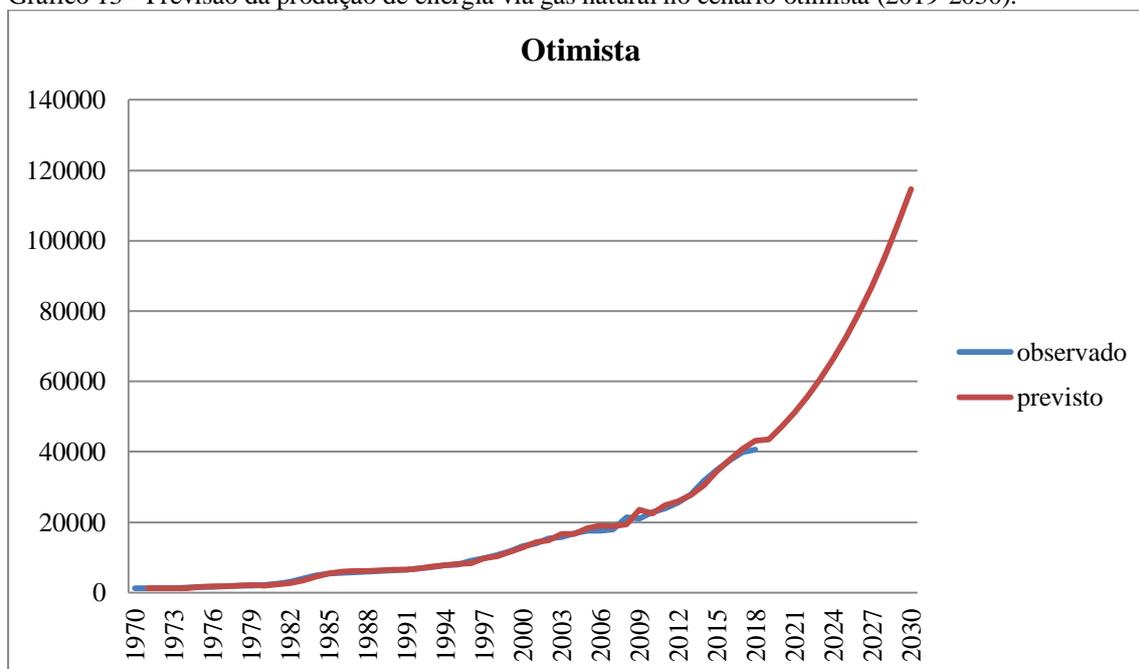
A Tabela 8 e os Gráficos 13 14 e 15 mostram como fica a produção interna de energia utilizando a fonte gás natural.

Tabela 8 – Valores previstos para produção de gás natural como fonte não renovável de energia para o período 2019- 2030

Cenários fonte Gás natural			
Ano	Otimista	Intermediário	Pessimista
2019	43513,91	43217,51	42972,12
2020	47062,85	46368,05	45902,61
2021	51077,86	49943,62	49231,06
2022	55620,73	54025,21	52976,80
2023	60677,16	58499,38	57081,02
2024	66309,09	63439,29	61568,65
2025	72499,84	68847,43	66446,02
2026	79384,21	74781,42	71761,23
2027	86929,4	81302,70	77522,50
2028	95257,03	88416,39	83792,25
2029	104471,61	96290,03	90801,01
2030	114588,5	104872,26	98409,56

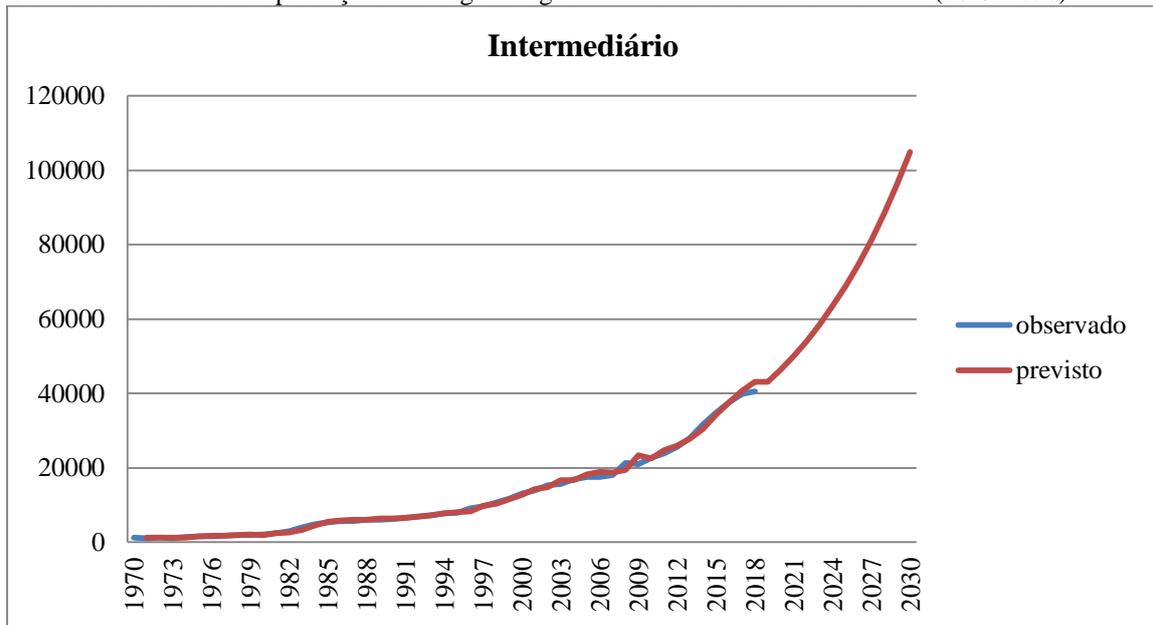
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 13 - Previsão da produção de energia via gás natural no cenário otimista (2019-2030).



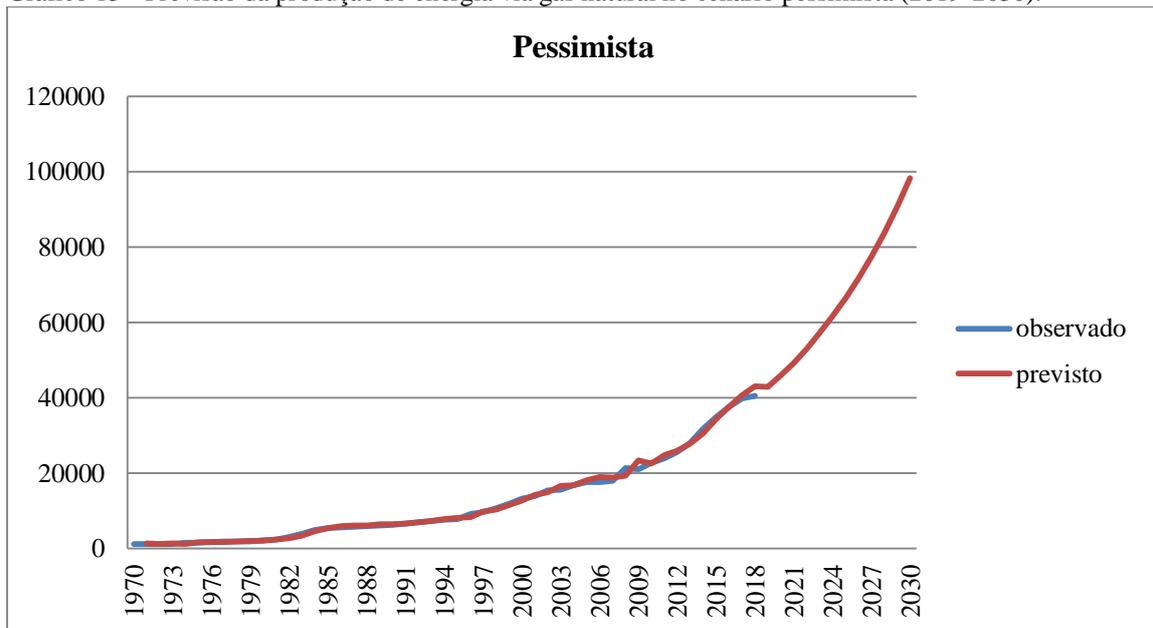
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 14 - Previsão da produção de energia via gás natural no cenário intermediário (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 15 - Previsão da produção de energia via gás natural no cenário pessimista (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Para a produção de energia utilizando o gás natural, o crescimento se dá semelhante à fonte petróleo, com um comportamento exponencial. A produção interna desta fonte de energia cresce quando os preços do barril de petróleo estão altos, um decaimento na produção quando os preços começam a subir e menores produções em caso dos preços do barril estejam próximos ao valor mínimo de rentabilidade estabelecido na pesquisa, a saber US\$ 40,00/barril.

4.4.1.4 Projeções para a produção de hidroelétrica (2019-2030)

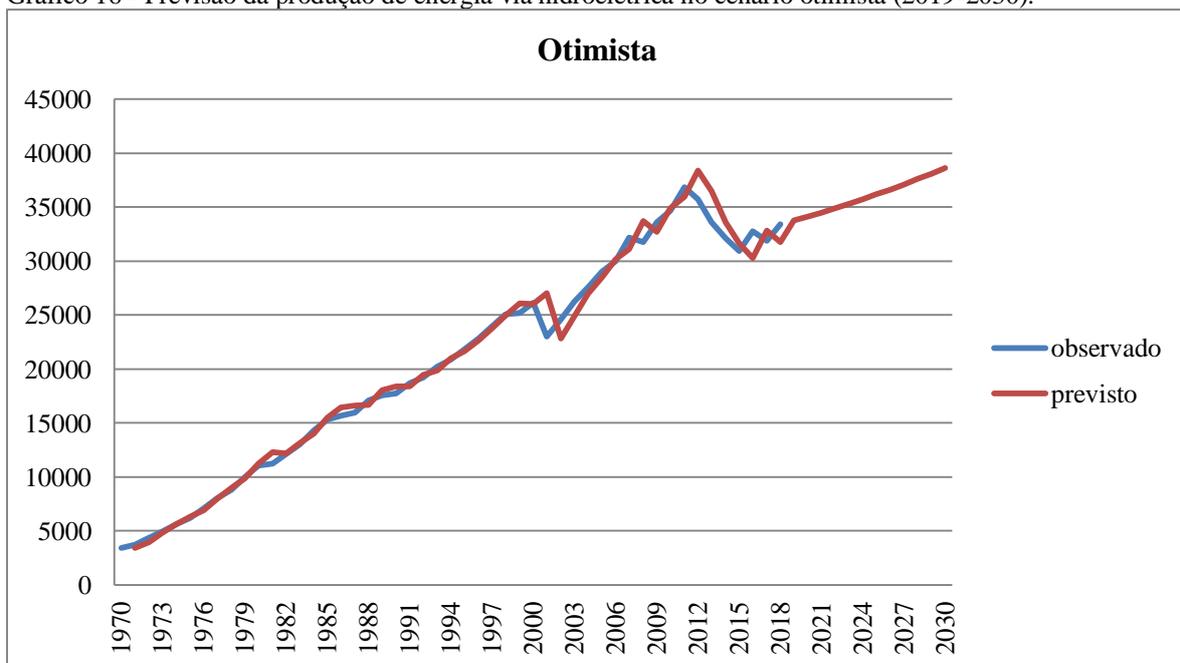
Para fonte de energia HIDRO, os valores previstos estão na Tabela 9 e as trajetórias da previsão nos Gráficos 16, 17 e 18.

Tabela 9 – Valores previstos para produção de hidroelétrica como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030

Cenários fonte Hidroelétrica			
Ano	Otimista	Intermediário	Pessimista
2019	33789,35	33739,06	33697,22
2020	34147,13	34036,63	33961,88
2021	34515,11	34346,61	34239,22
2022	34905,17	34684,47	34536,66
2023	35312,58	35032,42	34845,53
2024	35740,65	35397,69	35167,55
2025	36181,75	35776,44	35500,7
2026	36644,67	36170,75	35847,24
2027	37119,3	36581,91	36204,3
2028	37611,03	37005,14	36574,46
2029	38121,75	37450,22	36974,24
2030	38645,63	37906,56	37384,74

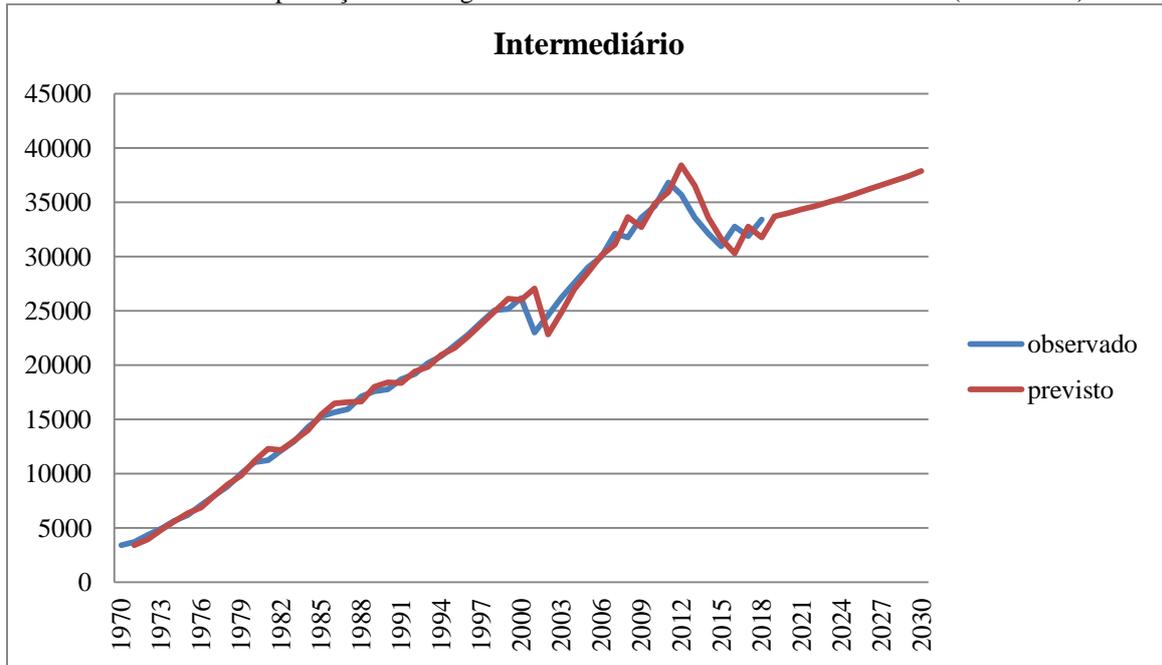
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 16 - Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário otimista (2019-2030).



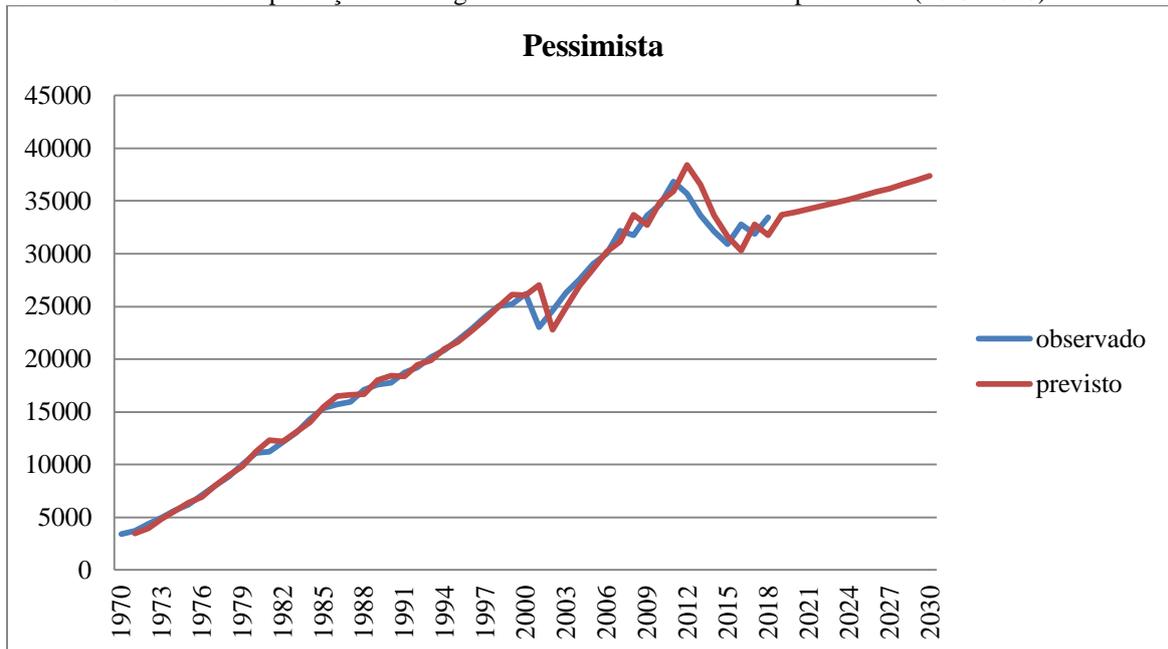
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 17 - Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário intermediário (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 18- Previsão da produção de energia via hidroelétrica no cenário pessimista (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Na previsão da produção de energia hidroelétrica a tendência é de um crescimento linear diferentemente do que acontece na previsão da produção de gás natural. Contudo, preços maiores representam maior produção interna de energia e decaimento da produção interna à medida que os preços do barril diminuem, assim como visto nas fontes anteriores.

4.4.1.5 Projeções para a produção de cana-de-açúcar (2019-2030)

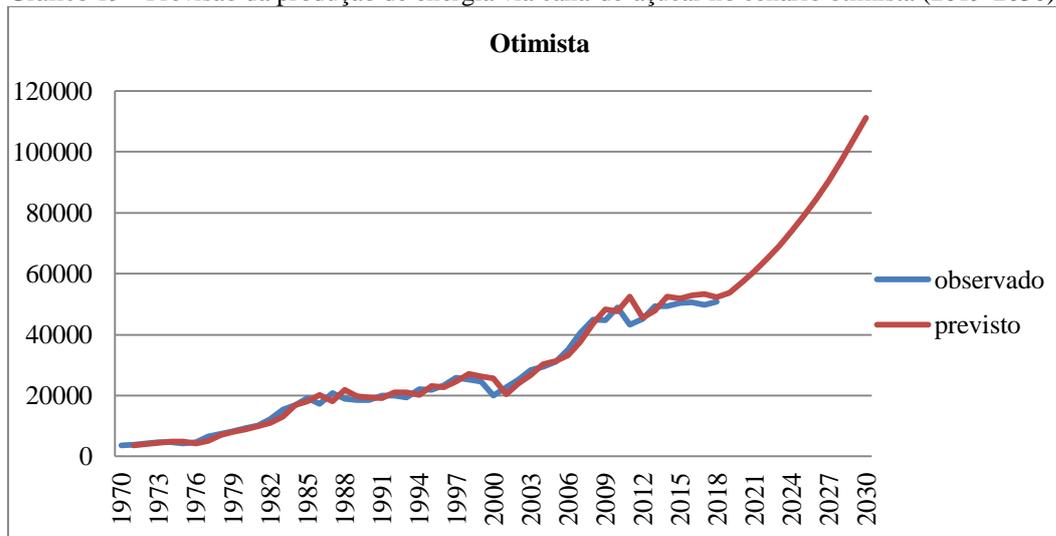
A última previsão é da produção de energia proveniente da cana-de-açúcar que direciona parte da colheita para a produção de etanol no Brasil, na qual se mostrou estatisticamente significativa quando ocorrem mudanças nos níveis de preços do barril de petróleo. A seguir, na Tabela 10 e nos Gráficos 19, 20 e 21 as previsões em cada cenário para a produção utilizando a cana.

Tabela 10 – Valores previstos para produção de cana-de-açúcar como fonte renovável de energia para o período 2019- 2030

Cenários fonte Cana			
Ano	Otimista	Intermediário	Pessimista
2019	53773,44	53498,92	53271,28
2020	57082,97	56450,72	56025,85
2021	60717,1	59704,6	59065,57
2022	64727,51	63332,03	62409,43
2023	69088,93	67223,55	65999,27
2024	73837,86	71431,6	69848,39
2025	78941,58	75944,25	73951,79
2026	84490,01	80794,19	78338,1
2027	90434	86014	83001,37
2028	96846	91589,57	87978,47
2029	103779,1	97631,12	93432,91
2030	111216,6	104076,8	99235,84

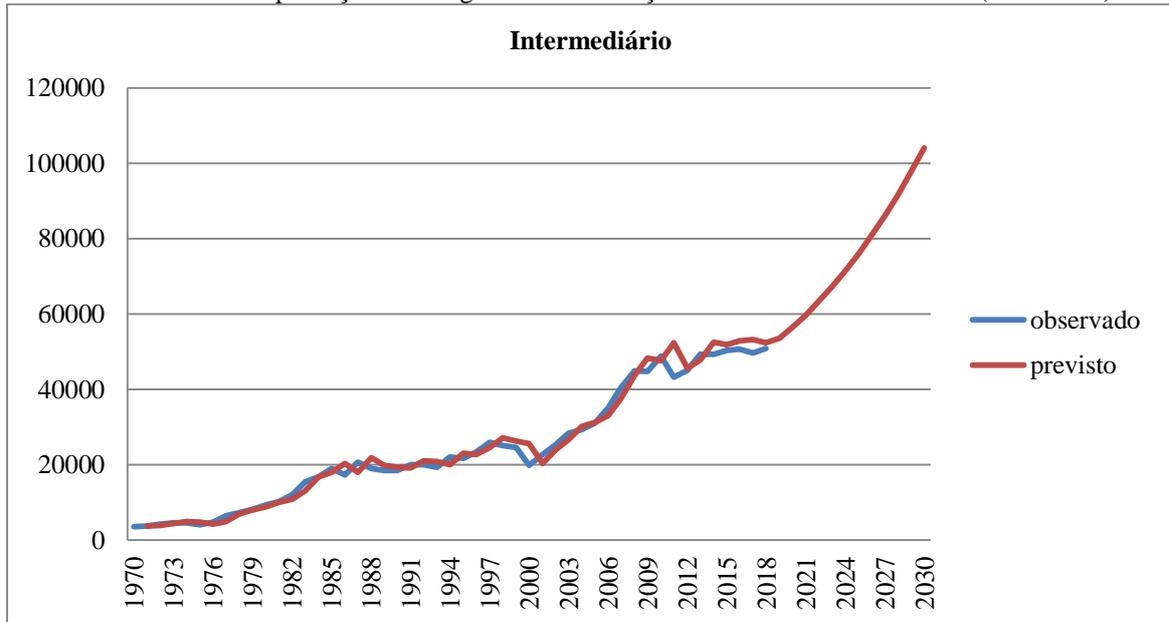
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 19 - Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário otimista (2019-2030).



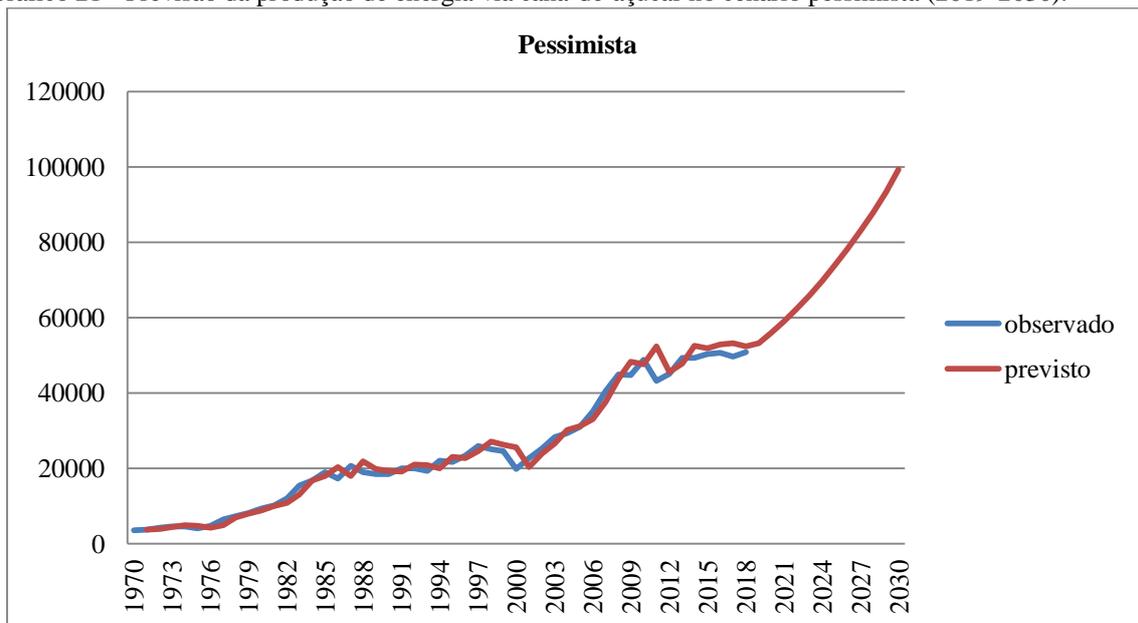
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 20 - Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário intermediário (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

Gráfico 21 - Previsão da produção de energia via cana-de-açúcar no cenário pessimista (2019-2030).



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

A previsão da produção de energia oriunda da cana-de-açúcar se mostrou junto com a fonte petróleo e gás natural uma fonte que cresce exponencialmente a produção quando os preços se mostram altos e decai fortemente a produção em momentos que os preços começam se apresentar em queda, principalmente quando os preços estão em torno do preço US\$ 40,00/barril que é o valor rentável para se iniciar a produção do etanol.

4.4.2 Robustez dos modelos de previsão

Os modelos escolhidos para estimar as previsões de cada fonte energética foram avaliados na capacidade produtiva de previsão. Além de verificar os menores erros de previsões vistos na Tabela 4, também foram estimados os coeficientes de correlação de Pearson entre os valores observados e os valores previstos com interferência dos preços do barril de petróleo na produção. Na Tabela 11 estão contidos os valores da correlação de Pearson, nos quais todos se mostraram estatisticamente diferentes de zero ao nível de 1% de probabilidade de erro.

Tabela 11 - Coeficientes de correlação de Pearson das séries previstas das fontes energéticas

Variáveis	Correlação de Pearson
PETR _t	0,997*
GASN _t	0,998*
HIDRO _t	0,994*
LENHA _t	0,928*
CANA _t	0,989*

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa.

As correlações de Pearson expostas na Tabela 11 mostram que existem elevados níveis de correlação entre as séries originais e as séries previstas. De acordo com os coeficientes de correlação, as previsões geradas para cada fonte energética para os anos de 2019 a 2030 são compatíveis ao longo da trajetória da série original, isto também pôde ser vistos nos gráficos dos cenários expostos anteriormente.

Esses resultados corroboram com as suposições feitas nas hipóteses do trabalho segundo as quais os preços dados do petróleo, que não seguem uma lógica de mercado, influenciam na produção das principais fontes de energia produzidas no Brasil.

Como não é possível prever os preços dados internacionalmente do barril de petróleo, as previsões das variáveis relativas às fontes energéticas foram feitas e deverão ser executadas como base em séries históricas destes preços. Nesta pesquisa foi obtida a média por períodos específicos para a elaboração de cada cenário para verificar a produção de energia interna.

5 CONCLUSÕES

A Matriz Energética Brasileira passou por transformações significativas dentro do período de estudo desta dissertação, 1970-2018. A primeira grande transformação observada aconteceu na transição do uso da lenha na geração de energia para o uso dos derivados do petróleo. Ao longo de toda série essa mudança foi verificada na participação relativa de cada item energético. Outro fator transformador da Matriz Energética Brasileira ocorreu nas crises do petróleo (1973 e 1979), a então forte dependência do Brasil às importações desta fonte de energia. A oferta do barril de petróleo elevou o nível dos preços do barril e despertou a necessidade da busca de fontes alternativas de geração de energia.

A partir das crises do petróleo, foram desenvolvidos programas de incentivos e de criação de energia com fontes renováveis, com destaque para o crescimento do potencial hidroelétrico, o surgimento do uso da biomassa como combustão nos veículos nacionais, além de desenvolver tecnologia para o aproveitamento solar e eólico à geração de energia.

Com todas as transformações ocorridas, a produção de energia no Brasil não apenas manteve o uso de fontes não renováveis, mas também direcionou investimentos nessas fontes energéticas. Conseqüentemente, ocorreram descobertas de reservas de petróleo e gás natural na camada de pré-sal em águas oceânicas nacionais no ano de 2007, isto contribuiu para incrementos das fontes não renováveis na produção interna e acentuou a diferença entre o uso de fontes não renováveis e renováveis na Matriz Energética Brasileira.

Todas essas tendências e modificações corroboram com as taxas geométricas de crescimento de cada fonte selecionada; com as energias não renováveis apresentando elevadas taxas de crescimento, e a lenha passando a ter menor relevância e em franca decadência como mostradas nas taxas negativas de crescimento.

Diante deste cenário de evolução da matriz energética, um dos principais objetivos desta Dissertação se destinou a criar modelos de previsões da produção interna de energia que sejam capazes de orientar e alertar um possível cenário energético futuro.

As variáveis selecionadas neste trabalho foram as produções das principais fontes energéticas, isto é, aquelas que se apresentaram estatisticamente significantes, e a variável preço do barril de petróleo considerada exógena e determinante para a produção interna de energia.

Os resultados encontrados mostraram que todas as séries temporais das produções das cinco fontes de energia utilizadas (petróleo, gás natural, cana-de-açúcar, hidroelétrica e lenha) se mostraram estacionárias em primeira diferença. A escolha do melhor modelo de previsão

de Box e Jenkins foi realizada utilizando critérios determinados pela literatura econométrica. Três modelos ARIMA foram eleitos para estimação de cada fonte energética, ARIMA(1,1,1), ARIMA(2,2,0) e ARIMA(1,1,0). Em seguida, verificou-se que todas as fontes energéticas selecionadas, com exceção da lenha, apresentaram sensibilidade em sua produção quando se incluía diretamente os preços do barril de petróleo, corroborando com a hipótese levantada pelo trabalho segundo a qual as oscilações imprevisíveis nos preços do barril comprometem a produção interna das principais fontes de energia.

Escolhido o modelo e verificado quais fontes são influenciadas pelo preço do barril de petróleo, realizou-se a previsão da produção de energia para cada fonte energética com base em diferentes cenários dos níveis dos preços internacionais do barril de petróleo. Os cenários foram feitos utilizando a óptica do Brasil como produtor de energia, e designados de: otimista, intermediário e pessimista. Para desenhar os cenários partiu-se da suposição demonstrada pela literatura de que os preços do barril de petróleo abaixo de US\$ 40,00/barril inviabilizam economicamente a produção de fontes alternativas, sobretudo, o etanol, provindo da cana-de-açúcar.

Os resultados confirmaram as expectativas da pesquisa que para a produção de petróleo nacional, quando há aumento no nível dos preços internacionais do barril, a produção interna acelera. O contrário se verificou em caso de queda no nível de preços, o Brasil opta por produzir menos e importar mais. A mesma tendência de produção futura acontece para a produção de gás natural. A fonte hidroelétrica também apresentou aumento em sua produção em um cenário de preços altos e queda de produção com menores preços de barril. Contudo, a produção não apresenta significativas oscilações nos diferentes cenários. Para a lenha a previsão se obteve sem interferência dos níveis de preços do barril. A previsão da produção de energia utilizando a cana-de-açúcar se mostrou muito sensível quando há diferentes níveis de preços, o que confirma a cana como forte substituta das fontes fossilizadas.

De um modo geral, as produções de fontes de energia não renováveis e renováveis da Matriz Energética Brasileira (com exceção da lenha) se mostraram sensíveis aos preços externos do barril de petróleo, e mesmo que possuía possíveis substitutos, como afirmado na literatura e confirmado nas estimações deste trabalho, a matriz brasileira ainda apresenta forte dependência das fontes fossilizadas.

Com base nos valores previstos com interferência dos preços do barril de petróleo, a pesquisa concluiu o terceiro objetivo, o de estabelecimento de previsões da produção das principais fontes energéticas que compõem a matriz brasileira para o período de 2019 a 2030, Aqui cabe ressaltar que este trabalho foi concluído no final do ano de 2019 e tornado público

no começo do ano de 2020. Os dados relativos à produção de energia da Matriz Energética Brasileira referentes ao ano de 2019 serão liberados a partir do segundo semestre do ano de 2020. Por esta razão, as previsões deste trabalho incluíram o ano de 2019. Portanto, estes resultados podem fazer a confirmação das projeções feitas na pesquisa para aquele ano quando divulgados os dados reais, tanto de preços quanto de produções.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, N. R. B. **Sustentabilidade da matriz energética brasileira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BELO HORIZONTE. Companhia Energética de Minas Gerais. (CEMIG). **Alternativas energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: Cemig, p. 369, 2012.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, Santiago, v.43, n. 10, out. 2018. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/jatsRepo/339/33957861002/index.html>> Acesso em: 17 fev. 2019.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time series analysis forecasting and control**. San Francisco: Holden-Day, 1976. Edição revisada.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética. Resolução (CNPE). nº 16, de 29 de outubro de 2018. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/71068545/Resolucao_16_CNPE_29-10-18.pdf/71cd909d-2ec9-492e-8540-53b46c712aab> Acesso em: 16 mar. 2019

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco energético nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018a.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório síntese 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018b.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, p. 408, 2007.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. Balanco Energético Nacional – **Séries completas**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>> Acesso em: 06 jun. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira**. Brasília 408 p., 2018a.

_____. Ministério de Minas e Energia. Nota Técnica nº PR 09/2018b. **Premissas e custos da oferta de combustíveis no horizonte 2050**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20009-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Combustiveis.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2019.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil é líder mundial no setor de agroenergia**. Disponível em:

<<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2011/12/brasil-e-lider-mundial-no-setor-de-agroenergia>> Acesso em: 17 mai. 2019.

BRONZATTI, F. L.; IAROSZINSKI NETO, A. I. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. *In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção*, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_541_11890.pdf> Acesso em: 15 fev. 2019.

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

BUSCARIOLLI, B.; EMERICK, J. **Econometria com Eviews**. São Paulo: Saint Paul, 2011.

CARVALHO, N. L.; BORTOLINI, J. G.; BARCELLOS, A. L. Biocombustíveis: uma opção para o desenvolvimento sustentável. **Revista GEDECON**, v. 2, n. 2, p. 32-50, 2014. Disponível em: <<http://revistaelectronica.unicruz.edu.br/index.php/GEDECON/article/view/1935/499>> Acesso em: 16 mar. 2019.

CASTRO, C. N. **O Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB) e a produção de Matéria-prima de óleo vegetal no Norte e no Nordeste**. Brasília: Ipea, 2011. (Texto para Discursão, n. 1613)

CONFORT, M.J.F.; MOTHE, C. G. Estimating the required underground natural gas storage capacity in Brazil from the gas industry characteristics of countries with gas storage facilities. **J. Nat. Gas Sci. Eng.**, v. 18, p.120-130, mai. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510014000390?via%3Dihub>> Acesso em: 04 mar. 2019.

DETZEL, D. H. M; MINE, R. M. M.; SANTOS, A. B.; THOMSEM, L. S. **Caderno FAC e FACP**. Curitiba, 2011. Disponível em: <<https://goo.gl/d8dTrx>> Acesso em: 20 nov. 2019.

DeLURGIO, S. A. **Forecasting principles and applications**. 1 ed. Singapura: McGraw-Hill, 1998

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Planning for a renewable future in the Brazilian power system. **Energy**, v. 164, n. 1, p. 496-511, dez.2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218317006>> Acesso em: 17 fev. 2019.

FARINA E.; RODRIGUES, L. Política nacional de biocombustíveis e os ganhos de eficiência no setor produtivo. **FGV Energia**. Março, 2018. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/22059/Coluna%20Opinio%20Marco%20%20Biocombustiveis%20%20Elizabeth%20e%20Luciano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 20 mar. 2019.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politicohoje/article/viewFile/3852/3156>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

FRANÇA. International Energy Agency. (IEA). **Energy policies and programmes of IEA countries**. AIE, Paris, 2000.

_____. International Energy Agency. **The monthly, quarterly and yearly average crude oil spot prices are calculated from daily quotations from Argus Crude unless otherwise specified**. AIE, Paris, 2019.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a02v2159.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 55, 2005. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10104>> Acesso em: 04 mar. 2019.

GUERRA, J. B. S. O. A. *et al.* Future scenarios and trends in energy generation in brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**. Santa Catarina, vol. 103, p. 197-210, set. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261401021X?via%3Dihub>> Acesso em: 15 fev. 2019.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

KENNEDY, C. A; BACHMANN, C. The Energy Structure of the Canadian Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 5, p. 1301 -1311, 2016.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142010000100017> Acesso em: 04 mar. 2019.

KWIATKOWSKI, D.; PHILLIPS, P. C. B., SCHMIDT, P.; SHIN, Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: how sure are we that economic time series have a unit root? **Journal of Econometrics**, v. 54, p. 159–178, 1992.

LAMAS, W. Q.; GIACAGLIA, G. E. O. The Brazilian energy matrix: Evolution analysis and its impact on farming. **Energy Policy**, v. 63, p. 321-327, dez. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513009336>> Acesso em: 15 mar. 2019.

LIMA JUNIOR, A. V.; REZER, F.; SENNA, V.; SOUZA, A. M.; ZANINI, R. R. Aplicação da metodologia Box e Jenkins na modelagem e previsão da série das despesas do governo com o Programa Bolsa Família. *In: SEMANÍSTICA: Semana Acadêmica da Estatística da UFRGS e STATISTICS*, 3, 2013, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Ano Internacional da Estatística, 2013.

LI, S.; LI, R. Comparison of forecasting energy consumption in Shandong, China using the ARIMA Model, GM model, and ARIMA-GM model. **Sustainability**, v. 9, n. 7, jul. 2017. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1181> > Acesso em: 20 mai. 2019.

LI, S.; YANG, X.; LI, R. Forecasting coal consumption in India by 2030: Using linear modified linear (MGM-ARIMA) and linear modified nonlinear (BP-ARIMA) combined models. **Sustainability**, v. 11, n. 3, fev. 2019. Disponível em : <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/695>> Acesso em: 20 mai. 2019.

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. On a Measure of a Lack of Fit in Time Series Models. **Biometrika**, n.65, pp. 297-303, 1978.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.;HYNDMAN, R. J. **Forecasting methods and applications**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

MADDALA, G. S.; KIM, I. M. Unit roots, cointegration, and structural change. **Cambridge University Press**, Cambridge, n. 4, 1998.

MANTOVANI, P. R. A.; NEUMANN, P. N.; EDLER, M. A. R. Matriz energética brasileira: em busca de uma nova alternativa. **Rev. Int. Ens. Pes. Ext.**, Rio Grande do Sul, v. 4, n. 1, 2016. Disponível em: <<http://revistaeletronica.unicruz.edu.br/index.php/electronica/article/view/4693>> Acesso em: 17 mai. 2019.

MATTOS, R. S. *et al.* Integração de modelos econométrico e de insumo-produto para previsões de longo prazo da demanda de energia no Brasil. **Estudos Econômicos**. São Paulo, vol. 38 n. 4 Oct./Dec., 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-41612008000400001> Acesso em: 15 fev. 2019.

MORAES, M. L.; BACCHI, M. R. P. Etanol do início às fases atuais de produção. **Revista Política Agrícola**, Brasília, v. 23, n. 4, out./nov./dez. 2014.

MUJIYANTO, S.; TIESS, G. Secure energy supply in 2025: Indonesia's need for an energy policy strategy. **Energy Policy**, v. 61, p. 31-41, out. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513004746> > Acesso em: 15 fev. 2019.

OLIVEIRA, J. A. P. The policymaking process for creating competitive assets for the use of biomass energy: the Brazilian alcohol programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 129-140, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032101000144>> Acesso em: 04 mar. 2019.

PAIXÃO, M. A. S.; MIRANDA, S. H. G. Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China. **Revista Pesquisa e Debate**, São Paulo, v.29, n.53, 2018. Disponível em : <<https://revistas.pucsp.br/rpe/article/view/33934/25963>> Acesso em: 17 fev. 2019.

PINTO, R. B. **Finanças comportamentais e metodologia Box & Jenkins**: uma aplicação no mercado brasileiro. Dissertação - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.

PIRES, J. C. L.; GIAMBIAGI, F.; SALES, A. F. As perspectivas do setor elétrico após o racionamento. **Revista do BNDES**, 9(18): 163–204, 2002.

SCHIAVI, M. T.; HOFFMANN, W. A. M. Cenário petrolífero: sua evolução, principais produtores e tecnologias. **Rev. Digit. de Bibliotecon. Cien Inf.**, Campinas, vol. 13, n. 2, p. 259-270, mai./ago. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rdbci/article/view/2104/3385>> Acesso em: 20 mar. 2019.

SILVA, F. M.; MACHADO, T. A. Transmissão de preços da soja entre o Brasil e os estados unidos no período de 1997 a 2007. **Economia e Desenvolvimento**, n. 21, 2009.

SILVA, R. C.; MARCHI NETO, I.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 238-241, jun.2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000290>> Acesso em: 20 mar. 2019.

SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Revista Opinião Jurídica**, Medellin, vol.17, n. 33, p. 123-147, set. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S169225302018000100123&lng=en&nrm=iso&tlng=pt> Acesso em: 15 fev. 2019.

STATTMAN, S. L.; HOSPES, O.; MOL, A. P. J. Governing biofuels in Brazil: A comparison of ethanol and biodiesel policies. **Energy Policy**, v. 61, p. 22-30, out. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513004825>> Acesso em: 17 fev. 2019.

TOLMASQUIM, M. T. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, n. 6-7, jan./jun. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X200000100012>. Acesso em: 04 mar. 2019.

_____. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017&lng=pt&tlng=pt> Acesso em: 20 mar. 2019.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos. - CEBRAP**, São Paulo, n. 79, p. 47-69, nov. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 04 mar. 2019.

WANG, Q.; LI, S.; LI, R.; MA, M. Forecasting U.S. shale gas monthly production using a hybrid ARIMA and metabolic nonlinear grey model. **Energy**, v. 160, p. 378–387, out. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218313446>> Acesso em: 20 mai. 2019.

WOOLDRIDGE, J. F. **Introdução à econometria**. São Paulo, SP. Cengage Learning. 2012.