

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Bianca Reichert

**ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES
GERADORAS DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Santa Maria, RS
2020

Bianca Reichert

**ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES GERADORAS DA
MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Mendonça Souza

Santa Maria, RS
2020

Bianca Reichert


**ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES GERADORAS DA
MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 18 de fevereiro de 2020:



Adriano Mendonça Souza, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Roselaine Ruviano Zanini, Dr^a. (UFSM)



Alisson Eduardo Maehler, Dr. (UFPEL)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que me propiciou embarcar nessa aventura chamada vida.

À minha mãe Valmi, que sempre esteve ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Ao meu pai Luiz, meu anjo da guarda, que mesmo de outro plano sempre se fez presente em minha vida e iluminou os caminhos mais obscuros.

Ao meu irmão Jonatan por ser o exemplo de profissional íntegro e ético na engenharia e por me incentivar a seguir seus passos.

Ao meu noivo Rolf pela compreensão e paciência demonstrada durante o período do Mestrado.

Agradeço ao meu orientador, Adriano Mendonça Souza, por ter plantado em mim o desejo de seguir a vida acadêmica ainda no curso de graduação em Engenharia de Produção, por ser o meu mestre, mentor e amigo. Jamais esquecerei seus ensinamentos.

Gostaria de agradecer também a todos os meus professores do curso de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria pela excelência do ensino e atenção de cada um.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior pelo aporte financeiro ao longo do curso e ao Laboratório de Análise e Modelagem Estatística da Universidade Federal de Santa Maria pelo espaço cedido.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Maria por ter me acolhido desde o período da graduação e por ter me proporcionado a oportunidade de continuar aprimorando o meu saber.

RESUMO

ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES GERADORAS DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

AUTORA: Bianca Reichert

ORIENTADOR: Adriano Mendonça Souza

A gestão energética é fator estratégico por ser capaz de garantir o uso sustentável dos recursos naturais. O objetivo da pesquisa foi identificar as interações existentes entre as fontes da matriz elétrica brasileira, utilizando equações simultâneas, e avaliar os impactos na geração de eletricidade de cada fonte por meio da simulação de cenários. As fontes geradoras analisadas foram: biomassa; carvão; combustíveis; eólica; gás natural; hidráulica; nuclear. Os valores mensais, de janeiro de 2000 a junho de 2019, foram coletados no *site* Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O sistema de equações simultâneas foi ajustado por meio do método de regressões aparentemente não relacionadas (SUR), pois sua estimativa é mais eficiente ao selecionar apenas os coeficientes significativos para o sistema. A elaboração de cenários otimista e pessimista evidenciaram o grande impacto na fonte hidráulica, causado por variações extremas na geração das fontes renováveis, ao mesmo tempo em que mostrou forte dependência das fontes térmicas em períodos de escassez das chuvas. Em um horizonte otimista, verificou-se que a geração das fontes biomassa, eólica, carvão e combustíveis diminuirá e haverá aumento da utilização da fonte hidráulica. Uma das alternativas apontadas para diminuir a dependência das termoelétricas é aumentar a geração das fontes renováveis não convencionais, como biomassa, eólica e solar, bem como aumentar os incentivos financeiros e desenvolver políticas públicas que estimulem a utilização dessas fontes.

Palavras-Chave: Geração de eletricidade. Equações simultâneas. Elaboração de cenários.

ABSTRACT

ANALYSIS OF INTERACTIONS AMONG THE MAIN GENERATING SOURCES OF THE BRAZILIAN ELECTRIC MATRIX

AUTHOR: Bianca Reichert

ADVISOR: Adriano Mendonça Souza

Energy management is capable of ensuring the sustainable use of natural resources. This research aimed at identifying interactions among the Brazilian electric matrix sources, using simultaneous equations, and evaluating impacts on electricity generation of each source by means of scenario simulation. The generating sources analyzed were: biomass; coal; fuels; wind power; natural gas; hydropower; nuclear. Monthly values from January 2000 to June 2019 were collected on the National Electricity Agency website. The seemingly unrelated regression (SUR) method was used because it is a more efficient estimator, since only significant coefficients are selected for the system. The analysis of the optimistic and pessimistic scenarios evaluated the great impact on the hydropower source caused by extreme variations in the renewable generation, at the same time it presented a strong dependence on thermal sources in periods of rain scarcity. In an optimistic horizon, we found that the generation of biomass, wind, coal and fuel sources will decrease and there will be an increase in the hydropower use. The alternative to reduce dependence on thermoelectric plants is to increase the generation of unconventional renewable sources, such as biomass, wind and solar, as well as increasing financial incentives and developing public policies that encourage these sources generation.

Keywords: Electricity generation. Simultaneous equations. Scenario simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa representativo dos percentuais de participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas mundiais.....	11
Figura 2 – Percentuais de participação das fontes na geração de energia elétrica no Brasil....	15
Figura 3 – Matriz de amarração da metodologia, objetivos e questões da pesquisa.....	25
ARTIGO 1	
Figura 1 – Flowchart of applied research protocol and corpus design.....	30
Figura 2 – Annual scientific production.....	32
Figura 3 – Geographical distribution of scientific production.....	33
Figura 4 – Bradford’s Law chart of journal productivity.....	34
Figura 5 – Annual scientific production based on corpus source zones.....	35
Figura 6 – Authorship composition chart.....	36
Figura 7 – Cocitation density map of the cites references.....	37
Figura 8 – Top 10 most used word clouds in titles, abstracts and keywords.....	38
Figura 9 – Dendrogram chart of the most used top10 words as keywords.....	38
Figura 10 – Source annual correspondence analyzed by the corpus.....	39
Figura 11 – Scheme of the most studied sources and the substances used in the corpus.....	40
Figura 12 – Scheme of management strategies of the corpus energy matrices.....	41
ARTIGO 2	
Figura 1 – Diagrama das etapas metodológicas da pesquisa.....	54
Figura 2 – Gráficos da quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica brasileira durante o período de análise.....	56
Figura 3 – Diagrama de precedência entre as variáveis de acordo com o teste de Causalidade de Granger.....	59
Figura 4 – Gráficos da comparação entre a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) ajustada pelo sistema de equações e pelo cenário otimista.....	61
Figura 5 – Gráficos da comparação entre a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) ajustada pelo sistema de equações e pelo cenário pessimista.....	62

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 2

Tabela 1 – Medidas descritivas da quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica.....	55
Tabela 2 – Testes de raiz unitária ADF e KPSS aplicados às séries em nível e em 1 ^{as} diferenças.....	57
Tabela 3 – Resultados do <i>Lag Length Criteria</i> para a identificação do número de defasagens significativas.....	58
Tabela 4 – Percentuais de participação das fontes de energia na geração de eletricidade no Brasil.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADF	Teste de Dickey-Fuller Aumentado
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARDL	<i>Autoregressive Distributed Lag</i>
BIC	<i>Bayesian Information Criterion</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FPE	<i>Final Prediction Error</i>
GWh	Gigawatt-hora
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KPSS	Teste de Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LM	Multiplicador de Lagrange
LR	<i>Likelihood Maximum</i>
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MQ2E	Mínimos Quadrados em Dois Estágios
ONS	Operador Nacional do Sistema de Elétrico
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RNA	Redes Neurais Artificiais
SIN	Sistema Interligado Nacional
SJR	<i>Scimago Journal & Country Ranking</i>
SLR	<i>Systematic Literature Review</i>
SUR	Regressões Aparentemente Não Relacionadas
TWh	Terawatt-hora
VAR	Vetor Autorregressivo
WoS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	15
2.2	EQUAÇÃO SIMULTÂNEAS.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	ABORDAGEM METODOLÓGICA	22
3.1.1	Base de dados	23
3.1.2	Metodologia	23
4	ARTIGO 1 - ENERGY MATRIX AND GENERATING SOURCES: AN EVALUATION OF THE LITERATURE ART STATE	27
5	ARTIGO 2 – ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES GERADORAS DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	50
6	DISCUSSÃO	73
7	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A energia é o resultado da transformação de recursos naturais para a realização de algum trabalho ou atividade. A vida humana é dependente dessa transformação, bem como da capacidade de conservação e da geração sustentável (SMIL, 2019).

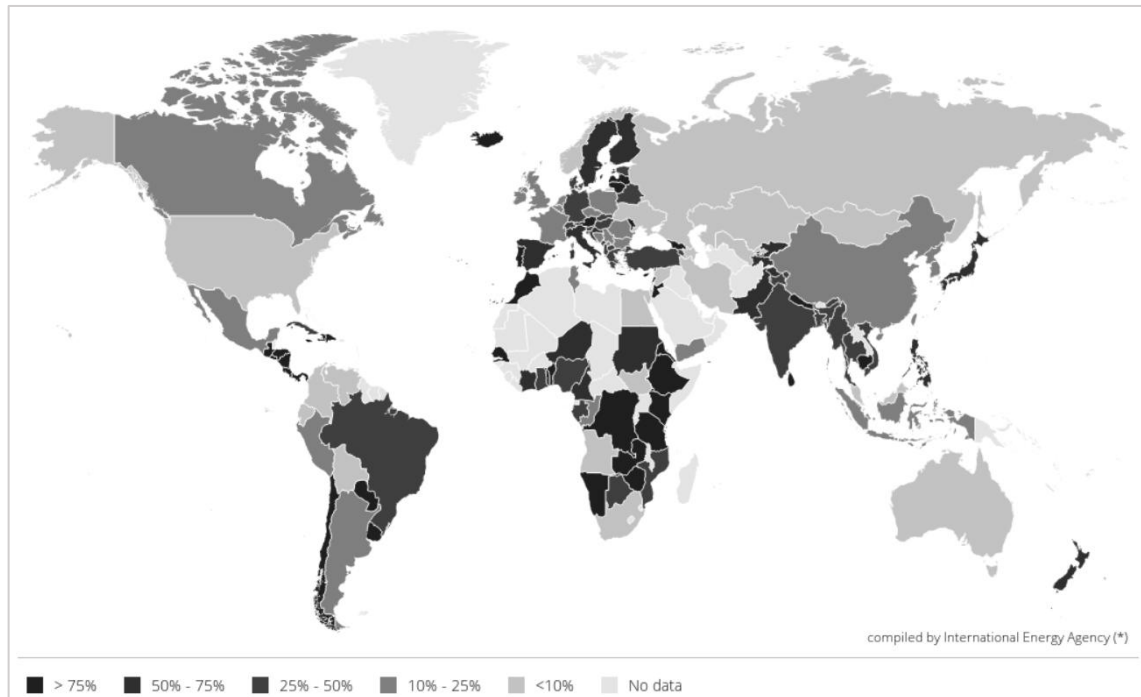
De acordo com o processo de geração, as fontes de energia podem ser classificadas conforme a renovação do recurso natural utilizado. As fontes renováveis baseiam-se nos recursos não esgotáveis como a água, o vento e o sol. As fontes não renováveis caracterizam a geração de energia a partir de combustíveis fósseis, como derivados do petróleo, gás natural e carvão (ATEMS; HOTALING, 2018).

No panorama mundial, as fontes não renováveis lideram a geração de energia, sendo os derivados de petróleo (31,80%), o carvão (27,10%) e o gás natural (22,20%) as principais fontes geradoras (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 2017a). Embora o potencial energético dessas fontes seja alto e o seu impacto no crescimento econômico seja positivo, a consequência da sua utilização é a emissão dos gases do efeito estufa (ADAMS; KLOBODOU; APIO, 2018).

Devido ao impacto ambiental causado pelo uso das fontes não renováveis, diversas ações estão sendo tomadas para tornar a matriz energética mundial mais sustentável. Uma dessas ações caracterizou-se pela criação do Protocolo de Quioto, o qual procurou estabelecer metas de redução das emissões aos países desenvolvidos a partir do ano de 1997 (KRUG, 2018). Com o propósito de chamar a atenção para os riscos decorrentes da mudança climática, um novo acordo foi esboçado em Paris e assinado no ano de 2016, tendo como principal preocupação o aumento do aquecimento global (MCCOLLUM et al., 2018). Além do âmbito governamental, as organizações também apresentam esforços para tornar o desenvolvimento mais sustentável como a implementação da norma de padronização internacional ISO 50001, que estabelece requisitos para a criação de um sistema de gestão energético nas empresas (GONÇALVES; SANTOS, 2019).

A meta de possuir uma matriz energética 100% renovável já é realidade em países como Costa Rica, Islândia, Nepal, Panamá, Paraguai e Uruguai (IEA, 2017b). No caso brasileiro, a matriz ainda necessita de esforços para tornar-se mais sustentável, uma vez que apenas 42% do total de energia gerada provém de fontes renováveis como hidrelétricas, energia de biomassa, eólica e solar (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2018). Os demais países que possuem matrizes energéticas renováveis podem ser visualizados no mapa da Figura 1.

Figura 1 – Mapa representativo dos percentuais de participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas mundiais



Fonte: (IEA, 2017b).

A fonte renovável mais utilizada para geração de energia no mundo é a biomassa, a qual foi responsável por gerar 9,50% do total de energia em 2017 (IEA, 2017a). A biomassa possui grande representatividade na matriz mundial por ser uma fonte energética bifuncional, em que os biocombustíveis são utilizados para transportar produtos e o biogás aproveitado na geração de eletricidade (BROWN, 2019). A tendência para os próximos anos é o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética mundial, as quais serão responsáveis por gerar dois-terços do total de energia até o ano de 2050 (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2018).

Porém, ao aumentar a proporção da geração renovável, aumenta-se a variabilidade e a incerteza de previsão do sistema energético. Isso se deve à influência direta dos fatores climáticos sobre a geração de energia hidráulica, eólica e solar, tais como o nível de precipitação, a velocidade dos ventos, o nível de irradiação solar, dentre outros (HOELTGEBAUM; FERNANDES; STREET, 2018). O principal impacto causado pela instabilidade das fontes renováveis é a dependência da geração de termoelétricas, pois, em períodos climáticos adversos, a demanda precisa ser atendida pela geração das fontes carvão, derivados de petróleo, gás natural e nuclear (MENDES; STHEL, 2018).

As dependências entre as fontes da matriz energética podem ser identificadas por meio da modelagem econométrica multivariada, com base no ajuste de um sistema de equações simultâneas (HAO; HU; CHEN, 2019). Essa modelagem permite avaliar o impacto que mudanças nas variáveis exógenas exercem sobre a variável de interesse (SOUKIAZIS; PROENÇA; CERQUEIRA, 2019).

Portanto, conhecer as peculiaridades de cada fonte da matriz energética e suas inter-relações é imprescindível para realizar a programação da geração, distribuição e comercialização da energia, além de ser subsídio para decisões que colaborem para um sistema energético mais eficiente e menos poluente.

Esta pesquisa está estruturada da seguinte forma: o primeiro capítulo contextualiza o tema de interesse, apresenta o problema, os objetivos e a justificativa para realização do estudo; o segundo capítulo aborda a revisão de literatura referente aos tópicos Matriz Elétrica Brasileira e Equações Simultâneas; o terceiro capítulo expõe os dados utilizados e os métodos aplicados; o quarto capítulo discorre sobre os resultados da revisão sistemática de literatura em formato de artigo científico; o quinto capítulo refere-se ao artigo que contém os resultados da pesquisa, como a aplicação de equações simultâneas e a elaboração de cenários para a geração de energia elétrica no Brasil; o sexto capítulo aborda a discussão dos resultados encontrados nos dois artigos; e, por fim, o sétimo capítulo apresenta as considerações finais da pesquisa.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema da presente pesquisa busca responder às seguintes questões:

- Quais as fontes da matriz elétrica brasileira que realmente impactam a geração de eletricidade no país e quais períodos passados possuem efeito sobre essa geração?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo de uma pesquisa consiste em elucidar o seu propósito. Nos próximos itens, são apresentados os objetivos desta pesquisa, do geral aos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo identificar as inter-relações existentes entre as principais fontes da matriz elétrica brasileira, por meio de equações simultâneas, e avaliar os impactos na geração de eletricidade de cada fonte com a simulação de cenários.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral, traçam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura das publicações científicas sobre o tema matriz energética e determinar as opções futuras para a geração de energia;
- Ajustar um sistema de equações simultâneas que explique as inter-relações existentes entre as principais fontes da matriz elétrica brasileira;
- Elaborar cenários otimista e pessimista da geração de energia elétrica no Brasil, por diferentes fontes;
- Avaliar os impactos na geração de eletricidade de cada fonte para cada cenário.

1.3 JUSTIFICATIVA

Conhecer a situação energética mundial e os desafios para o futuro é uma atitude necessária para a sobrevivência humana nos dias atuais, dado que o consumo desenfreado das fontes não renováveis ameaça a sustentabilidade dos recursos naturais e a manutenção das condições climáticas do planeta (MCCOLLUM et al., 2018; FISHER-KOWALSKI et al., 2019). Contudo, para que essa consciência seja atingida em nível global, cada país tem a obrigação de gerir e impor limites para o uso das suas fontes energéticas. Essa gestão deve levar em consideração as diferentes aplicações da energia, seja para transportar cargas ou para gerar eletricidade (SANCHEZ; VÁSQUEZ; VILORIA, 2018; YAO; ZHANG; ZHANG, 2019).

No caso específico do Brasil, onde a matriz elétrica é composta principalmente por fontes renováveis, muitos esforços ainda são necessários para tornar a geração de eletricidade mais sustentável, pois, mesmo que as hidrelétricas representem a principal fonte de eletricidade, as fontes renováveis não convencionais precisam ser mais incentivadas (EPE, 2018; MENDES; STHEL, 2018; LLERENA et al., 2019).

Além de estímulos para aumentar a geração de fontes como biomassa, eólica e solar, necessita-se compreender em quais momentos e circunstâncias a geração de eletricidade é dependente das fontes não renováveis, pois, a partir desses dados, será possível elaborar políticas e planos de ações para aperfeiçoar o sistema elétrico nacional, aumentando a capacidade de renovação das fontes e a eficiência energética (JUNQUEIRA; CAVALETT; BONOMI, 2016; CARSTENS; CUNHA, 2019; LIMA et al., 2019).

Justifica-se a realização de um estudo que analise a situação energética mundial e o inter-relacionamento existente entre as fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, pois os seus efeitos influenciam diretamente o nível de dependência da geração não renovável. Ademais, essas informações poderão auxiliar no desenvolvimento de políticas públicas voltadas à eficiência e à renovação energética.

2 REVISÃO DE LITERATURA

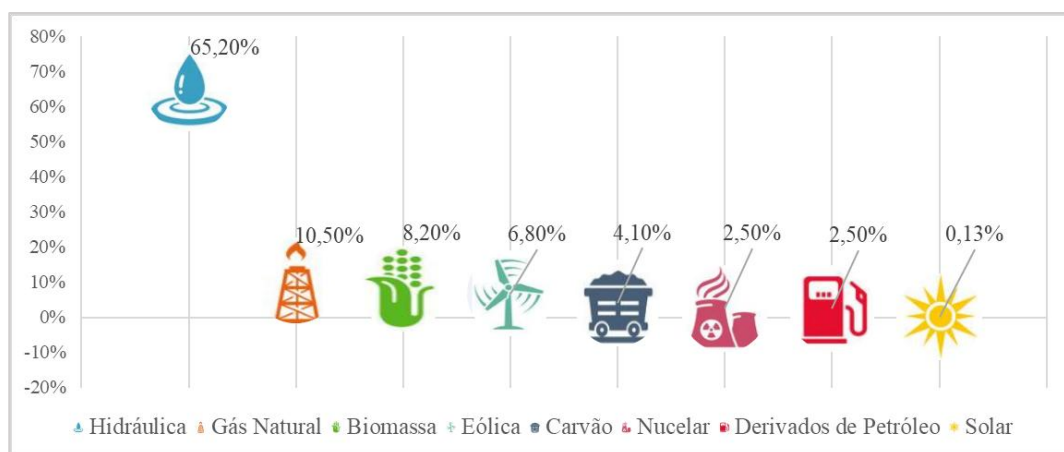
Para compreender o embasamento teórico da pesquisa, este capítulo divide-se em dois tópicos: Matriz Elétrica Brasileira e Equações Simultâneas.

2.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz elétrica é composta por todas as fontes que geram eletricidade, ao contrário da matriz energética, formada por todos os recursos naturais que produzem algum tipo de energia (SMIL, 2019). A eletricidade é gerada a partir do movimento de turbinas em usinas elétricas, onde tal movimento tem origem da força motriz das águas, da luz solar, da velocidade dos ventos ou do calor resultante da queima de resíduos orgânicos ou combustíveis fósseis (ERENOĞLU; ERDİNÇ; TAŞCIKARAOĞLU, 2019).

Em 2017, o consumo total de energia elétrica no Brasil foi igual a 526,20 TWh para um total de geração interna de 624,30 TWh, dos quais 36,40 TWh foram provenientes de importações de energia hidráulica (EPE, 2018). As principais fontes geradoras da matriz elétrica brasileira, bem como os seus percentuais de participação na geração interna de eletricidade, podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2 – Percentuais de participação das fontes na geração de energia elétrica no Brasil



Fonte: Adaptado de EPE (2018, p. 16).

A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, dado que as fontes renováveis correspondem a 80,40% da geração interna de eletricidade (EPE, 2018). A fonte

hidráulica é a mais representativa da matriz brasileira devido ao grande potencial hídrico presente no país (FERREIRA et al., 2016).

Mesmo que o Brasil seja referência mundial na geração hidráulica, esforços ainda são necessários para tornar a matriz mais sustentável, seguindo o exemplo de países como Costa Rica, Islândia e Paraguai (IEA, 2017c; SGARBI et al., 2019; QUEIROZ et al., 2019). Nesse sentido, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) foi criado com o objetivo de incentivar a geração eólica e de biomassa no país (DUTRA; SZKLO, 2008).

Desde então, a energia eólica apresenta crescente desenvolvimento no Brasil, em que o maior potencial energético se localiza na costa nordeste (CAMELO et al., 2018a). O desenvolvimento dessa fonte também é impulsionado pela coordenação de investimentos e financiamentos específicos para o setor de energia renovável (TORINELLI; SILVA JR; ANDRADE, 2018; REGO; RIBEIRO, 2018).

Ademais, a geração de biomassa possui papel fundamental na tentativa de tornar a matriz elétrica brasileira mais renovável, pois é uma fonte que possui grande potencial energético no país e prove a geração de eletricidade de forma limpa, colaborando para a redução dos gases do efeito estufa (PEDROSO et al., 2018; SANTOS, I. F. S. et al., 2018). Conforme Luz e Moura (2019), a biomassa poderá ser a terceira fonte renovável mais utilizada no Brasil até o ano de 2050, no contexto de uma matriz totalmente renovável.

Outra fonte renovável emergente no país é a solar, mesmo que ainda não tenha uma geração representativa na matriz brasileira (EPE, 2018; FERREIRA et al., 2018). O Brasil possui uma extensão territorial favorável para a irradiação solar, porém a geração fotovoltaica ainda é pouco explorada devido à falta de incentivos financeiros e políticas públicas que estimulem a expansão da utilização dessa fonte em todo o país (CARSTENS; CUNHA, 2019; LIMA et al., 2019).

Entretanto, as fontes renováveis da matriz elétrica brasileira apresentam instabilidade na geração ao longo do ano, pois o fator sazonal das estações, períodos de secas e mudanças climáticas afetam diretamente as fontes hidráulica, eólica e solar (CAMELO et al., 2018a; JONG et al., 2019; SILVA et al., 2019). A grande extensão do território brasileiro também contribui para a instabilidade das fontes elétricas, uma vez que possibilita a coexistência de diferentes regimes climáticos (CAMELO et al., 2018b).

No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável por coordenar a geração e a transmissão de energia elétrica de quase todo país, a fim de controlar as instabilidades das fontes geradoras (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO –

ONS, 2019a). O planejamento e a programação do SIN são realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e fiscalizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ONS, 2019b).

Devido à instabilidade das fontes renováveis e a sua crescente incorporação às bases energéticas dos países, conhecer as interferências do clima e das inter-relações entre as fontes que compõem a matriz são informações essenciais para realizar o planejamento e a programação do sistema energético. Diante desse interesse, estudos propuseram analisar as relações existentes entre o consumo de energia elétrica e o crescimento econômico dos países, com base nas variáveis: produto interno bruto, quantidade de energia elétrica consumida e emissões de dióxido de carbono (CO₂) (ESSO; KEHO, 2016; ANTONAKAKIS; CHATZIANTONIOU; FILIS, 2017; GORUS; AYDIN, 2019).

Dentre os métodos mais utilizados para análise das inter-relações, destacam-se os modelos Autorregressivos com Defasagens Distribuídas (ARDL), Vetor Autorregressivo (VAR) e inferência *neuro-fuzzy* (MIRZA; KANWAL, 2017; CAI; SAM; CHANG, 2018; MARDANI et al., 2018; HDOM, 2019). Da mesma forma, o ajuste de equações simultâneas foi aplicada com o intuito de identificar a direção das relações entre variáveis econômicas e energéticas e avaliar seus impactos no crescimento econômico (CHESSEER et al., 2018; NASREEN; SAIDI; OZTURK, 2018; ARMINEN; MENEGAKI, 2019; TRAN et al., 2019; SOUKIAZIS; PROENÇA; CERQUEIRA, 2019).

As relações entre índices econômicos e a geração de energia elétrica também foram analisadas para o cenário brasileiro, por meio dos modelos VAR e ARDL, no qual os autores concluíram que a geração das fontes renováveis possui impacto positivo de longo prazo no desenvolvimento econômico do país (NORONHA; ZANINI; SOUZA, 2019). Outros estudos que analisassem as relações existentes entre as fontes geradoras da matriz elétrica brasileira, por meio do ajuste de equações simultâneas, não foram encontrados.

O próximo tópico abordará os conceitos teóricos e os pressupostos básicos para o ajuste de um sistema de equações simultâneas.

2.2 EQUAÇÃO SIMULTÂNEAS

O ajuste de um sistema de equações simultâneas possibilita avaliar as relações que podem existir entre as variáveis independentes e a dependente em uma equação de regressão (MASTEN, 2018; GUAN; PANG, 2018). O sistema de equações simultâneas considera mais de uma variável dependente, a qual é dita como endógena ao modelo. Se forem consideradas

m variáveis endógenas no modelo, deverá ser ajustado um sistema com m equações (GUJARATI, 2000). A variável exógena é considerada aquela que não possui relação de dependência com as outras variáveis do sistema. O sistema de m equações simultâneas é representado nas Equações 1, 2 e 3.

$$X_1 = \beta_{0,1} + \beta_{1,1} X_2 + \dots + \beta_{m-1,1} X_m + \gamma_1 Y_i + \dots + \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$X_2 = \beta_{0,2} + \beta_{1,2} X_1 + \dots + \beta_{m-1,2} X_m + \gamma_2 Y_i + \dots + \varepsilon_2 \quad (2)$$

⋮

$$X_m = \beta_{0,m} + \beta_{1,m} X_1 + \beta_{2,m} X_2 + \dots + \beta_{m-1,m} X_{m-1} + \gamma_m Y_i + \dots + \varepsilon_m \quad (3)$$

Em que:

X_1, X_2, \dots, X_m são as variáveis endógenas, Y_i representa variável exógena, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$ são os termos dos erros.

O ajuste de equações simultâneas permite analisar os efeitos das interações entre as variáveis de modo a se obter resíduos com características *i.i.d.* (independentes e identicamente distribuídos) (OMRI; KAHOU LI, 2014).

O pressuposto básico para o ajuste do sistema de equações simultâneas é a estacionariedade das séries, para que se possam realizar inferências sobre os parâmetros estimados (BUENO, 2015). Os testes de raiz unitária são utilizados para verificar a existência de raízes sobre o círculo unitário e, assim, comprovar a estacionariedade da série temporal (DICKEY, 2015). Os testes Dickey-Fuller Aumentado (ADF) e Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS) são os mais utilizados de forma conjuntamente por possuírem hipóteses nulas contrárias e por assumirem que os resíduos sigam um processo de Ruído Branco *i.i.d.*($0, \sigma^2$) (DICKEY; FULLER, 1981; KWIATKOWSKI et al., 1992; SOUZA, 2016; MORETTIN, 2016).

Caso a série for definida como não estacionária, será necessário aplicar d diferenças até que se consiga estabilizar os valores da série em torno da média, as quais podem ser determinadas por meio dos testes de raiz unitária, ADF e KPSS.

O teste ADF tem como base a seguinte equação regressora:

$$\Delta X_t = \mu + \alpha X_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \lambda_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Em que:

$$\alpha = -(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i); \lambda_i = -\sum_{j=i}^{p-1} \phi_{j+1} \quad (5)$$

Em que:

μ representa o intercepto, α é a ordem do modelo autorregressivo, X_t representa a variável dependente, Δ caracteriza o operador de diferença, ε_t o erro que segue um processo de Ruído Branco $\varepsilon_t \approx i.i.d. N(0, \sigma^2)$ e ϕ_i o parâmetro da parte autorregressiva.

A hipótese H_0 do teste ADF assume que a série é não estacionária ao considerar que a série possui uma raiz no círculo unitário. Para testar a estacionariedade da série, o teste ADF baseia-se na estatística t a fim de verificar se o valor de $|\tau|^{\text{calculado}} > |\tau|^{\text{crítico}}$ de Dickey-Fuller. Caso for verdadeira essa comparação, rejeita-se H_0 e a série é considerada estacionária (DICKEY; FULLER, 1981).

De modo contrário, a hipótese H_0 do teste KPSS assume a estacionariedade da série $X_t \sim I(0)$. A realização do teste KPSS possui como base uma equação regressora, na qual a variável dependente é explicada por uma tendência determinística, um passeio aleatório e um erro estacionário, conforme a Equação 6 (KWIATKOWSKI et al., 1992).

$$X_t = \delta t + W_t + e_t \quad (6)$$

Em que:

X_t é a série em análise, δ representa a tendência, W_t caracteriza o passeio aleatório com $W_t = W_{t-1} + v_t$, sendo v_t considerado um erro com distribuição $v_t \approx (0, \sigma^2)$, e e_t o erro da Equação 6.

Caso o parâmetro seja $\delta = 0$, considera-se X_t uma série estacionária em torno de W_0 . Se $\delta \neq 0$, então, a série será estacionária em torno de uma tendência linear. Porém, se a variância do erro v_t (σ_v^2) for maior que zero, a série não será considerada estacionária (BUENO, 2015).

Para aplicar o teste, ajusta-se a regressão da Equação 6 com uma constante no tempo, a fim de calcular os erros em todo o período t . A partir dos erros, calcula-se a variância estimada σ_e^2 igual à soma dos quadrados dos erros dividido pelo número de observações N , além da soma parcial S_t , calculada conforme a Equação 7.

$$S_t = \sum_{i=1}^t e_i \quad (7)$$

A estatística base do teste KPSS é o Multiplicador de Lagrange (LM), dado por:

$$LM = \sum_{t=1}^N \frac{S_t^2}{N^2 \sigma_e^2} \quad (8)$$

Em que:

N representa o número de observações, S_t a soma parcial dos erros e σ_e^2 a variância estimada dos erros.

A partir do conhecimento da estabilidade das séries, é possível definir o número de defasagens significativas que serão incluídas no ajuste do sistema de equações simultâneas. O número de defasagens pode ser identificado por meio do *lag length criteria*, o qual indica a defasagem significativa com base nos valores dos critérios de informação, como o Akaike (AIC) e o Bayesiano (BIC) (HASEEB et al., 2019). Para realização desse teste, necessita-se ajustar previamente um Vetor Autorregressivo (VAR) inicial (SENNA; SOUZA, 2016).

Além da definição das defasagens significativas, será possível classificar as variáveis em endógenas e exógenas com base no teste de Causalidade de Granger, gerado a partir do modelo VAR prévio. A Causalidade de Granger possibilita verificar se informações de uma variável podem ser utilizadas para realizar a previsão da outra variável (BUENO, 2015; MORETTIN, 2016).

O teste de Causalidade de Granger consiste em analisar se as defasagens de uma variável possuem efeito sobre outra variável, por meio de uma equação de regressão (GRANGER, 2004). Para determinar se Y_t causa X_t , no sentido de Granger, utiliza-se como base a Equação regressora 9.

$$X_t = \phi_0 + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \phi_3 Y_{t-3} + \dots + \varepsilon_t \quad (9)$$

Em que:

X_t é a variável dependente, Y_t a variável independente as suas defasagens e ε_t , o erro.

A hipótese nula do teste admite que Y_t não causa X_t no sentido de Granger, $H_0 = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \dots = 0$ (ROCHA; BRILHANTE, 2015; RAMSER et al., 2019). O teste baseia-se na estatística F para aceitar ou não a hipótese nula, conforme a Equação 10.

$$S = \frac{\frac{(\varepsilon_r^2 - \varepsilon_u^2)}{p}}{\frac{\varepsilon_u^2}{N-2p-1}} \xrightarrow{d} F(p, N - 2p - 1) \quad (10)$$

Em que:

N é o número de observações, p representa o número de parâmetros, ε é o termo do erro da equação, r representa restrito e u não restrito, d caracteriza a defasagem da variável (BUENO, 2015).

Se $S > F^{5\%}$, rejeita-se a hipótese nula e admite-se que Y_t causa X_t , no sentido de Granger, dessa forma, a variável Y_t deverá ser incorporada à equação da variável dependente X_t .

Após determinar a estacionariedade das variáveis que integram o sistema, as suas classificações em exógenas e endógenas e as suas defasagens significativas, o ajuste do sistema de equações simultâneas poderá ser realizado de maneira mais assertiva. Para ser

considerado simultânea, a estimação dos parâmetros de uma equação deve considerar contemporaneamente os parâmetros obtidos nas demais equações do sistema. A estimação dos parâmetros pode ser realizada por meio do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), contudo, esse método de estimação só pode ser aplicado se as variáveis regressoras não estiverem correlacionados com o termo do erro (SAIDI, HAMMAMI, 2015).

Caso houver correlação entre as variáveis regressoras e o termo do erro, o método de Mínimos Quadrados em Dois Estágios (MQ2E) deve ser utilizado para a etapa de estimação (WANG et al., 2018). Porém, para as situações em que for necessário modelar equações com estrutura dinâmica e variáveis com diferentes defasagens, aplica-se a modelagem de regressões aparentemente não relacionadas (SUR) (ENDERS, 1995; KHAN; PENG; LI, 2019).

O estimador SUR permite ajustar equações mais eficientes que a modelagem estrutural do VAR, pois os seus parâmetros são estimados de forma simultânea e as equações possuem configuração dinâmica, uma vez que apenas as variáveis significativas são incluídas no sistema (ZELLNER, 1962; WANG; ZHAO; LI, 2018). Esse método de estimação estabelece a força de ligação entre as variáveis do sistema por meio da correlação dos termos dos erros das equações. Assim, o SUR permite que cada equação possua sua forma funcional, mantendo o efeito dinâmico por meio de suas defasagens, o que auxilia o pesquisador a encontrar um modelo mais condizente com a realidade. Cumpre referir que modelo clássico do SUR é um sistema de equações de regressão linear demonstrado genericamente nas Equações 11 e 12.

$$x_{1t} = Y_{1t}\beta_1 + \varepsilon_{1t} \quad (11)$$

$$\vdots$$

$$x_{mt} = Y_{mt}\beta_m + \varepsilon_{mt} \quad (12)$$

Em que:

$i=1,2,\dots, m$ são variáveis dependentes, x_{it} representa o vetor ($T \times 1$) da variável dependente, Y_{it} a matriz ($T \times K_i$) da variável independente, β_i o vetor ($K_i \times 1$) dos coeficientes, ε_i o vetor ($T \times 1$) dos erros aleatórios.

O melhor sistema de equações simultâneas deve ser selecionado com base no nível de significância dos parâmetros e na análise dos resíduos (PARAJULI; ZHANG; CHANG, 2016; YU; YOO; BAEK, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As decisões metodológicas são fundamentais para a realização da ciência empírica. Conforme Popper (2013), pode-se classificar a pesquisa de acordo com os seus métodos, ou seja, de acordo com a maneira em que os dados são tratados, o que é feito com eles e qual o tipo de técnica aplicada para analisá-los. Neste capítulo, são apresentadas a natureza e abordagem da pesquisa, além da sua classificação em relação aos objetivos e aos procedimentos metodológicos utilizados.

Segundo Gil (2010), a presente pesquisa classifica-se quanto a sua natureza como aplicada, por apresentar a utilização de um método específico e por possuir objetivos descritivos, pois tem como foco caracterizar e analisar as interações entre as fontes geradoras da matriz elétrica brasileira. Quanto à abordagem, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa, dado que se apoia em testes e modelos econométricos para caracterizar as inter-relações entre as fontes da matriz brasileira (LAKATOS; MARCONI, 2017). Com base em seus objetivos, a pesquisa classifica-se como explicativa, pois se preocupa em identificar e explicar motivos que alteram ou impactam a geração de energia por diferentes fontes (ANDERSEN; HEPBURN, 2016).

Em relação ao seu delineamento, a pesquisa pode ser classificada como bibliográfica, documental e correlacional. Classifica-se bibliográfica por apresentar materiais já publicados, como livros e artigos científicos (ESTRELA, 2018). A pesquisa também se classifica documental, pois utiliza, como fonte de informação, arquivos secundários, por exemplo, planilha de dados estatísticos. A pesquisa pode ser considerada correlacional, porque avalia a existência de relação entre variáveis, após a ocorrência do fato (BLACK, 2018).

Os resultados da pesquisa são apresentados na forma de dois artigos. No primeiro, é abordada uma Revisão Sistemática de Literatura sobre a matriz energética e as principais fontes geradoras utilizadas, a fim de analisar o panorama das publicações científicas relacionadas ao tema e as fontes emergentes para geração de energia no mundo. No segundo, são avaliadas quais fontes impactam a geração de energia elétrica no Brasil e analisados os efeitos das interações entre as fontes quando simulados cenários de geração.

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Neste tópico, são apresentados os procedimentos metodológicos da pesquisa, que foram empregados a fim de alcançar os objetivos propostos, além das variáveis e a base de dados.

3.1.1 Base de dados

A pesquisa possuiu como foco a quantidade de energia elétrica gerada pelas usinas que compõem o SIN. Os valores mensais foram apresentados em gigawatt-hora (GWh) e diferenciados pelas fontes geradoras: biomassa, carvão, combustíveis, eólica, gás natural, hidráulica e nuclear. Os dados em análise são oriundos da ANEEL e disponibilizados na base de dados abertos, com valores referentes ao intervalo entre janeiro de 2000 e junho de 2019, contabilizando 234 observações (ANEEL, 2019).

Foram analisadas sete séries temporais da geração de energia elétrica em fontes renováveis e não renováveis. A quantidade de energia gerada pelas fontes biomassa, eólica e hidráulica foram tratadas como as séries das fontes renováveis, enquanto que a geração das fontes carvão, combustíveis, gás natural e nuclear foi considerada como as fontes não renováveis.

3.1.2 Metodologia

A fundamentação metodológica da pesquisa utilizou como base a Revisão Sistemática de Literatura e a modelagem econométrica. Neste tópico, é apresentado o roteiro dos passos metodológicos, a fim de encontrar resultados que satisfaçam os objetivos propostos nesta pesquisa.

Para elaboração da Revisão Sistemática de Literatura, primeiramente, necessitou-se formar o *corpus* da pesquisa, por meio da busca de publicações científicas relacionadas ao tema matriz energética, nas bases referenciais *Web of Science* e *Scopus*. Para obter o *corpus* final, o qual representa a amostra de documentos utilizada para a revisão, foi necessário aplicar critérios de inclusão e de exclusão, como análise de aderência ao tema da pesquisa e fator de impacto do periódico.

Após formado o *corpus* da pesquisa, o próximo passo foi analisar aspectos gerais dos documentos, como estatísticas descritivas das publicações, análise de produtividade dos periódicos e dos autores ao longo do período de análise. Além dessas, a análise de cocitação foi aplicada às referências do *corpus*.

Para finalizar a revisão, foi elaborada uma análise de conteúdo com base na frequência em que as palavras apareceram. Com essa análise, foi possível identificar as principais palavras utilizadas em títulos e resumos, as fontes geradoras de energia mais analisadas pelos estudos, os métodos mais aplicados e os principais métodos de gestão contemplados nas matrizes energéticas.

Para analisar as interações entre as diferentes fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, foi ajustado um sistema de equações simultâneas. Para tanto, o primeiro passo da modelagem econométrica caracterizou a verificação da estacionariedade das séries de geração de eletricidade com base na aplicação dos testes de raiz unitária ADF e KPSS. Como as séries mostraram-se não estacionárias, foi necessário diferenciá-las por meio da aplicação d de diferenças, as quais foram indicadas pelos resultados dos testes.

O passo seguinte foi determinar o número de defasagens a serem utilizadas na modelagem do sistema de equações. Com esse intuito, foi ajustado um modelo VAR inicial, com as variáveis em suas primeiras diferenças, no qual as defasagens significativas foram identificadas por meio do *Lag Length Criteria*.

Como o sistema de equações simultâneas permite avaliar o efeito que as variáveis independentes exercem sobre a variável dependente, foi necessário classificar as variáveis em endógenas e exógenas, com base no teste de Causalidade de Granger. Esse teste permitiu verificar se as observações passadas de uma determinada variável poderiam ser utilizadas para explicar variações nos valores de outra variável.

Após determinar o número de defasagens significativas e as variáveis endógenas e exógenas do sistema, os parâmetros das equações simultâneas foram estimados com o SUR, por ser um estimador superior ao modelo VAR e mais eficiente por incluir apenas os parâmetros significativos no sistema. Com o objetivo de selecionar o melhor sistema de equações simultâneas, o nível de significância dos parâmetros e os resíduos do sistema foram avaliados. Nos casos em que houve parâmetros não significativos, os mesmos foram retirados das equações para que a modelagem do sistema fosse feita novamente até o momento em que um sistema com todos os parâmetros foi congruentemente ajustado.

O último passo foi elaborar cenários da geração de eletricidade no Brasil, os quais foram simulados com base nas perspectivas otimista e pessimista. A simulação se baseou na estimativa estocástica para avaliar as inter-relações existentes entre as fontes da matriz elétrica brasileira. Para o cenário otimista, foi considerado um aumento de 10% da geração das fontes renováveis e a diminuição de mesma amplitude da participação das fontes não renováveis na matriz brasileira. De modo oposto, o cenário pessimista avaliou o aumento de

10% da geração das fontes não renováveis e a diminuição da geração renovável na mesma proporção.

Dessa forma, conhecer as variáveis que integram o sistema, a estacionariedade, as suas inter-relações e as defasagens significativas foram informações necessárias para realizar o ajuste do sistema de equações simultâneas de maneira mais assertiva.

A ordenação das etapas metodológicas pode ser melhor compreendida por meio do fluxograma a seguir.

Figura 3 – Matriz de amarração da metodologia, objetivos e questões da pesquisa

Modelo Teórico	Objetivos da Pesquisa	Questões da Pesquisa	Técnicas de Análise
<p>Amostragem do <i>corpus</i> da pesquisa para Revisão Sistemática de Literatura</p> <p>↓</p> <p>Análise dos resultados</p> <p>↓</p> <p>Análise textual</p>	<ul style="list-style-type: none"> Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura das publicações científicas sobre o tema matriz energética e determinar as opções futuras para a geração de energia 	<ul style="list-style-type: none"> Qual é o estado da arte das publicações científicas referentes à matriz energética e quais são as fontes geradoras emergentes? 	<ul style="list-style-type: none"> Protocolo de Revisão Sistemática de Literatura; Análise descritiva; Análise da produtividade: <ul style="list-style-type: none"> Periódicos Autores Frequência de aparição das palavras.
<p>Análise da estabilidade das séries de geração de energia elétrica</p> <p>↓</p> <p>Ajuste do Sistema de Equações Simultâneas</p> <p>↓</p> <p>Elaboração de cenários</p>	<p>Elaborar cenários da geração de energia elétrica no Brasil por diferentes fontes:</p> <ul style="list-style-type: none"> Identificar as inter-relações existente entre as principais fontes da matriz elétrica brasileira; Elaborar cenários otimista e pessimista da geração de energia elétrica no Brasil por diferentes fontes; Avaliar os impactos na geração de eletricidade de cada fonte para cada cenário. 	<ul style="list-style-type: none"> Quais as fontes da matriz elétrica brasileira que realmente impactam a geração de eletricidade no país e quais períodos passados possuem efeito sobre essa geração? 	<ul style="list-style-type: none"> Testes de raiz unitária: <ul style="list-style-type: none"> ADF KPSS <i>Lag Length Criteria</i>; Causalidade de Granger; Estimação com SUR; Simulação dos cenários: <ul style="list-style-type: none"> Otimista Pessimista

Fonte: Autor (2019).

A presente metodologia foi aplicada a fim de determinar o estado da arte das publicações sobre matriz energética e avaliar os efeitos das inter-relações da quantidade de energia elétrica gerada por diferentes fontes em cenários de geração.

Os próximos capítulos apresentarão os resultados da pesquisa, subdivididos em dois artigos científicos.

4 ARTIGO 1 - ENERGY MATRIX AND GENERATING SOURCES: AN EVALUATION OF THE LITERATURE ART STATE

Bianca Reichert, Adriano Mendonça Souza

Abstract: Several researches highlight the strategic importance of Energy Matrix for a country, as well as the use of more renewable and sustainable sources. This research aimed at presenting a Systematic Literature Review (SLR) on energy matrices, based on scientific documents about energy generation and its main sources. After research protocol application, the research corpus was formed by 48 documents from 30 different sources classified in articles and reviews. The analysis interval was from January 1998 to April 2019. The largest number of documents was originated in Brazil and the most widespread journals in this area are Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy Policy and Renewable Energy. We identified that the future trend is to increase the use of biomass source in the world energy matrix and further options are hydrogen, electrochemical systems and spatial-temporal analysis. However, studies pointed to actions in order to keep energy generation stable, such as the use of thermoelectric sources and the development and expansion of public policies to expand the use of renewable sources.

Keywords: energy matrix; generation sources; systematic review.

4.1 INTRODUCTION

Fossil fuels are the most widely used sources in the world energy matrix, since transportation depends on petroleum products and electricity generation comes mainly from coal and natural gas thermoelectric plants (LLERENA et al., 2019). However, their use implies devastating consequences, such as greenhouse gas production and unsustainable energy generation (SANCHEZ; VÁSQUEZ; VILORIA, 2018).

Renewable sources are the solution for energy matrices, which became more sustainable and less dependent on nonrenewable sources. Brazil is one of the most advanced countries in this field having, in 2017, 80.40% of its electricity generated from renewable sources, which characterizes one of the world's most renewable electric matrices (EPE, 2018).

A country energy matrix is made up of all sources that generate energy, such as transportation or electricity (YAO; ZHANG; ZHANG, 2019). Since the energy matrix composition reflects its competitiveness in the world scenario, the country's main goal is to generate sustainable energy.

To understand the world energy landscape, a search for reviews was conducted in the Web of Science base, using the query TS= (("energy matrix*" AND ("power generation*" OR "energy generation*")) AND ("review*" OR "systematic review*" OR "systematic literature review*")), and six documents which focused on only one generating source and its participation in the energy matrix were found. These studies also conducted reviews on the application of distributed energy generation, energy management analysis in industries and current legislation checking in this sector (GOMES et al., 2013; BERNAL et al., 2017; FERREIRA et al, 2018; AMOROSO; ANDO, 2018; CAMARGO; STOEGLEHNER, 2018; FREITAS et al., 2019). Therefore, previous reviews did not intend to analyze energy matrices completely, considering all the used sources and the applied management strategies. This study is relevant as a way to know energy matrices over the world and future options of generating sources to support management strategies, ensure energy sustainability and keep up with its growing demand.

This research main goal is to perform a scientific publications Systematic Literature Review (SLR) related to energy matrix and generation sources.

The following questions should be answered:

Question 1: What is the art state of energy matrix studies?

Question 2: What is the future of energy matrices and what are the emerging generating sources?

Question 3: What strategies are used for energy matrix management?

This paper is structured in five sections: the first one refers to a brief introduction to the topic; the second one presents a literature review with main definitions; the third one brings methodology; the fourth one concerns the presentation and analysis of results and the fifth one deals with the final considerations and recommendations for future research development.

4.2 ENERGY MATRIX

Energy comes from natural resources called energy sources, which together form the energy matrix. Similarly, the electrical matrix is composed by all sources responsible for generating electricity (SMIL, 2019).

Since the Second Industrial Revolution, the world energy matrix has been dependent on nonrenewable sources, especially oil products (FISHER-KOWALSKI et al., 2019). However, with increased attention to greenhouse gas emissions (GHG), climate changes and the imminent lack of natural resources, there is a demand for energy matrix to be more sustainable (GANIVET, 2019; MUKHI; QUENTAL, 2019).

To generate energy in a sustainable and efficient way, energy matrix needs to be planned, once it contributes to strategic decision making in the sector. This planning can be based on scientific studies, demand and generation capacity forecasting and scenario design. Therefore, mathematical modeling can be a great ally of energy planning (MORAES et al., 2018).

Brazil is an advanced country in this issue, emerging as one of the most renewable energy sources users in the world (EPE, 2018). Its renewable matrix is caused by the large utilization of the country water potential, generating energy from hydropower (FERREIRA et al., 2016).

Other renewable growing sources in the world panorama are: the wind, solar photovoltaic panels, geothermal one, solar thermal one and waves (CAMPBELL; MONTERO; LAMBERT, 2010; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Biomass is also considered a renewable source by the use of waste to generate electricity and biofuels to transport products and people (BROWN, 2019).

Looking at the global energy matrix sources and, according to the International Energy Agency (2019), total energy supply in the world in 2017 was from: oil (31.8%); coal (27.1%); natural gas (22.2%); biofuels and waste (9.5%); nuclear plants (4.9%); hydropower (2.5%); as well as wind and solar sources (1.8%). So, more than half of the world's energy comes from

nonrenewable sources, which should call our attention and efforts to make energy matrix more sustainable and efficient (DARDA; PAPALAS; ZABANIOTOU, 2019).

4.3 MATERIALS AND METHODS

Systematic Literature Review (SLR) is an analyzes conducted on referential bases, such as Web of Science and Scopus, to verify emerging topics and methodologies in the interest area. SLR should always be guided by a research question, which in this case is to identify the state of art of energy matrix studies and the used main sources.

This SLR and analysis were based on the research protocol rigor established by Tranfield, Denyer and Smart (2003). This protocol consists of establishing a research question, a sample from document population and strategies for document inclusion and exclusion in the research corpus (RIUS-SOROLLA et al., 2017). The protocol applied is detailed in Figure 1. The methodological steps, such as sampling and data analysis, are explained in the following topics.

4.3.1 Research Corpus Sampling

The documents were searched in the Web of Science database, which covers the database as Science Citation Index Expanded, Social Sciences Citation, Arts & Humanities Citation Index, Conference Proceedings Citation Index (Science), Conference Proceedings Citation Index, Social Science & Humanities, Emerging Sources Citation Index, Current Contents Connect, Derwent Innovations IndexSM, KCI, Russian Science Citation Index, SciELO Citation Index, Cambridge University Press, Elsevier, Springer, Wiley-Blackwell and Nature Publishing Group. In addition to these, the Scopus database was also used to search documents. The search was performed from January 1998 to April 2019.

For the search process, we used the string: TS=(“energy matrix*” AND (“power generation*” OR “energy generation*”). The search string was applied to the Web of Science and Scopus databases.

As inclusion strategies, only documents classified as articles and reviews were selected. Exclusion criteria were duplicity, document adherence analysis to the research theme through reading articles, the Scimago Journal & Country Ranking (SJR) classification as fourth quartile (Q4) and unrated articles by the SJR.

Trough inclusion and exclusion strategies, it was possible to obtain a research corpus with 48 documents. Research design as well as the Corpus refinement steps can be seen in the flowchart in Figure 1.

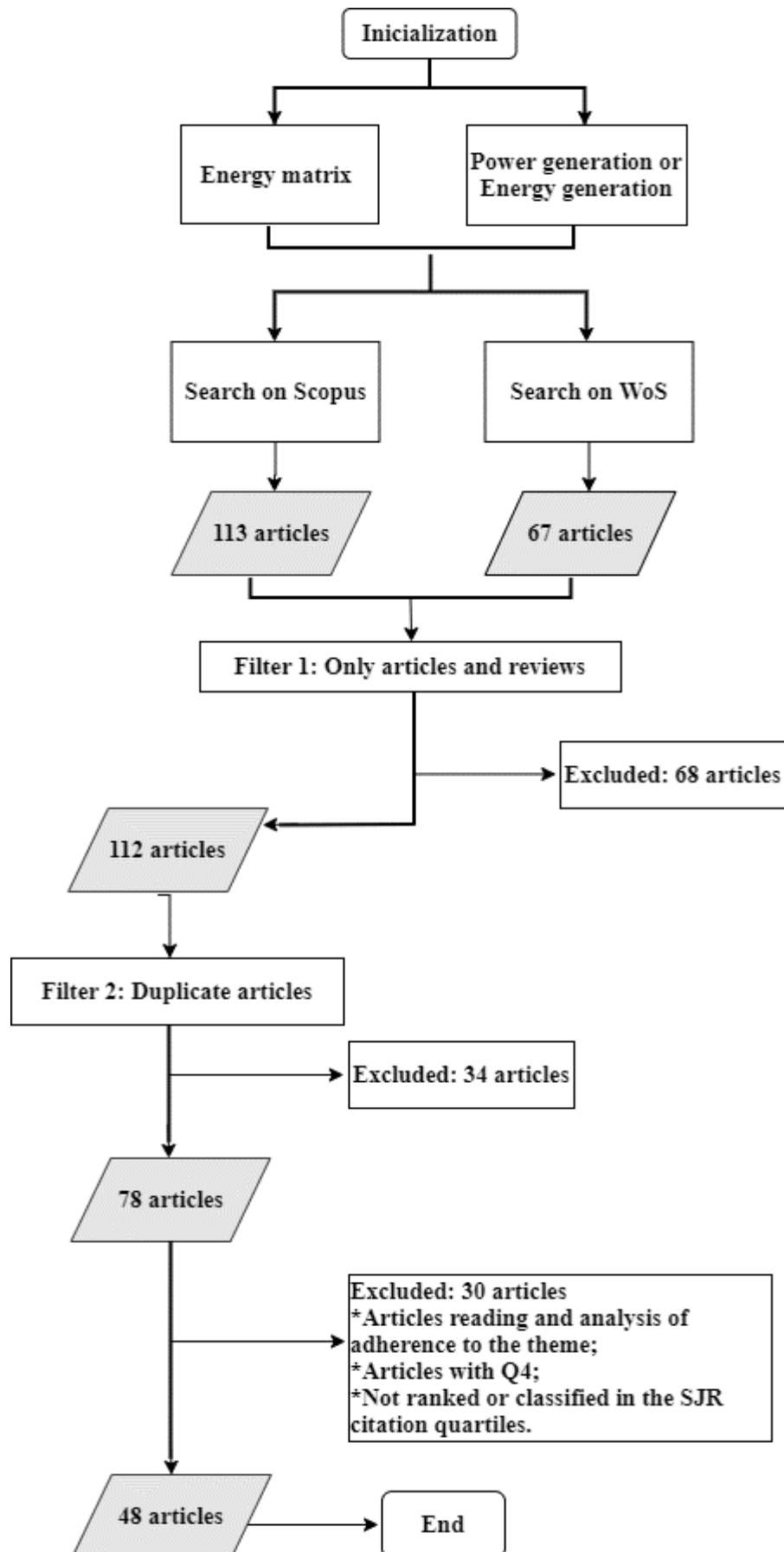


Figure 1: Flowchart of applied research protocol and corpus design

4.3.2 Data Analysis

This step is related to knowledge dissemination to all scientific fields and provides a detailed analysis of document characteristics. The analyzes were performed using the RStudio software and its tool Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017), VOSViewer software and electronic spreadsheets.

In the first stage, descriptive characteristics of the corpus were observed, such as number of documents, sources and authors, and geographical distribution of scientific production. As productivity analysis, we evaluated: the most influential journals on the subject; the authors with the most publications; the co-authorship composition; the most cited references by means of the cocitation analysis.

Finally, a content analysis was performed to verify the most used words in the titles, abstracts and keywords, the most evaluated generating sources by the studies and the management strategies applied to the energy matrices.

4.4 RESULTS

The results, based on the research corpus, were divided into three analysis: Descriptive; Productivity; Content.

4.4.1 Descriptive Analysis

This topic presents general information about the textual corpus, which consists of 48 documents from 30 different sources. The documents were classified in articles (40 docs) and reviews (8 docs) written by 164 authors. The analysis interval was from January 1998 to April 2019.

In relation to the temporal conception, we can conclude that energy matrix is a topic of recent interest in literature. Since 2016, the theme has had its number of publications driven by sustainability concern and efficient use of natural resources (Figure 2). Until this research was conducted, 2018 had the largest number of publications (14 docs).

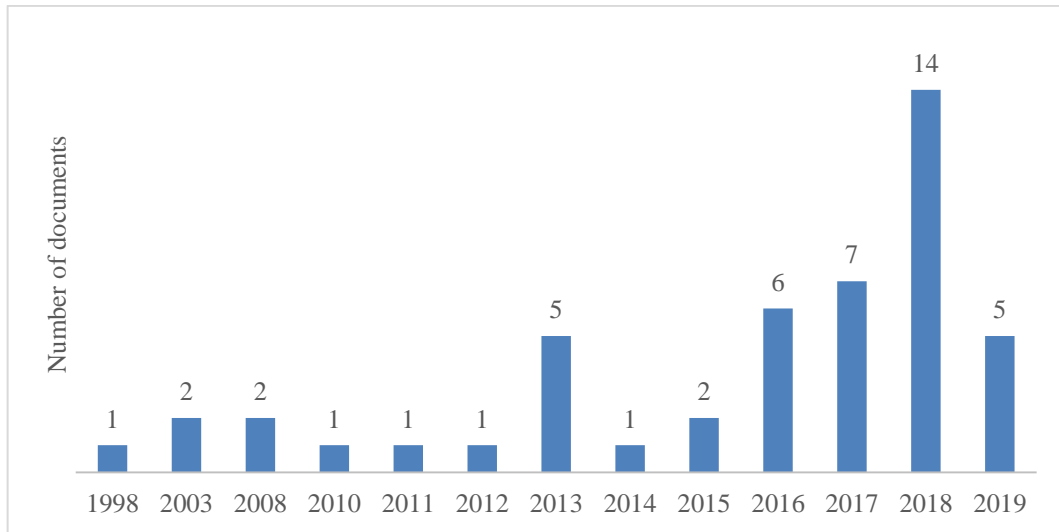


Figure 2: Annual scientific production

The first paper, elaborated by Braga, Rocha and Tundisi (1998), analyzed alternatives to reduce environmental and social damage in hydropower generation in Brazil by review. The authors concluded that energy conservation is a typical nonstructural measure to increase energy supplies. On the other hand, papers published in 2019 contain analysis of biomass, wind and solar electric generation, using modeling and scenario simulations (SARMIENTO et al., 2018; FREITAS et al., 2019; LLERENA et al., 2019; REBOUÇAS et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019). The referred papers encourage these sources expansion as alternatives to energy matrices.

Geographically analyzing the corpus scientific production, we can see that Brazil gives greater contribution than other countries (77%). The second largest contributions are from Colombia, Germany, Austria and USA. Other countries highlighted on the map in Figure 3, such as Argentina, Ecuador, India, Poland, Switzerland, Uruguay and Venezuela, contribute with only 1%.

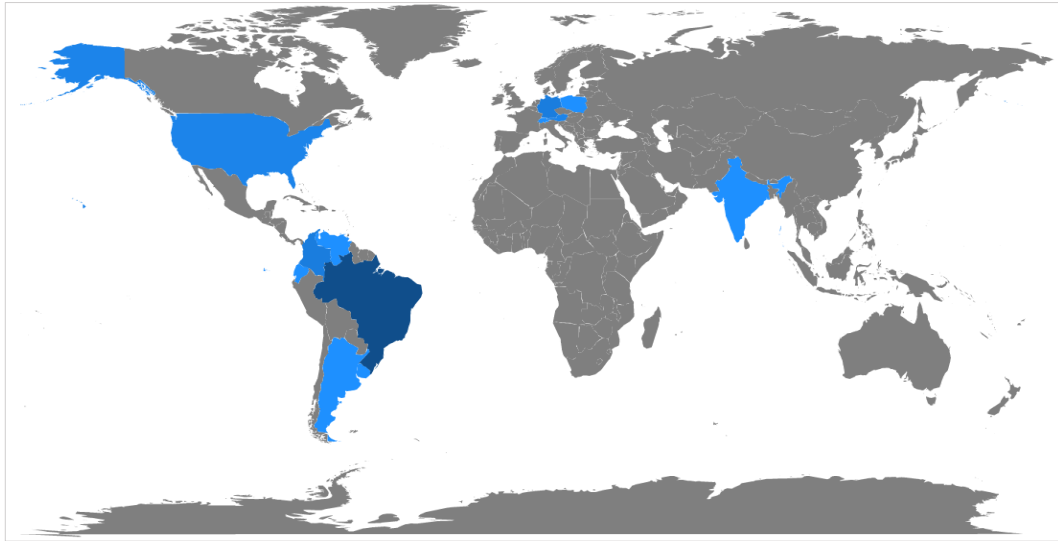


Figure 3: Geographical distribution of scientific production

Brazil's contribution to the theme might be justified by its energy matrix renewal capacity (EPE, 2018). Another fact that boosted scientific research in the country's electricity sector was the Incentive Program implementation for Alternative Energy Sources – PROINFA in 2002, which encourages wind, biomass and small-scale hydro generation (DUTRA; SZKLO, 2008). Guidelines and regulation about expanding the renewable source use are also being instituted by the Brazilian Agency of Electric Energy – ANEEL, creating the need to analyze future scenarios for energy matrix (BIERNASKI; SILVA, 2018; FERREIRA et al., 2018; FREITAS et al., 2019).

4.4.2 Productivity Analysis

This analysis consists of verifying the most used sources and their publication evolution over the years, the authors who published the most, the authorship composition and the most cited authors by the corpus.

4.4.2.1 Productivity of Journals

About the journals, we can highlight four with the largest number of publications: Journal of Cleaner Production (5 docs); Renewable and Sustainable Energy Reviews (5 docs); Energy Policy (4 docs); Renewable Energy (4 docs). Based on their H-indexes, these journals also represent the sources of greatest impact.

According to Bradford's Law (1934), Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy Policy and Renewable Energy form Zone 1 of the

corpus sources, which is responsible for producing most of the references used in the area, as exemplified in Figure 4 (GARG; SHARMA, 1994).

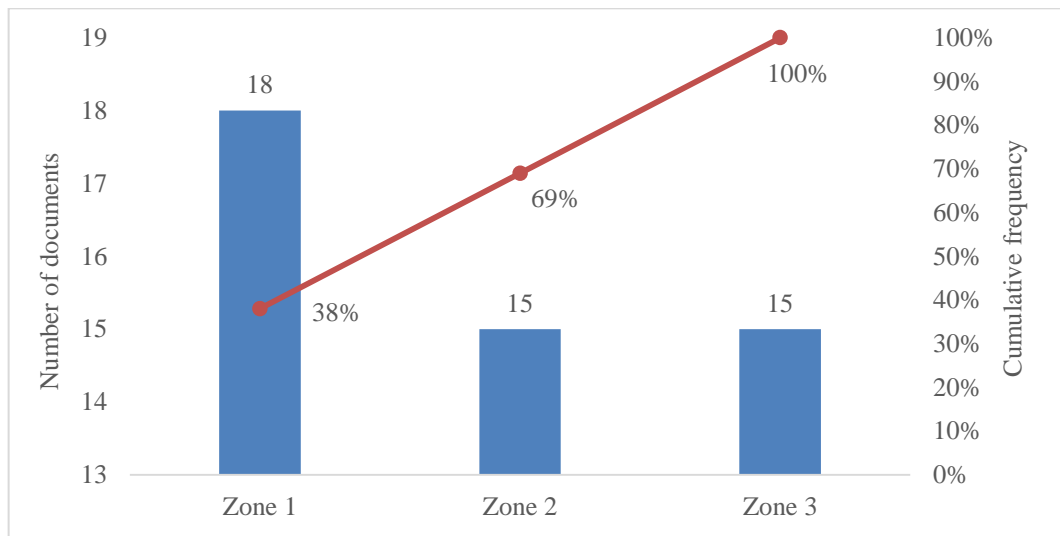


Figure 4: Bradford's Law chart of journal productivity

While Zone 1 has 4 journals with up to 5 articles in the corpus, Zone 2 represents 11 journals with 1 to 3 articles and Zone 3 contains 15 journals with only one document in the corpus.

Based on Zone 1 journals (Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Energy Policy, Renewable Energy), the main subject areas are sustainability, the environment, energy resources and their applications, cleaner production, legislation and policy. All of these journals are published by Elsevier and have higher CiteScore than 5.4, which represents the average citations annual number of recent articles published in these journals (James et al., 2019). Renewable and Sustainable Energy Reviews was also the most cited journal by the corpus (70 docs), as it is an important vehicle for spreading new studies and knowledge in the field of renewable and sustainable energy.

First Zone 1 publications were in 2008 in the Energy Policy and Renewable Energy journals, by Fernandes et al. (2008) and Dutra and Szklo (2008), respectively. At the same time one document encouraged natural gas maintenance as a source of electricity, the other one analyzed policy to encourage the implementation of alternative sources.

Over the past ten years, we can see the evolution of Zone 1 publications, the stabilization of Zone 2 average publications, and the beginning of Zone 3 publication decline (Figure 5).

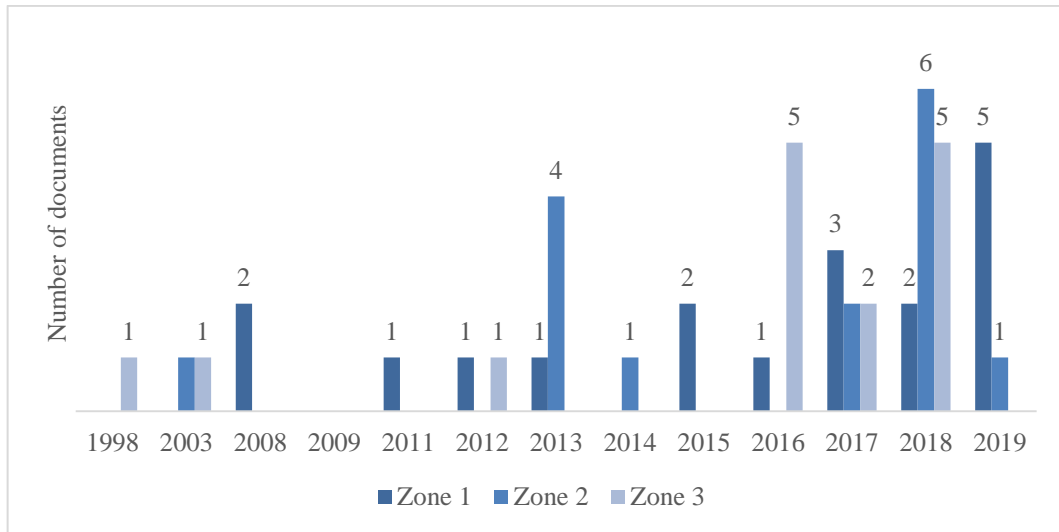


Figure 5: Annual scientific production based on corpus source zones

4.4.2.2 Authors' Productivity

Authors' productivity can be measured by Lotka's Law (1926), because it establishes a proportional relationship between the number of authors who published a certain number of documents and the number of authors who published only one document (SILVA et al., 2019). In this research corpus, Lotka's Law was confirmed, since 93.90% of the authors (154 authors) published only 1 article, while 0.60% of the authors published 3 articles.

The author who published 3 articles was R.M. Barros, but in none he is the main author. All documents were developed in the Brazilian energy matrix, focusing on the power generation sector. In the first document, authors analyzed solar energy and environmental liabilities associated with photovoltaic module manufacture, using Life Cycle Assessment (LCA) (TIAGO FILHO et al., 2016). In consecutive documents, authors studied greenhouse gas emissions avoided by biomass and wind generation, using modeling and scenarios (BERNAL et al., 2017; RAIMUNDO et al., 2018).

Another way to analyze authors' productivity is to verify authorship composition, which can be quantified by the number of co-authors. Co-authoring means the sharing of data, equipment or ideas by a group of researchers, where the division of labor leads to reduced development time and improved research quality (KELLY; DOYLE; PARKER, 2020). Authorship composition percentage is exemplified in Figure 6.

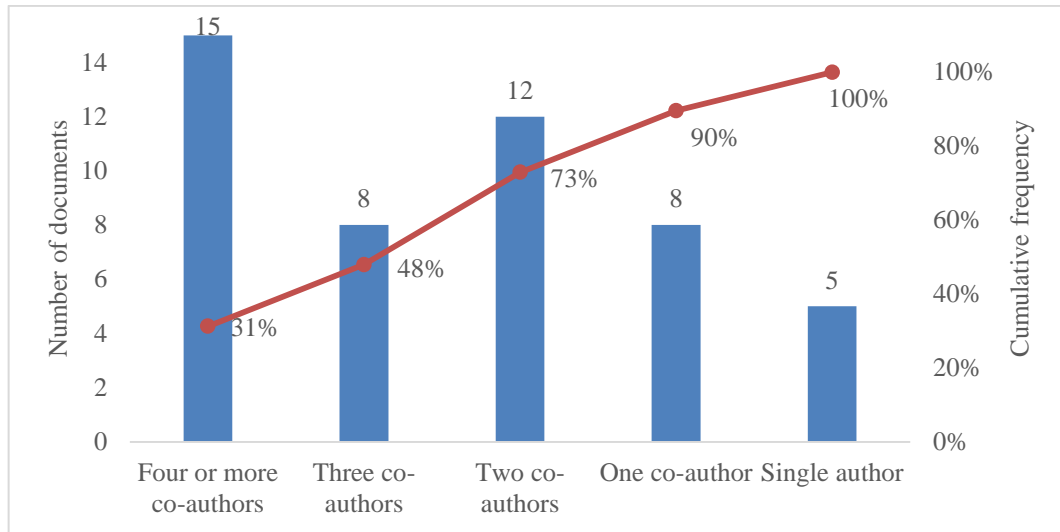


Figure 6: Authorship composition chart

Most corpus documents are written by several co-authors and just few ones are written by single authors (5 docs). The single authors conducted reviews or regulation studies for natural gas, wind, biomass and renewable sources in general (BAHIA, 2003; GROB, 2003; MELO, 2013; LOPEZ, 2016; MORENO, 2017). In the study by Moreno (2017), an important question for discussion is raised: guarantee of energy security.

Among the several co-authors, we can highlight the authors who have always worked together and have more than one document in the research corpus. The first cluster is formed by five authors, such as L.R.A. Ferreira, R.B. Otto, S.N.M. de Souza, S.S. de Souza and O.H. Ando Junior, who studied the use of biomass generation in the Brazilian electric matrix (FERREIRA et al., 2018; FREITAS et al., 2019). The second cluster is composed by G.L. Tiago Filho, R.M. Barros e I.F.S. dos Santos, who addressed solar and wind energy (TIAGO FILHO et al., 2016; RAIMUNDO et al., 2018). The last cluster is formed by E.B. Pereira e F.R. Martins, who analyzed the impacts of wind source on the Brazilian energy market (PES et al., 2017; PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

4.4.2.3 Cocitation Analysis

The references can be used by researches as devices to support the scientific arguments and conclusions (POPPER, 2013). In this case, the corpus most cited document was the study developed by Salomon and Lora (2009), which estimated the electricity generation from different biomass substances.

Another method used to verify authors' productivity in relation to their article citations is cocitation analysis, which represents the frequency that two or more documents or authors

are cited together in scientific production (BU; HUANG; LU, 2019). A density map was elaborated based on the cited reference cocitation analysis that were at least cited twice by the corpus (Figure 7).

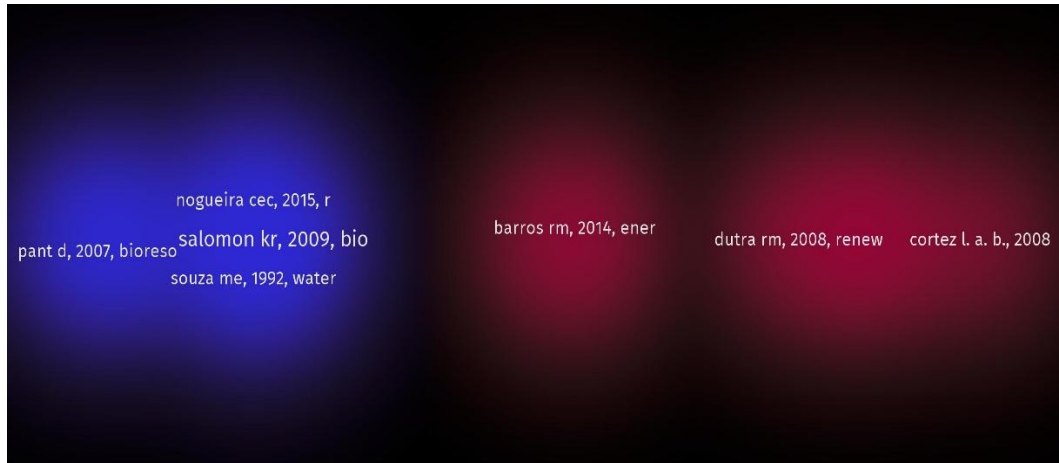


Figure 7: Cocitation density map of the cited references

The map features two reference groups, one highlighted in blue and the other one in red. The first cluster is composed by four documents, one of them is the most cited document, dealing with biomass generation, effluent treatment and anaerobic digestion (SOUZA; FUZARO; POLEGATO, 1992; PANT; ADHOLEYA, 2007; SALOMON; LORA, 2009; NOGUEIRA et al., 2015). The second one is formed by three documents, which besides analyzing the biomass generation, it also analyzed the wind power incentive policies (CORTEZ, 2008; DUTRA; SZKLO, 2008; BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014).

4.4.3 Content Analysis

This topic presents the corpus content analysis, based on the word frequency appearance and the most addressed subjects by the authors (BARDIN, 2011; WANG; DENG; WU, 2019).

As a visual tool, word clouds are used to describe hierarchical list of words, where the size of each word is proportional to the number of appearances, according to Zipf's law (1945). Word clouds were elaborated based on the top 10 words which most appeared in the titles, abstracts and keywords. They are presented in Figure 8.

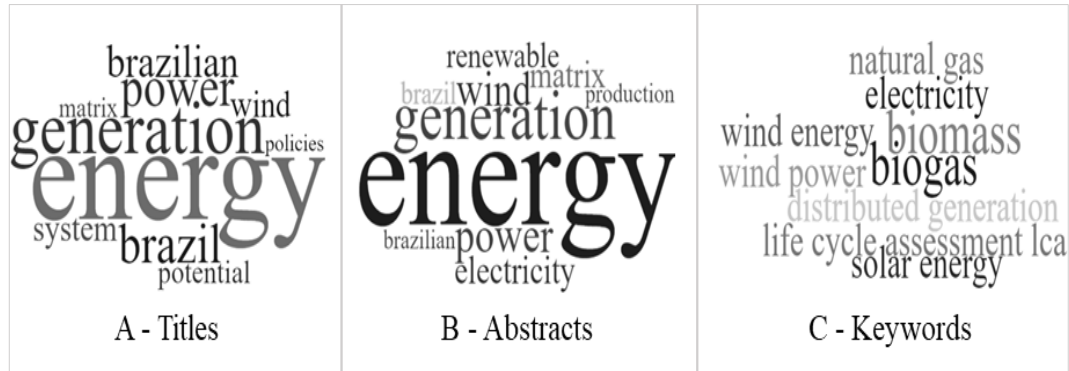


Figure 8: Top 10 most used word clouds in titles, abstracts and keywords

The word “energy” was the most cited in the corpus articles titles and abstracts, with 29 and 225 appearances, respectively, followed by the word “generation”, present in 16 titles and 100 times in abstracts. The abstract word cloud had words with the same appearances proportion.

Dendrogram chart can be used to visualize the relationship among words and their similarities, as well as to check words that appear the most (FARAHANI et al., 2019). In this case, a dendrogram was developed using the words that most appeared as keywords and applying the Multiple Correspondence Analysis (Figure 9).

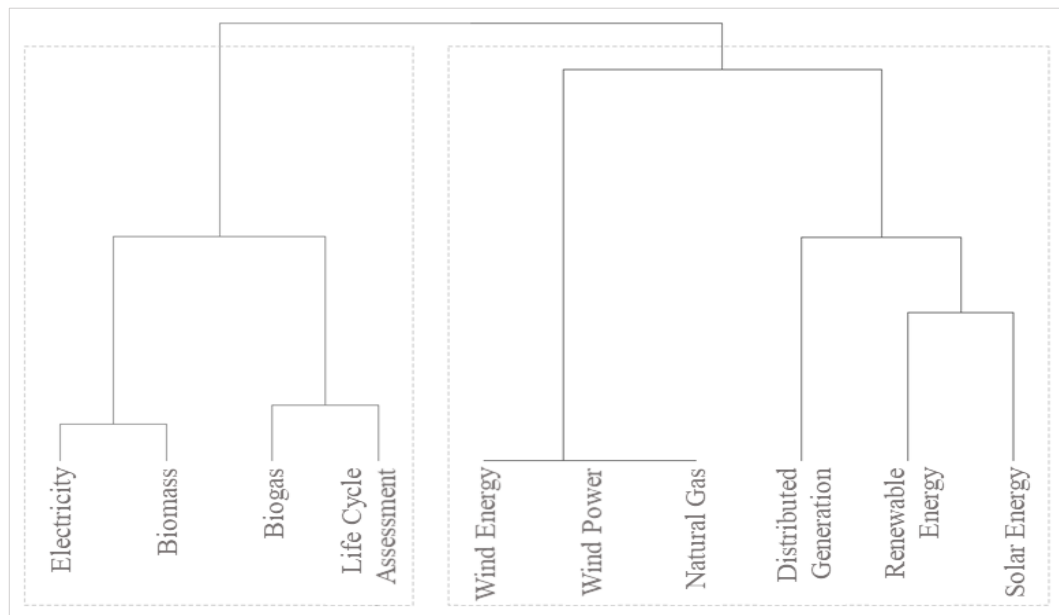


Figure 9: Dendrogram chart of the most used top10 words as keywords

As we can see in Figure 9, the most similar words are “wind energy”, “wind power” and “natural gas”. Furthermore, the chart determines two clusters, the first one is characterized by electricity, biomass, biogas and LCA.

The research corpus evaluated a wide variety of sources over the period analyzed. Source annual correspondence analyzed by the corpus can be analyzed in Figure 10.

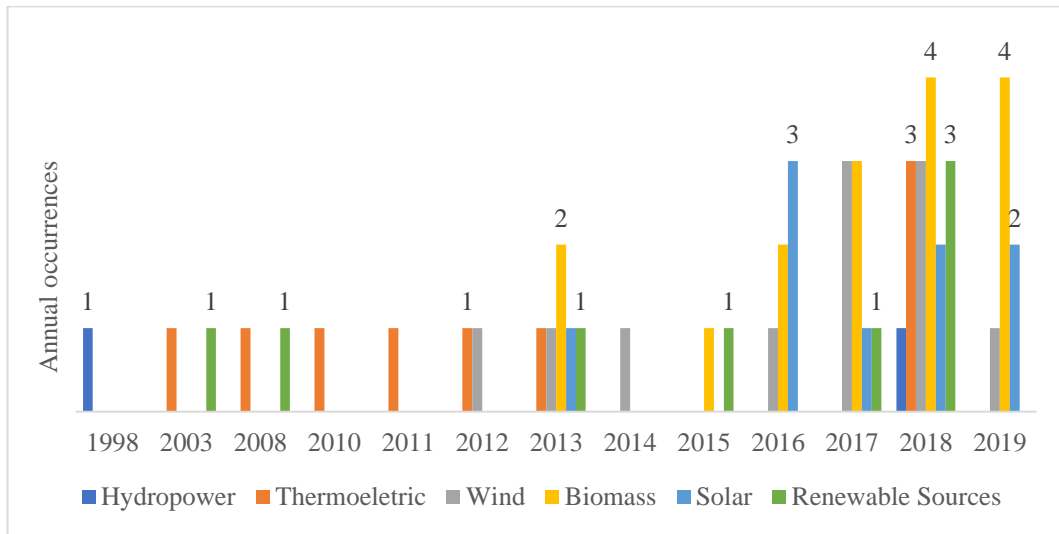


Figure 10: Source annual correspondence analyzed by the corpus

The analyzed sources were: hydropower; thermoelectric; wind; biomass; solar; renewable sources in general. We concluded that there has been an increase in studies involving biomass, renewable sources in general and thermoelectric, the beginning of the decrease in focus on solar and wind generation, and the stagnation of studies involving hydropower.

In Figure 10, the most studied sources were biomass, wind and solar. In terms of research, biomass is the fastest growing source and a future option to diversify the electric matrices. According to the corpus, the substances used to generate energy from biomass were waste, effluents, sugarcane, soybean, vinasse, rice husk, elephant grass and wood (FAE et al., 2013; REIS et al., 2013; FONTOURA; BRANDÃO; GOMES, 2015; JOPPERT et al., 2017; MEDELLIN; HIDALGO; CORREIA, 2018; CONTRERAS et al., 2018). In Figure 11, we can see a proportional scheme of the most studied sources by the corpus and the generating substances used.

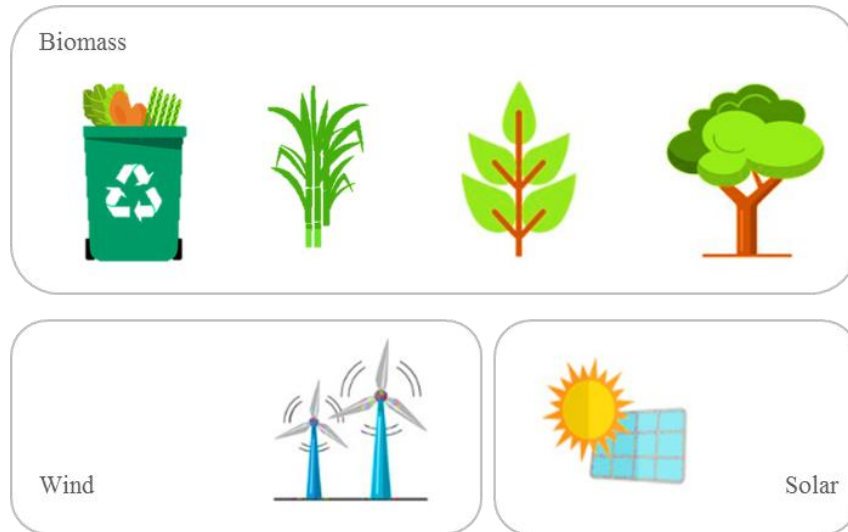


Figure 11: Scheme of the most studied sources and the substances used in the corpus

Studies involving wind generation were based on wind farms, and studies on solar energy were applied to residential units and solar plants (TRAPP; RODRIGUES, 2016; PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016). While for solar power there are studies on the economic viability of domestic photovoltaic systems and concerns about panel recycling, for wind energy there are studies to predict power generation based on climate factors (MORAES et al., 2017; TAKIGAWA et al., 2016; TIAGO FILHO et al., 2016; FARIA JR; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017; ALENCAR et al., 2017; JOSHI; TIWARI, 2018; GARCIA; NOGUEIRA; BETINI, 2018).

Future options were also pointed out by the articles, such as hydrogen that can gradually replace natural gas in thermoelectric generation, electrochemical system implementation for energy conversion and spatial-temporal analysis to perform integrated spatial energy planning (PATRICIO et al., 2012; MORAIS; GOMES; HUGUENIN, 2018; CAMARGO; STOEGLEHNER, 2018).

The most used methodologies in the studies were review, scenario simulation and mathematical modeling, such as linear and nonlinear programming, hybrid modeling, probability density function and life cycle assessment (SILVERIO; LAMAS, 2011; RODRÍGUEZ et al., 2013; SILVA; GRAH; PONCIANO; BOTREL, 2014; GUERRA et al., 2015; REBUTINI; MANCINI, 2018; VAZQUEZ et al., 2018; LÓPEZ-GONZÁLEZ; DOMENECH; FERRER-MARTÍ, 2018).

Management strategies of the corpus energy matrices were analyzed to complement the methodological analysis, as listed in Figure 12.

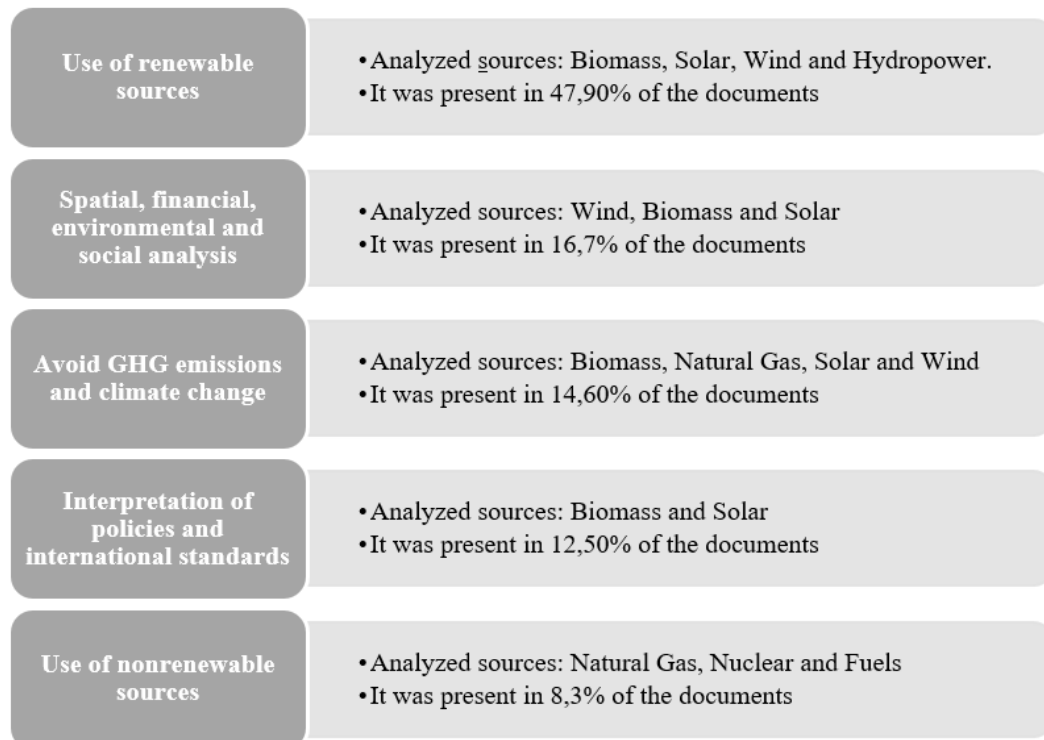


Figure 12: Scheme of management strategies of the corpus energy matrices

The most applied management strategy was to increase the use of renewable sources in energy matrices, while the use of nonrenewable sources was the least analyzed strategy. The other strategies were applied to a lesser extent by the analyzed matrices.

Some studies have emphasized the need to implement policies that accelerate the renewable process development to increase the sector competitiveness and sustainability (JUNQUEIRA; CAVALETT; BONOMI, 2016). In addition, studies suggest the use of non-petroleum natural gas and data envelopment analysis to verify energy matrix efficiency, reducing CO₂ emissions and energy generation costs (FROTA; ROCHA, 2010; SANCHEZ; VÁSQUEZ; VILORIA, 2018).

4.5 CONCLUSIONS

Energy is a worldwide strategic factor and energy matrix management can guarantee the sustainable use of natural resources. Energy matrix is made up of all the sources that generate electricity and transport products. Source renewal capacity reflects a country competitiveness in the world scenario.

This research main goal was to perform a systematic literature review of scientific publications related to energy matrix and generation sources. The research corpus was formed

by means of a research protocol, which consisted of 48 documents, with analysis interval from January 1998 to April 2019.

Brazil has great influence in this research area, as it was the country that presented the largest number of documents. This can be explained by the Brazilian energy sector policies and the renewable characteristics of its electric matrix.

The most widespread journals in the area are *Journal of Cleaner Production*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Energy Policy* and *Renewable Energy*, which represented Zone 1 of corpus sources.

As an answer to one of the research questions, we identified that the future trend is to increase the use of biomass source in the world energy matrix, either to generate electricity or to transport products with biofuels.

The most used methodologies were review, modeling and scenario simulations. Studies also indicate other future options for energy matrices, such as hydrogen, electrochemical systems and spatial-temporal analysis.

One of the most applied management strategies was to increase the use of renewable sources in energy matrices. However, studies pointed to actions needed to keep energy generation stable, such as the use of thermoelectric sources and the development and expansion of public policies, which have the power to expand the use of renewable sources.

We suggest, for future researches, to perform the complete analysis of energy matrix, studying and predicting energy generation from all sources that formed the electric system, as well as analyzing the generation instability of renewable sources.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. We thank the CAPES for financial support and the Statistical Analysis and Modeling Laboratory (LAME) of the Federal University of Santa Maria for technical support.

References

- Alencar, D. B., Affonso, C., De Oliveira, R. C., Rodríguez J. L. M., Leita, J. C., Reston F. J. C. (2017). Different models for forecasting wind power generation case study. *Energies*, v. 10.
- Aria, M., Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, 959-975.
- Bahia, R. (2003). The role of natural gas in electricity generation and the CO₂ forest ecosystem balance in clean sustainable development. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, v. 42, 11-17.
- Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70.
- Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., Silva, T. R. da. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, 150-164.
- Bernal, A. P., Dos Santos, I. F. S., Silva, A. P. M., Barros, R. M., Ribeiro, E. M. (2017). Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 151, 260-271.
- Bradford, S. C. (1934). Sources of information on specific subjects. *Engineering*, v. 137, 85-86.
- Braga, B., Rocha O., Tundisi, J. (1998). Dams and the environment the Brazilian experience. *International Journal of Water Resources Development*, v. 14, 127-140.
- Biernaski I., Silva, C. (2018). Main variables of Brazilian public policies on biomass use and energy. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 61.
- Brown, R. C. (2019). *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. Wiley Series in Renewable Resource. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Bu, Y., Huang, Y., Lu, W. (2019). Loops in publication citation networks. *Journal of Information Science*, doi: 10.1177/0165551519871826.
- Camargo, L. R., Stoeglehner, G. (2018). Spatiotemporal modelling for integrated spatial and energy planning. *Energy Sustainability and Society*, v. 8(32), doi:10.1186/s13705-018-0174-z.
- Campbell, H., Montero, G., Lambert, A. A. (2010). Economic, environmental and social impacts of geothermal development, and energy savings and efficient use of power in Baja California, Mexico. *Geothermia*, v.24(1), 25-37.
- Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., Gómez, E. O. (2008). *Biomassa Para Energia*. UNICAMP, Campinas. Available in: (<https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>).

- Crepaldi, J., Amoroso, M. M., Ando Junior, O. H. (2018). Analysis of the Topologies of Power Filters Applied in Distributed Generation Units – Review. *IEEE Latin America Transactions*, v. 16(7), 1892-1897.
- Contreras, L. R., Batuecas, E., Mayo, C., Daz, R., Prez, F., Springer, C. (2018). Sustainability assessment of electricity cogeneration from sugarcane bagasse in Jamaica. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, 390-401.
- Darda, S., Papalas, T., Zabaniotou, A. (2019). Biofuels journey in Europe: Currently the way to low carbon economy sustainability is still a challenge. *Journal of Cleaner Production*, v. 208, 575-588.
- Dutra, R. M., Szklo, A. S. (2008). Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. *Renewable Energy*, v. 33, 65-76.
- Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). (2018). *Brazilian Energy Balance 2018 Year 2017*. Rio de Janeiro: EPE.
- Fae, G. G., Faria, V. A., Aria, V. A., Dalla, Z. L., Osorio, E. (2013). Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, 85-95.
- Farahani, M., Salehi-Arjmand, H., Khadivi, A., Akramian, M. (2019). Phenotypic diversity among *Morus alba* var. *nigra* genotypes as revealed by multivariate analysis. *Scientia Horticulturae*, v. 248, 41-49.
- Faria, J. H. de, Trigo, F. B. M., Cavalcanti, J. A. M. (2017). Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil challenges and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, 469-475.
- Fernandes, E., De Oliveira, J. C. S., Alonso, P., De Oliveira P. R. (2008). Natural-gas-powered thermoelectricity as a reliability factor in the Brazilian electric sector. *Energy Policy*, v. 36, 999-1018.
- Ferreira, J. H. I., Camacho, J. R., Malagoli, J. A., Guimarães Júnior, S. C. (2016). Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.56, 380-387.
- Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Silva, F. P., De Souza, S. N. M., De Souza, S. S., Ando Junior, O. H. (2018). Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, 440-455.
- Fischer-Kowalski, M., Rovenskaya, E., Krausmann, F., Pallua, I., Mc Neill, J. R. (2019). Energy transitions and social revolutions. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 138, 69-77.
- Fontoura, C., Brandão, L., Gomes L. (2015) Elephant grass biorefineries towards a cleaner Brazilian energy matrix. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, 85-93.

- Freitas, F. F., De Souza, S. S., Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Alessio, F. J., De Souza, S. N. M., Venturini, O. J., Ando Junior, O. H. (2019). The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, 146-157.
- Frota, W., Rocha, B. (2010). Benefits of natural gas introduction in the energy matrix of isolated electrical system in the city of Manaus state of Amazonas, Brazil. *Energy Policy*, v. 38, 1811-1818.
- Ganivet, E. (2019). Growth in human population and consumption both need to be addressed to reach an ecologically sustainable future. *Environment, Development and Sustainability*, doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00446-w>.
- Garcia, G., Nogueira, E., Betini, R. (2018). Solar energy for residential use and its contribution to the energy matrix of the state of Paraná. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 61.
- Garg, K. C., Sharma, L. (1994). A study of research-and-development indicators in Indian industry using Bradford law. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 53, 81-87.
- Gomes, G. M. F., Vilela, A. C. F., Zen, L. D., Osório, E. (2013). Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, 85-95.
- Grah, V., Ponciano, I., Botrel, T. (2014). Potential for wind energy generation in Piracicaba, SP, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, 559-564.
- Grob, G. (2003). Importance of ISO and IEC international energy standards and a new total approach to energy statistics and forecasting. *Applied Energy*, v. 76, 39-54.
- Guerra, J. B. S. O., Dutra, L., Schwinden N. B. C., Andrade S. F. (2015). Future scenarios and trends in energy generation in Brazil supply and demand and mitigation forecasts. *Journal of Cleaner Production*, v. 103, 197-210.
- International Energy Agency - IEA. (2019). Statistics. Available in: <https://www.iea.org/statistics/>. Access in: Nov. 2019.
- James, C., Colledge, L., Meester, W., Azoulay, N., Plume, A. (2019). CiteScore metrics: Creating journal metrics from the Scopus citation index. *Learned Publishing*, v. 32(4), 367-374.
- Jannuzzi, G., De Melo, C. (2013). Grid-connected photovoltaic in Brazil policies and potential impacts for 2030. *Energy for Sustainable Development*, v. 17, 40-46.
- Joppert, C., Dos Santos, M. M., Costa, H. K. M., Dos Santos E., Moreira, J. R. S. (2017) Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants. *Biomass and Bioenergy*, v. 107, 63-73.

- Joshi, P., Tiwari, G. (2018). Energy matrices, exergo-economic and enviro-economic analysis of an active single slope solar still integrated with a heat exchanger: a comparative study. *Desalination*, v. 443, 85-98.
- Junqueira, T., Cavalett, O., Bonomi, A. (2016). The virtual sugarcane biorefinery a simulation tool to support public policies formulation in bioenergy. *Industrial Biotechnology*, v. 12, 62-67.
- Kelly, N., Doyle, J., Parker, M. (2020). Methods for assessing higher education research team collaboration: comparing research outputs and participant perceptions across four collaborative research teams. *Higher Education Research and Development*, doi: 10.1080/07294360.2019.1676199.
- Llerena, O. R. P., Micena, R. P., Tuna, C. E., Silveira, J. L (2019). Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 108, 65-75.
- Lopez, M. I. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54 1580-1591.
- Lpez, G. A., Domenech, B., Ferrer, M. L. (2018). Lifetime cost and fuel efficiency in diesel projects for rural electrification in Venezuela. *Energy Policy*, v. 121, 152-161.
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, v. 16, 317–324.
- Medellin, V., Hidalgo, L., Correia, P. (2018). Probabilistic valuation for power generation projects from sugarcane in reserve energy auctions. *Energy*, v. 147, 603-611.
- Melo, E. (2013). Fonte eólica de energia aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. *Estudos Avançados*, v. 27, 125-142.
- Moraes, R. A. de (2018). Short-term scheduling of integrated power and spinning reserve of a wind-hydrothermal generation system with AC network security constraints. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 29(1), 1-14.
- Morais, W., Lima, G., Gomes, W., Huguenin, F. (2018). Electrochemical systems for renewable energy conversion from salinity and proton gradients. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. v. 29, 934-947.
- Moreno, C. L. (2017). Renewable energy and energy efficiency in Latin America a regulatory vision. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, v. 35, 405-416.
- Mukhi, U., Quental, C. (2019). Exploring the challenges and opportunities of the United Nations sustainable development goals: a dialogue between a climate scientist and management scholars. *Corporate Governance*, v. 19(3), 552-564.
- Nogueira, C. E. C. et al. (2015). Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, 300-305.

- Pant, D., Adholeya, A. (2007). Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresource Technology*, v. 98, 2321-2334.
- Patrício, R., Sales, A., Sacramento, E., De Lima, L., Veziroglu T. (2012). Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the state of Ceará-Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, 7355-7364.
- Pes, M., Pereira, E., Marengo, J., Martins, F., Heinemann, D. Schmidt M.(2017). Climate trends on the extreme winds in Brazil. *Renewable Energy*, v. 109, 110-120.
- Pinto, L., Martins, F., Pereira, E. (2017) Social and environmental impacts of the Brazilian wind energy market. *Revista Ambiente e Água*, v. 12, 1082-1100.
- Pinto, J., Amaral, K., Janissek, P. (2016). Deployment of photovoltaics in Brazil scenarios perspectives and policies for lowincome housing. *Solar Energy*, v. 133, 73-84.
- Popper, K. R. (2013). *A lógica da pesquisa científica. The logic of scientific discovery.* Tradução Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. 2 ed. São Paulo: Cultrix.
- Raimundo, D., Silva D. S. I., Tiago, F. G., Barros, R. (2018). Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the Brazilian energetic matrix a retroactive analysis and future potential. *Resources Conservation and Recycling*, v. 137, 270-280.
- Rebouças, F. P., Gomes, S., Nascimento, N.; Medeiros C., Outay F., De Albuquerque, V. (2019). Energy production predication via internet of thing-based machine learning system. *Future Generation Computer Systems*, v. 97, 180-193.
- Reis, E. dos, Cunha, J., Mateus, D., Delmond, J., Couto, R. (2013). Performance and emissions of a diesel engine-generator cycle under different concentrations of soybean biodiesel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, 565-571.
- Rius-Sorolla, G., Maheuta, J., Estelles-Miguela, S., Garcia-Sabater, J. P. (2017). Protocol: Systematic Literature Review on coordination mechanisms for the mathematical programming models in production planning with decentralized decision making. *Working Papers on Operations Management*, v. 8, 22-43.
- Rodrigues, S. A., Nadaleti, W., Przybyla, G., Belli, F. P.(2019). Potential use of methane and syngas from residues generated in rice industries of Pelotas, Rio Grande do Sul, thermal and electrical energy. *Renewable Energy*, v. 134, 1003-1016.
- Rubio, R. M., Feit, C. M., De Ruyck, J., Guevara, V. S. O., Verma, V. K. (2013). Life cycle modeling of energy matrix scenarios Belgian power and partial heat mixes as case study. *Applied Energy*, v. 107, 329-337.
- Salomon, K. R., Lora, E. E. S. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, 1101-1107.

- Sanchez, L., Vásquez, C., Vilorio, A. (2018). The data envelopment analysis to determine efficiency of Latin American countries for greenhouse gases control in electric power generation. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 8, 197-208.
- Sarmiento, N., Belmonte, S., Dellicompagni, P., Franco J., Escalante, K., Sarmiento, J. (2018). A solar irradiation gis as decision support tool for the province of Salta Argentina. *Renewable Energy*, v. 132, 68-80.
- Silva, M. T da, Rebutini, V. Z., Mancini, F. N. (2018). Life cycle assessment (LCA) and wind power generation application of the methodology and the generator to power system. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 61.
- Silva, S. da, Perlin, M. S., Matsushita, R., Santos, A. A. P., Imasato, T., Borenstein, D. (2019). Lotka's law for the Brazilian scientific output published in journals. *Journal of Information Science*, v. 45, 705-709.
- Silverio, L., Lamas, W. (2011). An analysis of development and research on spent nuclear fuel reprocessing. *Energy Policy*, v. 39, 281-289.
- Smil, V. (2019). *Energy in World History*. 1st. ed. Abingdon: Routledge.
- Souza, M. E., Fuzaro, G., Polegato, A. R. (1992). Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. *Water Science and Technology*, v. 25, 213-222.
- Takigawa, F., Fernandes, R., Aranha, N. E., Tenfen, D., Sica, E. (2016). Energy management by the consumer with photovoltaic generation Brazilian market. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, 2226-2232.
- Tiago, F. G., Rosa, C., Barros, R., Dos Santos, I., Da Silva, F. (2016). Study of the energy balance and environmental liabilities associated with the manufacture of crystalline Si photovoltaic modules and deployment in different regions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 144, 383-394.
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *Br. J. Manag*, v. 14, 207-222.
- Trapp, G., Rodrigues, L. (2016). Evaluation of the total systemic cost of wind power generation in face of the replacement of hydroelectric and thermoelectric sources considering socioeconomic and environmental externalities. *Gestão e Produção*, v. 23, 556-569.
- Vazquez, L., Majanne, Y., Castro, M., Luukkanen, J., Hohmeyer, O., Vilaragut, M., Diaz, D. (2018). Energy system planning towards renewable power system energy matrix change in Cuba by 2030. *IFAC-Papersonline*, v. 51, 522-527.
- Wang, Z., Deng, Z., Wu, X. (2019). Status Quo of Professional-Patient Relations in the Internet Era: Bibliometric and Co-Word Analyses. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, 1-19.

Yao, S., Zhang, S., Zhang, X. (2019). Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 235, 1338-1352.

Zipf, G. K. (1945). The meaning-frequency relationship of words. *Journal of General Psychology*, v. 33, 251-266.

5 ARTIGO 2 – ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS DAS INTERAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS FONTES GERADORAS DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Bianca Reichert e Adriano Mendonça Souza

Resumo: a matriz elétrica brasileira é composta, em sua maior parte, por fontes renováveis. Porém, as fontes térmicas, como carvão, combustíveis, gás natural e nuclear são necessárias para atender à demanda em períodos de seca. O objetivo da pesquisa foi identificar as interações existentes entre as principais fontes da matriz elétrica brasileira, por meio de equações simultâneas, e avaliar os impactos na geração de eletricidade de cada fonte com a simulação de cenários. A pesquisa teve como variável de interesse a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes geradoras: biomassa; carvão; combustíveis; eólica; gás natural; hidráulica; nuclear. Os valores mensais, referentes ao período de janeiro de 2000 a junho de 2019 foram coletados no *site* Agência Nacional de Energia Elétrica. O método de estimação de regressões aparentemente não relacionadas foi utilizado, uma vez que o sistema de equações do SUR é mais eficiente ao estimar os parâmetros das equações simultaneamente. A análise de cenários permitiu identificar o grande impacto na fonte hidráulica causado por variações extremas na geração das fontes renováveis, ao mesmo tempo que mostrou forte dependência das fontes térmicas em períodos de escassez das chuvas. Em um horizonte otimista, verificou-se que a geração das fontes biomassa, eólica, carvão e combustíveis diminuirá e haverá aumento da utilização da fonte hidráulica. Uma das alternativas apontadas para diminuir a dependência das termoelétricas é aumentar a geração das fontes renováveis não convencionais, como biomassa, eólica e solar.

Palavras-chave: Geração de eletricidade. Equações simultâneas. Simulação de cenários.

Abstract: The Brazilian electricity matrix is mostly composed of renewable sources. However, thermal sources such as coal, fuel, natural gas and nuclear are needed to meet the demand in drought periods. The objective of this research was to identify the interrelationships among the main sources of the Brazilian electric matrix, by means of simultaneous equations, and to evaluate the impacts on the electricity generation of each source by scenario simulation. The research analyzed the amount of electricity generated (GWh) by the main generating sources: biomass; coal; fuels; wind; natural gas; hydropower; nuclear. The monthly values, from January 2000 to June 2019, were collected on the National Electricity Agency website. The estimation method used was the Seemingly Unrelated Regression (SUR), since this method is more efficient to estimate the equation parameters

simultaneously. The scenario analysis allowed us to identify the large impact on the hydropower caused by extreme variations in the generation of renewable sources, at the same time that it showed a strong dependence on thermal sources in periods of scarcity of rains. In an optimistic horizon, it was found that the generation of biomass, wind, coal and fuel sources will decrease and there will be an increase in the use of the hydropower. The alternative to reduce the dependence on thermoelectric plants is to increase the generation of unconventional renewable sources such as biomass, wind and solar sources.

Keywords: Electricity generation. Simultaneous equations. Time series. Scenario simulation.

5.1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica renovável é influenciada por fatores como as estações climáticas e a localização espacial das fontes geradoras (HOELTGEBBAUM; FERNANDES; STREET, 2018). Para manter a estabilidade do fornecimento de eletricidade, na matriz elétrica brasileira são utilizadas fontes renováveis e não renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018). Em sua maior parte, a matriz é formada por fontes renováveis, mas a energia gerada pelas termoelétricas ainda é necessária para atender à demanda em períodos de seca no Brasil (MENDES; STHEL, 2018).

A dependência das fontes térmicas e seus impactos na matriz elétrica brasileira podem ser verificados por meio da análise de dados históricos; entretanto, é possível elaborar cenários utilizando critérios científicos para antever a realidade, da mesma forma que Aravena e Gil (2014) utilizaram a simulação de cenários a fim de avaliar os riscos dos períodos secos e seus impactos na geração hidrotérmica no Chile.

Os cenários são uma ferramenta útil para avaliar o comportamento das variáveis em análise frente a oscilações ou a fatores externos, além de verificar o impacto causado nas variáveis devido a essas alterações (SUPINO et al., 2019). A elaboração de cenários está intimamente ligada à modelagem econométrica multivariada, como o modelo Vetor Autorregressivo (VAR), que também pode ser aplicado para identificar as relações existentes entre as fontes que compõem a matriz elétrica. Em estudos realizados por Tamba, Nsouandélé e Lélé (2017), a modelagem VAR foi aplicada para analisar a relação positiva entre o consumo de gasolina e o crescimento econômico em Camarões, do mesmo modo que Bernal, Molero e Garcia (2019) utilizaram o modelo VAR para mensurar o impacto negativo gerado por fontes não renováveis no aumento da taxa de energia elétrica no México.

As taxas de eletricidade também foram avaliadas por meio do ajuste de equações simultâneas, utilizando a metodologia de modelos de regressões aparentemente não relacionadas (SUR), em que Cosmo e Valeri (2018) concluíram que o aumento da utilização da energia eólica diminui os custos de geração de eletricidade, assim como o SUR foi aplicado para identificar o limiar entre a geração de energia eólica e a condição térmica das linhas de transmissão (DONG et al. 2019).

A modelagem VAR, conhecida como modelo VAR estrutural, baseia-se em um sistema de equações simultâneas, com estrutura fixa em relação ao número de defasagens de suas variáveis endógenas. De modo contrário, a metodologia de ajuste de equações simultâneas, utilizando o SUR, possibilita que cada equação possua a sua própria forma

funcional e forneça uma previsão mais eficiente ao combinar informações de diferentes equações, com base apenas nas variáveis significativas para o sistema (PARAJULI; ZHANG; CHANG, 2016; ADEDOKUN, 2018).

Dado que a geração de eletricidade no país sofre interferência causada pelas inter-relações existentes entre as fontes geradoras, o problema de pesquisa consiste em identificar quais das fontes realmente impactam a geração do sistema elétrico brasileiro e até quantas defasagens possuem efeito sobre essa geração de eletricidade.

O objetivo desta pesquisa foi elaborar cenários otimista e pessimista da geração de energia elétrica no Brasil por diferentes fontes, por meio de equações simultâneas representativas da matriz elétrica brasileira, e avaliar quais são os impactos na geração de eletricidade de cada fonte, a partir da simulação de cenários.

Este artigo divide-se em seis seções. A primeira apresenta uma breve introdução ao tema; a segunda demarca a base teórica da metodologia aplicada na pesquisa; a terceira revela os dados e os passos metodológico utilizados; a quarta esclarece os resultados encontrados; a quinta promove uma discussão acerca dos resultados; e a última seção relata as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Coleta de Dados

A variável de interesse foi a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes geradoras da matriz elétrica brasileira: biomassa; carvão; combustíveis; eólica; gás natural; hidráulica; nuclear. Os valores mensais da geração foram coletados, no intervalo de janeiro de 2000 a junho de 2019, na base de dados abertos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019). Para esta pesquisa, as fontes biomassa, eólica e hidráulica e foram consideradas como renováveis, e o carvão, combustíveis, gás natural e nuclear foram analisados como fontes não renováveis.

5.2.2 Metodologia

O ajuste de equações simultâneas permitiu analisar a relação bidirecional existente entre as variáveis independentes e as dependentes do estudo (GUJARATI, 2000; GUAN; PANG, 2018). No entanto, como essa metodologia possui como pressuposto a

estacionariedade dessas variáveis, o primeiro passo da análise foi verificar a estacionariedade das séries de geração de eletricidade (BUENO, 2015; MASTEN, 2018).

A estacionariedade pode ser confirmada por meio dos testes de raiz unitária, como o Dickey-Fuller Aumentado (ADF) e Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS), os quais foram aplicados de forma conjunta, pois possuem hipóteses nulas contrárias e assumem os resíduos do tipo Ruído Branco *i.i.d.*($0, \sigma^2$) (DICKEY, 2015; MORETTIN, 2016).

A hipótese nula do teste ADF assume a série não estacionária, H_0 : a série possui uma raiz unitária. Esse teste possui como base a estatística t , caso o valor de $|\tau|_{\text{calculado}} > |\tau|_{\text{crítico}}$ de Dickey-Fuller, rejeita-se H_0 e a série é considerada estacionária (DICKEY; FULLER, 1981). De modo contrário, a hipótese nula do teste KPSS considera a estacionariedade da série, H_0 : $X_t \sim I(0)$ (KWIATKOWSKI et al., 1992). O teste KPSS utiliza a estatística Multiplicador de Lagrange (LM) para aceitar ou rejeitar a hipótese nula.

Ao se confirmar a não estacionariedade das séries e o número de d diferenças necessárias para torná-las estáveis, foi possível optar pelo melhor método de análise: regressões aparentemente não relacionadas (SUR).

O próximo passo caracterizou o ajuste de um Vetor Autorregressivo (VAR) inicial com base nas variáveis diferenciadas, a fim de conhecer previamente as defasagens significativas e as relações de precedência entre as variáveis (SENNA; SOUZA, 2016). O número de defasagens significativas foi determinado por meio do *Lag Length Criteria*, com base nos valores dos critérios de informação, como o Akaike (AIC) e o Bayesiano (BIC) (HASEEB et al., 2019).

A classificação das variáveis em endógenas e exógenas para cada equação foi realizada por meio do teste de Causalidade de Granger, uma vez que esse teste indica se os efeitos de observações precedentes de uma variável exógena predizem os de outra (RAMSER et al., 2019). As m variáveis endógenas indicadas pelo teste de Causalidade de Granger foram consideradas para o ajuste do sistema de m equações simultâneas (KIM; CHO, 2018).

Os parâmetros das equações podem ser estimados por meio do método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), porém ele só pode ser aplicado se as variáveis defasadas não estiverem correlacionadas ao termo do erro (SAIDI, HAMMAMI, 2015). Em casos de simultaneidade, ou seja, correlação das variáveis com o erro, o método de Mínimos Quadrados em Dois Estágios (MQ2E) deve ser utilizado (WANG et al., 2018). Em contrapartida, se houver a necessidade de as equações possuírem variáveis com diferentes defasagens, deve-se utilizar o estimador de regressões aparentemente não relacionadas (SUR) (KHAN; PENG; LI, 2019).

A estimação com base no SUR permite ajustar equações mais eficientes, pois os seus parâmetros são estimados de forma simultânea, mantendo a característica dinâmica de cada equação, e apenas as variáveis significativas são incluídas no sistema (ZELLNER, 1962; WANG; ZHAO; LI, 2018). O modelo clássico do SUR utilizado está genericamente representado nas Equações 1 e 2.

$$x_{1t} = Y_{1t}\beta_1 + \varepsilon_{1t} \quad (1)$$

$$\vdots$$

$$x_{mt} = Y_{mt}\beta_m + \varepsilon_{mt} \quad (2)$$

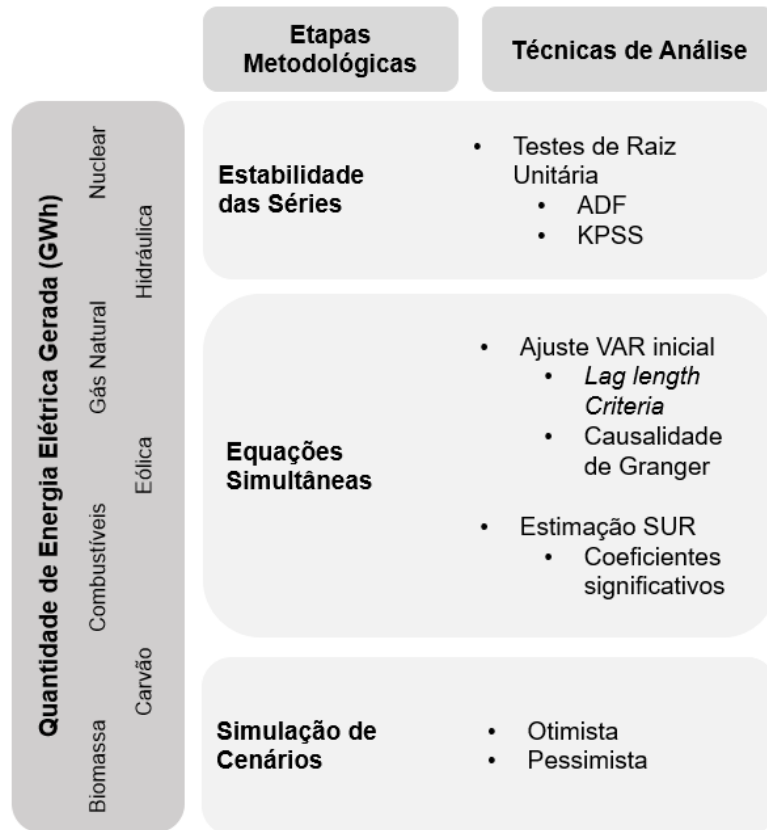
Em que: $i=1,2,\dots, m$ representa as variáveis dependentes, x_{it} a variável dependente, Y_{it} a variável independente, β_i os coeficientes, ε_{it} os erros aleatórios com característica de ruído branco: $\varepsilon_{it} \approx i.i.d. N(0, \sigma^2)$.

O melhor sistema de equações simultâneas foi selecionado com base no nível de significância de todos os parâmetros ($p\text{-valor} \leq 0,05$) e na análise das características de ruído branco dos resíduos (LIU et al., 2019; YU; YOO; BAEK, 2019). Assim, os parâmetros não significativos foram retirados das equações e o ajuste do sistema foi feito até que um sistema com todos os parâmetros significativos fosse devidamente ajustado.

A última etapa foi analisar os cenários, otimista e pessimista, da geração de eletricidade no Brasil (ALIZADEH et al., 2016; SUPINO; GIORGINO; BUSCO, 2019). A simulação dos cenários foi realizada com base na estimativa estocástica-dinâmica, a fim de avaliar as inter-relações entre as fontes da matriz elétrica. O cenário base produzido pelo sistema de equações simultâneas foi comparado com o cenário otimista, que teve como foco o aumento de 10% da geração renovável; e o cenário pessimista, que evidenciou o aumento de 10% na geração das fontes não renováveis.

A estrutura dos passos metodológicos aplicados na pesquisa pode ser melhor visualizada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autores (2020).

Os resultados, provenientes da aplicação da metodologia exposta acima, são apresentados no próximo tópico.

5.3 RESULTADOS

Em análise prévia dos dados, foi possível verificar as estatísticas descritivas para cada série temporal da geração de energia. As principais medidas descritivas da geração de energia elétrica das principais fontes da matriz brasileira podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Medidas descritivas da quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica

Medidas Descritivas	Biomassa	Carvão	Combustíveis	Eólica	Gás Natural	Hidráulica	Nuclear
Média	167,65	740,78	440,20	740,71	2369,53	32110,99	1140,47
Mediana	4,59	584,54	141,07	52,04	1377,06	32356,21	1222,31
Máximo	1139,16	1742,35	2541,00	5138,40	6601,55	42642,00	1504,33
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	231,76	7167,59	0,00
Desvio Padrão	305,09	385,38	616,78	1301,83	1886,25	4413,91	329,63
Coefficiente de Variação	181,98%	48,38%	140,11%	175,75%	79,60%	13,75%	28,90%
Assimetria	1,81	0,93	1,80	1,86	0,84	-0,92	-1,44
Curtose	4,85	2,53	5,25	5,36	2,25	6,65	4,82

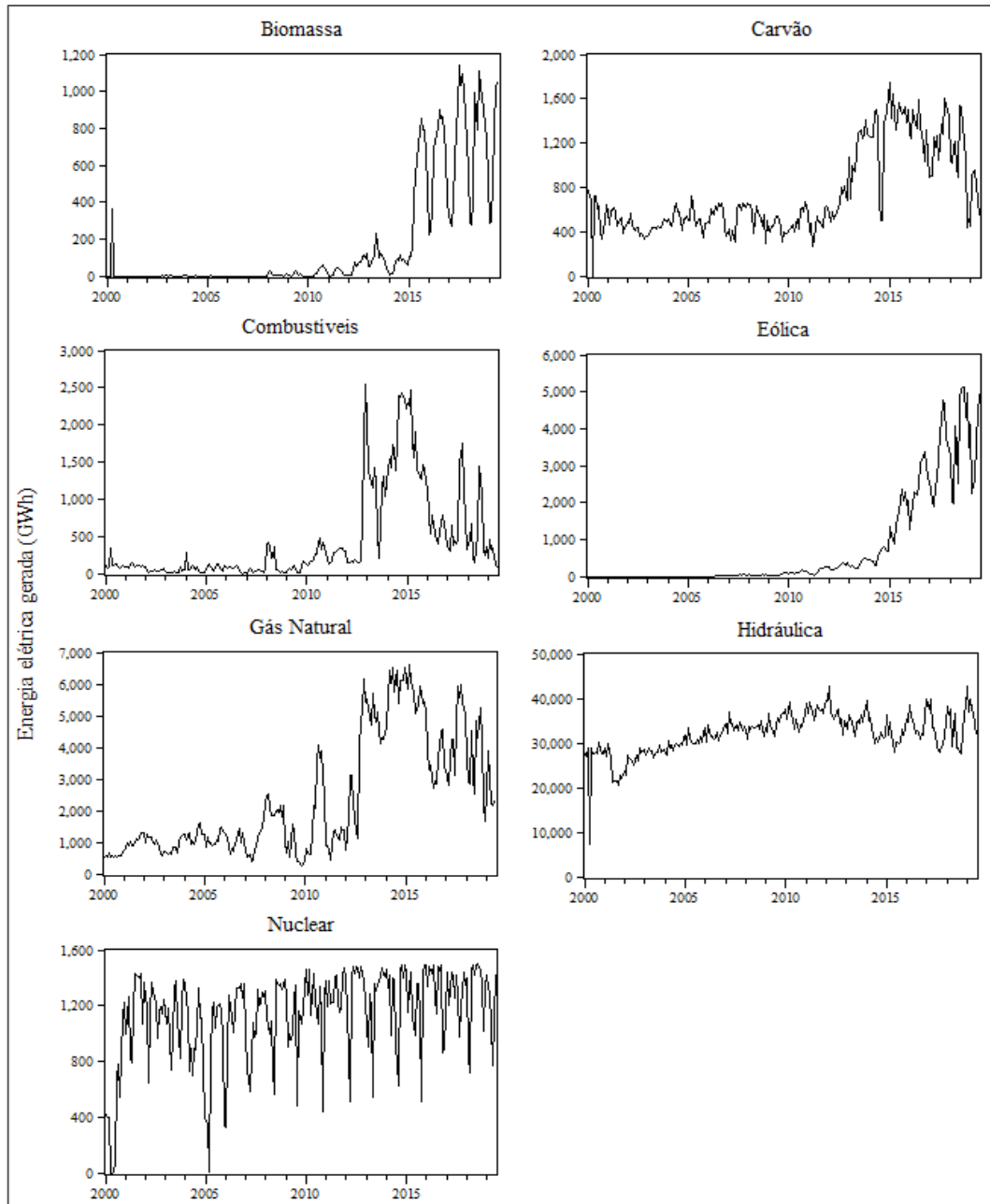
Fonte: Autores (2020).

Em relação à média da quantidade de energia gerada, observa-se que as fontes hidráulica e gás natural são as mais utilizadas para a geração de eletricidade no país. Ao analisar a dispersão dos dados, verifica-se que essas fontes também apresentam as maiores variações quando examinado o valor do desvio padrão. Em relação ao coeficiente de variação, observa-se que a fonte hidráulica, mesmo apresentando a maior variação absoluta, caracteriza o conjunto de dados mais homogêneo. Arbitrariamente, as demais fontes, que apresentaram coeficientes de variação iguais ou maiores que 30%, demonstram a não representatividade da média para esses dados.

Outras medidas que representam a variação dos dados são a assimetria e a curtose. Observa-se, a partir dos valores de assimetria, que nenhuma das séries possui uma distribuição simétrica, reforçando a suposição de que a média pode não ser a melhor medida para representar o conjunto de dados. Em relação à curtose, verifica-se que as séries configuram distribuições do tipo platicúrtica, uma vez que os dados possuem grande variabilidade.

Além das estatísticas descritivas, verificar o desempenho das variáveis ao longo do tempo é relevante para a detecção de diferentes comportamentos, como a estacionariedade da média e a presença de fatores sazonais e de tendência. A quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica brasileira pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Gráficos da quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica brasileira durante o período de análise



Fonte: Autores (2020).

Verifica-se que todas as séries são não estacionárias (Figura 2), dado que apresentam grandes variações, tendências crescentes e picos em intervalos consecutivos. Ao analisar a geração por fontes específicas, observa-se que a fonte eólica e biomassa apresentaram um crescimento significativo a partir do ano de 2015.

A geração hidráulica apresentou picos repetitivos bem definidos, uma vez que é diretamente influenciada pela intercalação entre períodos chuvosos e secos, embora o país apresente um extenso sistema hídrico (GALVÃO; BERMANN, 2015).

Durante o período de análise, as fontes não renováveis foram as que mais apresentaram oscilações na sua geração, com base nos picos de amplitudes positiva e negativa. Nesse grupo de fontes, as derivadas do petróleo, como gás natural, carvão e combustíveis, caracterizam um aumento simultâneo no ano de 2013.

Além da análise gráfica inicial, a estacionariedade da série temporal foi confirmada por meio dos testes de raiz unitária, os quais indicaram o provável número d de diferenças. Os resultados dos testes ADF e KPSS, aplicados às séries em nível e em primeiras diferenças, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Testes de raiz unitária ADF e KPSS aplicados às séries em nível e em 1^{as} diferenças

Séries em nível								
Valores críticos (5%)		Biomassa	Carvão	Combustíveis	Eólica	Gás Natural	Hidráulica	Nuclear
ADF	-2,87	-0,15	-1,71	-1,58	1,65	-2,46	-1,70	-7,71
KPSS	0,46	1,34	1,33	0,99	1,35	1,40	1,26	1,16
Séries em 1 ^{as} diferenças								
Valores críticos (5%)		Biomassa	Carvão	Combustíveis	Eólica	Gás Natural	Hidráulica	Nuclear
ADF	-2,87	-3,47	-12,13	-8,54	-1,58	-14,64	-5,73	-15,93
KPSS	0,46	0,16	0,14	0,13	0,16	0,13	0,17	0,12

Fonte: Autores (2020).

Em que: hipótese H_0 do teste ADF = a série possui uma raiz no círculo unitário; hipótese H_0 do teste KPSS = a série é estacionária.

Com base nas estatísticas dos testes e nos valores críticos a 5% de significância, concluiu-se que nenhuma das séries é estacionária em nível, sendo necessária a transformação por meio da aplicação de diferenças. Como todas as séries tornam-se estacionárias em 1^{as} diferenças, a ordem de integração indicada foi $d=1$.

A fim de identificar o número de defasagens a ser utilizado nas equações simultâneas, foi ajustado um modelo VAR inicial de ordem $p=2$ com base nas variáveis diferenciadas. O número de defasagens significativas foi definido a partir da análise do *Lag Length Criteria*, o qual indicou o número de defasagens igual a 8 lags com base nas estatísticas de máxima

verossimilhança (LR), erro de previsão final (FPE) e AIC, conforme representado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do *Lag Length Criteria* para a identificação do número de defasagens significativas

Lag	LR	FPE	AIC
0	NA	6,83e+34	100,07
1	283,15	2,86e+34	99,20
2	200,90	1,70e+34	98,68
3	107,98	1,55e+34	98,59
4	164,99	1,04e+34	98,18
5	140,78	7,70e+33	97,87
6	100,13	6,96e+33	97,76
7	806,85	6,92e+33	97,73
8	128,51*	5,11e+33*	97,40*

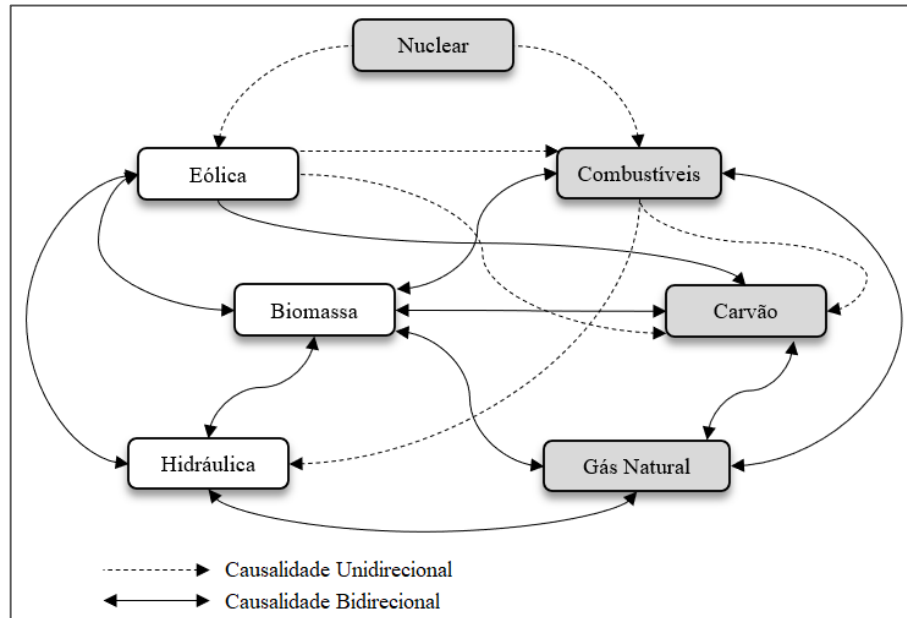
Fonte: Autores (2020).

Em que: *número de defasagens selecionadas pelo critério; LR = *Likelihood Maximum*; FPE = *Final Prediction Error*; AIC = Critério de Informação Akaike.

As relações de precedência entre as variáveis foram identificadas por meio do teste de Causalidade de Granger. As precedências, consideradas significativas, podem ser analisadas no diagrama da Figura 3.

A eletricidade gerada pela fonte nuclear precede a geração da fonte combustíveis e eólica, não sendo influenciada por nenhuma outra fonte geradora. Por isso, a fonte nuclear foi utilizada como variável exógena na modelagem do sistema de equações simultâneas.

Figura 3 – Diagrama de precedência entre as variáveis de acordo com o teste de Causalidade de Granger



Fonte: Autores (2020).

Em que: todas relações apresentaram um p-valor $\leq 0,05$.

As demais fontes foram utilizadas como variáveis endógenas, ou seja, foi ajustada uma equação para cada uma das fontes: biomassa; carvão; combustíveis; eólica; gás natural; hidráulica. O melhor sistema de equações simultâneas foi selecionado com base no nível de significância dos parâmetros ($p\text{-valor} \leq 0,05$), no qual os parâmetros não significativos foram retirados das equações para que a modelagem do sistema fosse feita novamente até o momento em que todos os parâmetros fossem significativos. As equações ajustadas, bem como os parâmetros significativos podem ser observadas no Apêndice.

A solução do sistema de equações simultâneas expressa o inter-relacionamento das variáveis e os seus impactos, o que foi útil para a elaboração de cenários baseados nas inter-relações existentes entre as principais fontes componentes da matriz elétrica brasileira.

Os cenários otimista e pessimista elaborados avaliaram as inter-relações em situações extremas, pois consideraram um aumento ou diminuição da geração das fontes de amplitude cinco vezes maior que a real (10%). A variação média real da geração das fontes renováveis e não renováveis pode ser analisada na Tabela 4.

Tabela 4 – Percentuais de participação das fontes de energia na geração de eletricidade no Brasil

Oferta interna de eletricidade	2014	2015	2016	2017	2018	Varição média
Fontes renováveis	73,20%	75,50%	81,70%	80,40%	83,30%	+2,00%
Fontes não renováveis	26,80%	25,90%	19,60%	20,80%	16,70%	-2,00%

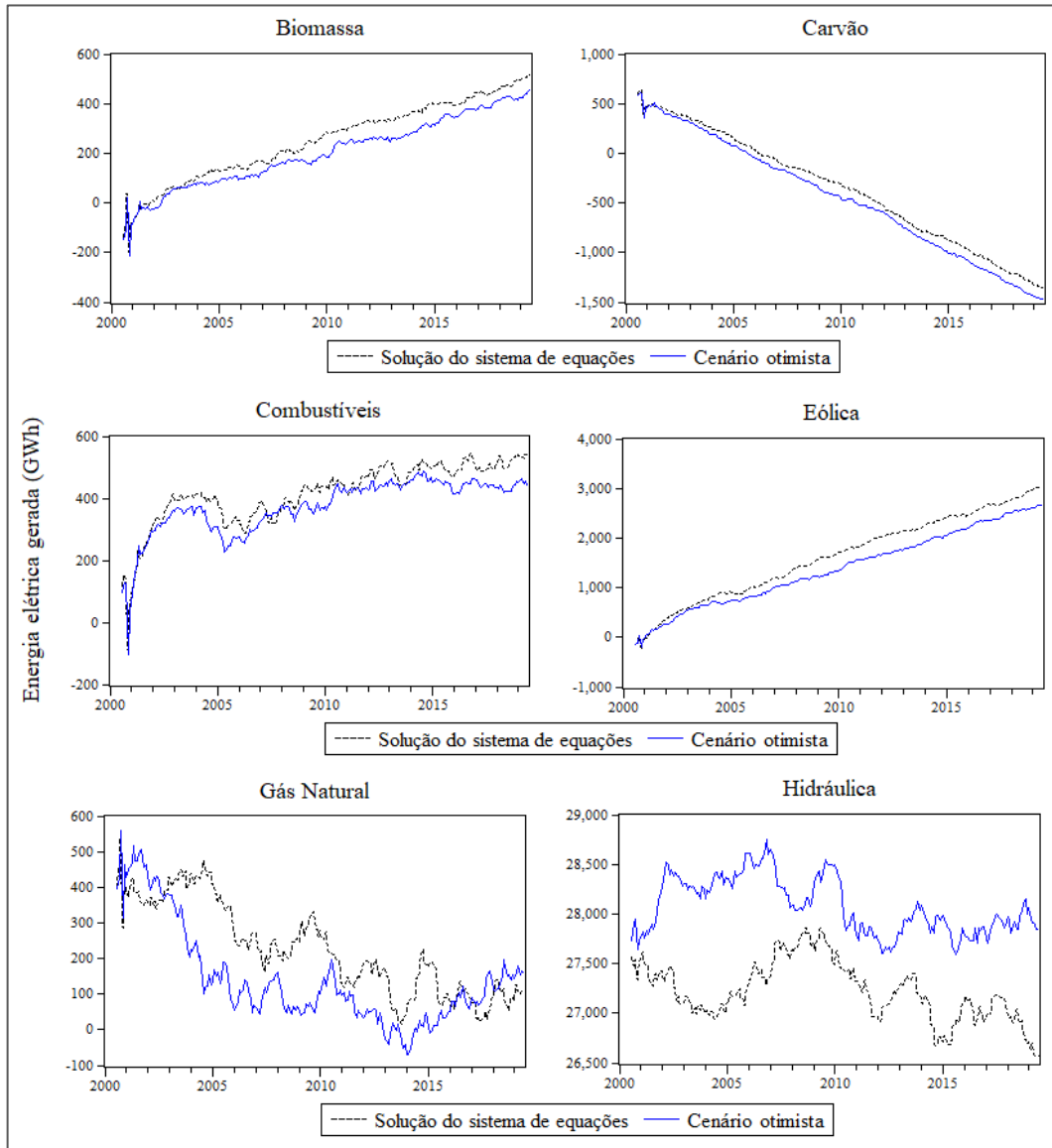
Fonte: Adaptado de EPE (2015, 2016, 2017, 2018).

Para simular o cenário otimista, foi considerado um aumento de 10% da geração das fontes renováveis e a diminuição, na mesma proporção, da utilização das fontes não renováveis (Figura 4), pois a quantidade de energia gerada precisa atender à demanda e não há como acumular eletricidade no sistema elétrico sem que haja o consumo da mesma.

Na simulação do cenário otimista¹, o qual se concentrou na renovabilidade da matriz elétrica brasileira, observa-se a diminuição da geração das fontes biomassa, eólica, carvão e combustíveis, pois os parâmetros de maior módulo destas equações referem-se às fontes não renováveis, as quais tiveram a quantidade de geração limitada nesse cenário. De modo contrário, verifica-se o aumento da geração da fonte hidráulica e o aumento da utilização de gás natural a partir do ano de 2017, uma vez que variações na geração de outras fontes não impactam significativamente as suas gerações finais, dado que são as fontes responsáveis por produzir mais de 70% de toda eletricidade consumida no país (EPE, 2018).

¹ Simulação Estocástica-Dinâmica; Interações Máximas = 5000; Convergência = 1×10^{-08} ; 1000 repetições; 0 falha(s).

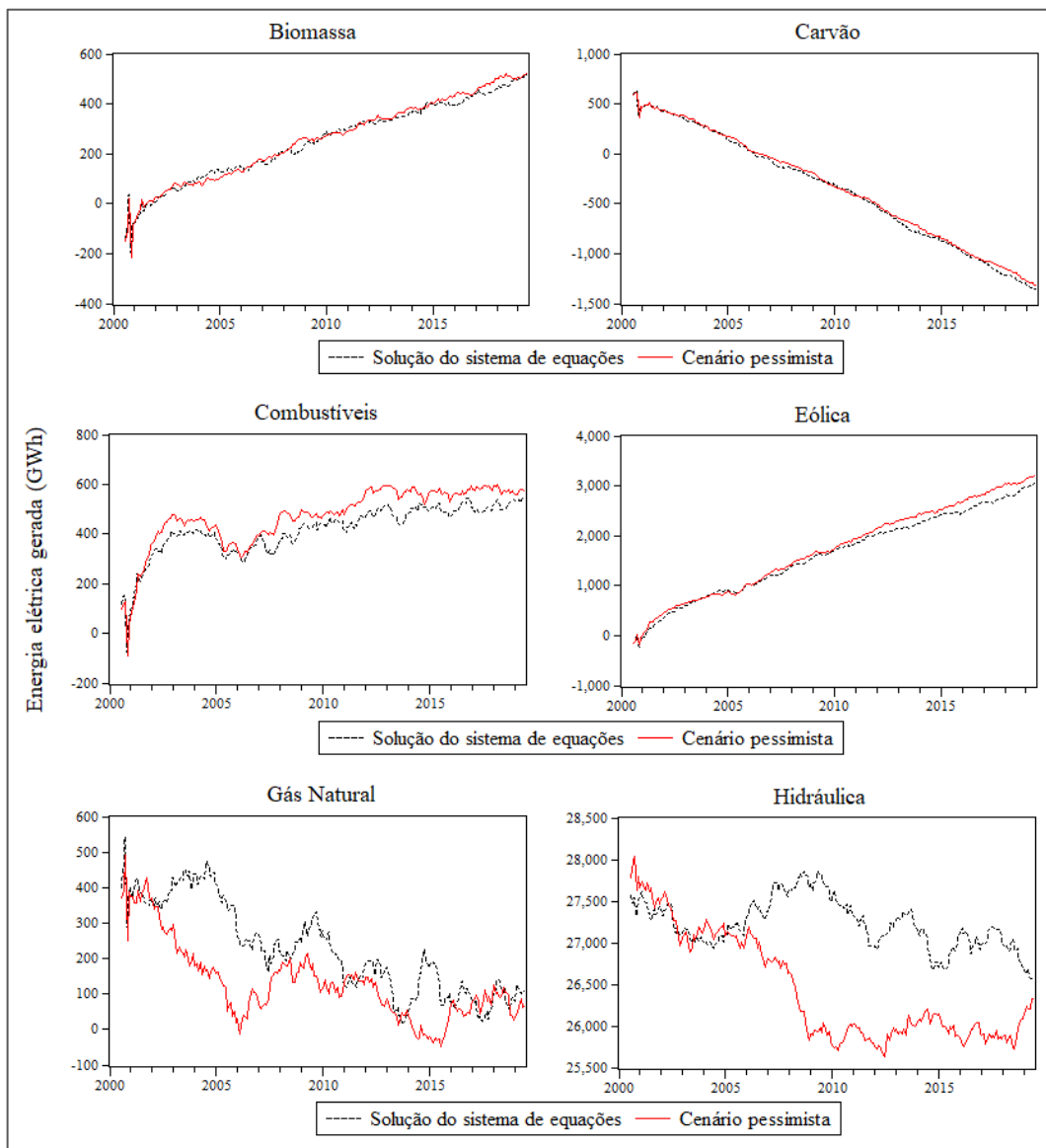
Figura 4 – Comparação entre a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) ajustada pelo sistema de equações e pelo cenário otimista



Fonte: Autores (2020).

Na simulação do cenário pessimista, foi considerado um aumento de 10% da geração das fontes não renováveis e a diminuição da participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (Figura 5).

Figura 5 – Comparação entre a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) ajustada pelo sistema de equações e pelo cenário pessimista



Fonte: Autores (2020).

Na elaboração do cenário pessimista², verifica-se que, mesmo simulando o aumento da geração não renovável, ocorre a diminuição da geração de eletricidade a partir do gás natural, pois a interferência das outras fontes não renováveis na sua geração é muito pequena com base na sua equação do sistema. Por outro lado, verifica-se o aumento do uso de combustíveis, dado que os maiores parâmetros da sua equação se referem às fontes não renováveis, as quais tiveram a sua geração ampliada nesse cenário. Observa-se também que as

² Simulação Estocástica-Dinâmica; Interações Máximas = 5000; Convergência = 1×10^{-08} ; 1000 repetições; 0 falha(s).

fontes biomassa, carvão e eólica não sofrem grandes impactos em relação ao cenário base, porém a fonte hidráulica apresenta uma redução de maior amplitude por ser independente da geração não renovável.

5.4 DISCUSSÕES

A geração hidráulica apresentou maiores oscilações na análise de cenários, uma vez que é a fonte responsável por ofertar mais da metade da eletricidade consumida no país (EPE, 2018). Entretanto, na análise do cenário base, os períodos de seca ocasionaram a crise hídrica e a instabilidade da matriz elétrica brasileira a partir do ano de 2013 (MELO et al., 2019). As consequências dessa crise foram ampliadas pelo fenômeno *El Niño*, em 2015, principalmente em sua fase fria, *La Niña*, pois houve a redução do índice de chuvas na região sul e sudeste do país e a consequente baixa dos reservatórios das hidrelétricas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017; NG; TURNER; GALELLI, 2017; SANTOS, V. et al., 2018).

A crise hídrica, que ocorreu no intervalo de 2013 a 2016, também aumentou a dependência energética das termoeletricas, dado que a geração hidráulica precisou ser compensada pelas fontes de carvão, combustíveis, gás natural e nuclear. Essa compensação foi necessária para controlar a instabilidade das fontes renováveis, porém ocasionou maiores níveis de emissão dos gases de efeito estufa como o CO₂ (MENDES; STHEL, 2018).

Ainda no cenário base, o aumento da geração da fonte eólica, a partir do ano de 2015, justificou-se pela expansão de 56% da capacidade instalada no país, devido à produção interna dos componentes, beneficiada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (EPE, 2016; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2016; GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2016). O aumento do uso da geração de biomassa, nesse mesmo período, pode estar relacionado ao nível de produção de cana-de-açúcar no país, a qual teve um aumento de 42% na produção nacional em 2015 (NOVA CANA, 2016).

Os períodos de escassez das chuvas impactaram economicamente o setor elétrico brasileiro, pois, como a energia térmica é mais cara, o aumento dos custos de geração teve que ser repassado às tarifas pagas pelo consumidor (PLATONOW, 2014; BOMFIM, 2015; CRAIDE, 2015). O plano de ação decorrente foi a criação das bandeiras tarifárias, as quais incorporam aos seus valores as condições momentâneas de geração de eletricidade (ANEEL, 2015).

Coincidentemente, nos períodos secos, a fonte eólica tende a apresentar um potencial elétrico maior, do mesmo modo que a irradiação solar na região nordeste é mais forte no

período entre dezembro e fevereiro (SILVA; MARCHI NETO; SEIFERT, 2016; LIMA et al., 2019). Por outro lado, a geração de eletricidade, a partir da biomassa, pode auxiliar na redução de emissões dos gases do efeito estufa, sendo que é uma fonte limpa e possui grande potencial energético no país (SANTOS, I. F. S. et al., 2018). Assim, incentivar a expansão do uso de fontes renováveis não convencionais reduziria a dependência térmica da matriz elétrica brasileira em períodos de secas e diminuiria o risco hidrológico (PAIM et al., 2019).

Outro fator que reforça a importância de tornar a matriz mais renovável é a garantia da segurança no setor elétrico, uma vez que as linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) são capazes de integrar as redes elétricas de diferentes regiões do país (SILVA; MARCHI NETO; SEIFERT, 2016; HUNT; STILPEN; FREITAS, 2018). A interligação das redes torna-se necessária, uma vez que muitos Estados do país dependem da importação de eletricidade e são, conseqüentemente, vulneráveis aos níveis hídricos reduzidos em outros locais (BRADSHAW; JANNUZZI, 2019).

5.5 CONCLUSÕES

Conhecer as inter-relações entre as fontes de energia de um país é uma condição importante para realizar o planejamento do sistema elétrico de modo eficiente e mais sustentável. Nessa pesquisa, foi analisada a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica brasileira, como biomassa, carvão, combustíveis, eólica, gás natural, hidráulica e nuclear.

Em um horizonte otimista, verificou-se que a geração das fontes biomassa, eólica, carvão e combustíveis diminuirá e haverá aumento da utilização da fonte hidráulica. Comparado com o cenário base, a fonte hidráulica foi a que apresentou impactos de maior amplitude na sua geração, ao mesmo tempo em que mostrou forte dependência das fontes térmicas em períodos de escassez das chuvas.

Uma das alternativas para diminuir a dependência da geração das termoeletricas e aumentar a segurança no setor elétrico é o aumento da geração das fontes renováveis não convencionais, como biomassa, eólica e solar. Porém, essas fontes são mais vulneráveis às mudanças climáticas, principalmente variações na velocidade dos ventos e na intensidade de irradiação solar.

Como trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de modelos que capturem a volatilidade das variáveis para avaliar e prever a geração das fontes renováveis não convencionais, as quais são voláteis e dificultam o planejamento do SIN.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos à CAPES pelo aporte financeiro e ao Laboratório de Análise e Modelagem Estatística (LAME) da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pelo espaço utilizado.

REFERÊNCIAS

ADEDOKUN, A. The effects of oil shocks on government expenditures and government revenues nexus in Nigeria (with exogeneity restrictions). **Future Business Journal**, v. 4, n. 2, p. 219-232, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica**. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguas-do-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica>. Acesso em: 11 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Bandeiras Tarifárias**. Brasília, 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em 19 nov. 2019.

_____. **Geração por fonte**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/dados/geracao>. Acesso em: 07 nov. 2019.

ALIZADEH, R. et al. An integrated scenario-based robust planning approach for foresight and strategic management with application to energy industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 104, p. 162-171, 2016.

ARAVENA, I.; GIL, E. Hydrological scenario reduction for stochastic optimization in hydrothermal power systems. **Applied Stochastic Models in Business and Industry**, v. 3, p. 231–240, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Brasil foi o quarto País em crescimento de energia eólica em 2015. **ABEEólica**, 2016. Disponível em: <http://www.canalbioenergia.com.br/brasil-foi-o-quarto-pais-em-crescimento-de-energia-eolica-em-2015/>. Acesso em: 11 nov. 2019.

BERNAL, B.; MOLERO, J. C.; GARCIA, F. P. de. Impact of fossil fuel prices on electricity prices in Mexico. **Journal of Economic Studies**, v. 46, n. 2, p. 356-371, 2019.

BOMFIM, M. **Erro do governo e seca fizeram luz subir 42% no ano, dizem especialistas**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2015/07/04/erro-do-governo-e-seca-fizeram-luz-subir-42-no-ano-dizem-especialistas.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em: 19 nov. 2019.

BUENO, R. de L. da S. **Econometria de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

BRADSHAW, A.; JANNUZZI, G. DE M. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p. 1-11, 2019.

COSMO, V. D.; VALERI, L. M. Wind, storage, interconnection and the cost of electricity generation. **Energy Economics**, v. 69, p. 1-18, 2018.

CRAIDE, S. **Aumento tarifa de energia elétrica no Brasil em 2015 ANEEL**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-04/cinco-distribuidoras-terao-mais-aumento-de-energia-partir-da-proxima-semana>. Acesso em: 19 nov. 2019.

DICKEY, D. A. Stationarity issues in time series models. **North Carolina State University**, paper 192-30, 2015.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. **Econometrica**, v. 49, n. 4, p. 1057-1072, 1981.

DONG, X. et al. Estimating the Wind Power Integration Threshold Considering Electro-Thermal Coupling of Overhead Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 5, p. 3349-3358, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco energético nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-127/topico-97/Relat%C3%B3rio%20Final%202015.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2019.

_____. **Balanco energético nacional 2016: ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relat%C3%B3rio%20Final%202016.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2019.

_____. **Balanco energético nacional 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso em: 07 nov. 2019.

_____. **Balanco energético nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 07 nov. 2019.

FISCHER-KOWALSKI, M. et al. Energy transitions and social revolutions. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 138, p. 69-77, 2019.

GALVÃO, J.; BERMAN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, v. 29, p. 43-68, 2015.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind 2016 Report: annual market update. **GWEC**, 2016. Disponível em: <http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>. Acesso em: 11 nov 2019.

GUAN, J.; PANG, L. Bidirectional relationship between network position and knowledge creation in Scientometrics. **Scientometrics**, v. 115, n. 1, p. 201–222, 2018.

GUJARATI; D. N. **Econometria básica**. São Paulo: Makron Books, 2000.

HASEEB, M. et al. The Impact of Renewable Energy on Economic Well-Being of Malaysia: Fresh Evidence from Auto Regressive Distributed Lag Bound Testing Approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, n. 1, p. 269-275, 2018.

HOELTGEBAUM, H.; FERNANDES, C.; STREET, A. Generating joint scenarios for renewable generation: the case for non-gaussian models with time-varying parameters. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 6, 2018.

HUNT, J. D.; STILPEN, D.; FREITAS, M. A. V. de. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 208-222, 2018.

KHAN, S.; PENG, Z.; LI, Y. Energy consumption, environmental degradation, economic growth and financial development in globe: Dynamic simultaneous equations panel analysis. **Energy Reports**, v. 5, p. 1089-1102, 2019.

KIM, J.; CHO, H. Seemingly unrelated regression tree. **Journal of Applied Statistics**, v. 46, n. 7, p. 1177-1195, 2018.

KWIATKOWSKI, D. et al. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. **Journal of Econometrics**, v. 54, p. 159-178, 1992.

LIMA, F. J. L. de et al. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 335-346, 2019.

LIU, J. et al. Impact of climate-related changes to the timing of autumn foliage colouration on tourism in Japan. **Tourism Management**, v. 70, p. 262-272, 2019.

MASTEN, M. A. Random coefficients on endogenous variables in simultaneous equations models. **The Review of Economic Studies**, v. 85, n. 2, p. 1193-1250, 2018.

MELO, L. B. et al. Impacts of the hydrological potential change on the energy matrix of the Brazilian State of Minas Gerais: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 415-422, 2019.

MENDES, L. F. R.; STHEL, M. S. Analysis of the hydrological cycle and its impacts on the sustainability of the electric matrix in the state of Rio de Janeiro/Brazil. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, p. 119-126, 2018.

MORETTIN, P. A. **Econometria financeira**: um curso em séries temporais financeira. 3. ed. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

NOVA CANA. Produção de cana-de-açúcar da BrasilAgro cresceu 42% em 2015. **Nova Cana**, 2016. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/producao-cana-de-acucar-brasilagro-cresceu-42-2015-050216>. Acesso em: 11 nov. 2019.

NG, J. Y.; TURNER, S. W. D.; GALELLI, S. Influence of El Niño Southern Oscillation on global hydropower production. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 3, p. 1-10, 2017.

PAIM, M. A. et al. Evaluating regulatory strategies for mitigating hydrological risk in Brazil through diversification of its electricity mix. **Energy Policy**, v. 128, p. 393-401, 2019.

PARAJULI, R.; ZHANG, D.; CHANG, S. J. Modeling stumpage markets using vector error correction vs. simultaneous equation estimation approach: A case of the Louisiana sawtimber market. **Forest Policy and Economics**, v. 70, p. 16-19, 2016

PLATONOW, V. Seca e aumento da tarifa de energia. **Agência Brasil**, 2014. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-10/falta-de-chuva-reforca-necessidade-de-usinas-nucleares-dizem-especialistas>. Acesso em: 11 nov. 2019.

RAMSER, C. A. DE S. et al. The importance of principal components in studying mineral prices using vector autoregressive models: Evidence from the Brazilian economy. **Resources Policy**, v. 62, p. 9–21, 2019.

SAIDI, K.; HAMMAMI, S. The impact of energy consumption and CO2 emissions on economic growth: Fresh evidence from dynamic simultaneous-equations models. **Sustainable Cities and Society**, v. 14, p. 178-186, 2015.

SANTOS, I. F. S. dos et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54-63, 2018.

SANTOS, V. dos et al. Isotopic composition of precipitation during strong El Niño–Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. **Hydrological Processes**, v. 33, p. 647-660, 2018.

SENNA, V. de; SOUZA, A. M. Assessment of the relationship of government spending on social assistance programs with Brazilian macroeconomic variables. **Physica A**, v. 462, p. 21-31, 2016.

SILVA, R. C da; MARCHI NETO, I. de; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328-341, 2016.

SUPINO, E. et al. Strategic scenario analysis combining dynamic balanced scorecards and statistics. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2019. DOI: 10.1108/IJPPM-09-2018-0326.

TAMBA, J. G.; NSOUANDÉLÉ, J. L.; LÉLÉ, A. F. Gasoline consumption and economic growth: Evidence from Cameroon. Evidence from Cameroon. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 12, n. 8, p. 658-691, 2017.

WANG, J.; ZHAO, J.; LI, H. The Electricity Consumption and Economic Growth Nexus in China: A Bootstrap Seemingly Unrelated Regression Estimator Approach. **Computational Economics**, v. 52, n. 4, p. 1195-1211, 2018.

WANG, Z. et al. Renewable energy consumption, economic growth and human development index in Pakistan: Evidence form simultaneous equation model. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1081-1090, 2018.

YU, J. J.; YOO, S. H.; BAEK, C. Economies of Scale in the South Korean Natural Gas Industry. **Energies**, v. 12, n. 8, 1557, 2019.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **American Statistical Association Journal**, v. 57, n. 298, p. 348-368. 1962.

APÊNDICE

Sistema de Equações Simultâneas:

$$\begin{aligned} \mathbf{Biomassa} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} + \\ & 0,0613760756713*CO_{t-2} - 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + \\ & 0,0719888296436*E_{t-2} + 0,021552934944*G_{t-3} - 0,0406070071017*H_{t-1} + \\ & 0,0280179884712*H_{t-2} + 0,00699965677552*H_{t-4} - 0,00659869031596*H_{t-6} + \\ & 0,0119047239696*H_{t-7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Carvão} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} + \\ & 0,0613760756713*CO_{t-2} - 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + \\ & 0,0719888296436*E_{t-2} + 0,021552934944*G_{t-3} - 0,0406070071017*H_{t-1} + \\ & 0,0280179884712*H_{t-2} + 0,0119047239696*H_{t-7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Combustíveis} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} - \\ & 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + 0,0719888296436*E_{t-2} + \\ & 0,021552934944*G_{t-3} - 0,0406070071017*H_{t-1} + 0,0280179884712*H_{t-2} + \\ & 0,0119047239696*H_{t-7} + 0,0310210785564*N_{t-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Eólica} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} - \\ & 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + 0,0719888296436*E_{t-2} + \\ & 0,021552934944*G_{t-3} - 0,0406070071017*H_{t-1} + 0,0280179884712*H_{t-2} + \\ & 0,00699965677552*H_{t-4} - 0,00659869031596*H_{t-6} + 0,0119047239696*H_{t-7} + \\ & 0,0310210785564*N_{t-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Gás Natural} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} + \\ & 0,0613760756713*CO_{t-2} - 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + \\ & 0,0719888296436*E_{t-2} - 0,0406070071017*H_{t-1} + 0,0280179884712*H_{t-2} + \\ & 0,00699965677552*H_{t-4} - 0,00659869031596*H_{t-6} + 0,0119047239696*H_{t-7} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Hidráulica} = & -0,374133622389*B_{t-1} - 0,116148965022*CO_{t-1} + \\ & 0,0613760756713*CO_{t-2} - 0,128823890633*CO_{t-6} + 0,144916782563*CO_{t-7} + \\ & 0,0719888296436*E_{t-2} + 0,021552934944*G_{t-3} - 0,0406070071017*H_{t-1} + \\ & 0,0280179884712*H_{t-2} + 0,0119047239696*H_{t-7} \end{aligned}$$

Em que: B = Biomassa; CA = Carvão; CO = Combustíveis; E = Eólica; G = Gás Natural; H = Hidráulica; todos os coeficientes foram significativos com p-valor $\leq 0,05$.

6 DISCUSSÃO

A matriz energética é composta por todas as fontes disponíveis que geram energia para movimentação ou eletricidade. Dentre as fontes de energia mais estudadas pelo *corpus* de revisão, destacam-se as fontes de biomassa, solar, eólica e térmicas. No Brasil, os estudos concentraram-se na geração elétrica a partir da biomassa, velocidade dos ventos, energia solar e gás natural.

A tendência apontada pelos artigos foi o aumento da utilização da biomassa por ser uma fonte bivalente, a qual pode ser destinada para a produção de biocombustíveis ou para a produção de biogás, utilizado na geração elétrica (BROWN, 2019). A biomassa também aparece na maioria dos estudos elaborados no Brasil, uma vez que apresenta grande potencial de geração no país (BIERNASKI; SILVA, 2018; FREITAS et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019).

Uma das metodologias mais utilizadas pelo *corpus* de revisão foi a simulação de cenários, a qual também foi aplicada nesta pesquisa por meio do ajuste de um sistema de equações simultâneas e sua avaliação utilizando cenários de geração de eletricidade (PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016; JOPERT et al., 2017). Na análise de cenários, foi possível verificar que a fonte hidráulica apresentaria impactos de maior amplitude por ser responsável por gerar mais da metade da eletricidade consumida no país, ao mesmo tempo em que demonstrou forte dependência das fontes térmicas em períodos de escassez das chuvas (NG; TURNER; GALELLI, 2017; EPE, 2018; MENDES; STHEL, 2018).

Além dos períodos de seca, ressalta-se a dependência das fontes térmicas no Brasil pela volatilidade inerente às fontes renováveis, a qual é causada por variações climáticas (HOELTGEBAUM; FERNANDES; STREET, 2018; JONG et al., 2019; SILVA et al., 2019). Muitas das pesquisas que compuseram o *corpus* de revisão propuseram prever e avaliar essas condições climáticas adversas, como variações na velocidade dos ventos e na intensidade de irradiação solar (PES et al., 2017; SARMIENTO et al., 2018; REBOUÇAS et al., 2019;).

Outro ponto evidenciado pelos artigos foi a necessidade de desenvolver políticas que incentivem mais a geração renovável em todo o mundo (DUTRA; SZKLO, 2008; BARROS; TIAGO FILHO; SILVA, 2014). No caso específico do Brasil, salienta-se a inevitabilidade de que maiores esforços sejam aplicados às políticas governamentais e incentivos financeiros, a fim de aumentar a geração proveniente das fontes biomassa, eólica e solar (JUNQUEIRA; CAVALETT; BONOMI, 2016; CARSTENS; CUNHA, 2019; LIMA et al., 2019). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

precisam considerar, no planejamento a longo prazo do sistema elétrico brasileiro, a adesão em massa das fontes renováveis não convencionais concomitantemente com o desenvolvimento e incentivo de ações que tornem a geração não renovável mais barata e menos nociva para o meio ambiente, a fim de compensar a volatilidade das fontes renováveis e manter a estabilidade no fornecimento de eletricidade no país. Esses esforços devem estar voltados principalmente para a energia solar, pois é uma fonte de grande potencial energético no país, porém ainda pouco utilizado (EPE, 2018; CARSTENS; CUNHA, 2019; LIMA et al., 2019).

Por fim, no âmbito organizacional, as empresas são encorajadas a implementar a geração distribuída em suas unidades produtivas, como a instalação de painéis de energia fotovoltaica, pois, a longo prazo, essa atitude reduz o custo fixo de eletricidade ao mesmo tempo em que contribui para a geração de energia mais limpa e eficiente (CHESSER et al., 2018; CARSTENS; CUNHA, 2019).

7 CONCLUSÃO

A gestão energética é fator estratégico de âmbito mundial, pois é uma das principais ações que podem garantir o uso sustentável dos recursos naturais. A capacidade de renovação das fontes geradoras reflete a competitividade de um país no cenário mundial. No que tange a matriz elétrica, faz-se necessário compreender as interações existentes entre as fontes de eletricidade, a fim de realizar o planejamento do sistema elétrico de modo mais eficiente e sustentável.

Nessa pesquisa, para a Revisão Sistemática de Literatura, foram analisadas as publicações científicas relacionadas à matriz energética e as principais fontes geradoras utilizadas, e a variável de interesse para a modelagem econométrica foi a quantidade de energia elétrica gerada (GWh) pelas principais fontes da matriz elétrica brasileira: biomassa, carvão, combustíveis, eólica, gás natural, hidráulica e nuclear.

Todos os objetivos propostos por essa pesquisa foram alcançados, uma vez que foi possível identificar o estado da arte das publicações referentes ao tema matriz energética, seguindo o protocolo de Revisão Sistemática, e avaliar as inter-relações existentes entre as principais fontes da matriz elétrica brasileira, utilizando a elaboração de cenários otimista e pessimista.

Em um horizonte otimista, verificou-se que a geração das fontes biomassa, eólica, carvão e combustíveis diminuiria e aumentaria a utilização da fonte hidráulica. De modo contrário, em um horizonte pessimista, verificou-se a diminuição da geração de eletricidade a partir do gás natural e o aumento do uso de combustíveis.

Comparado com o cenário base, a fonte hidráulica foi a que apresentou maiores impactos na sua geração, ao mesmo tempo em que mostrou forte dependência das fontes térmicas em períodos de escassez das chuvas. Uma das alternativas para diminuir essa dependência é aumentar a utilização das fontes renováveis não convencionais, como biomassa, eólica e solar. Porém, essas fontes são mais vulneráveis às mudanças climáticas, principalmente variações na velocidade dos ventos e na intensidade de irradiação solar.

A limitação do estudo foi não analisar os fatores externos que poderiam afetar a geração das fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, como variáveis climáticas, consumo de eletricidade no país e ocorrência de crises econômicas. Sugere-se, para pesquisas futuras, analisar de uma forma completa a matriz elétrica, prevendo a geração de eletricidade de todas as fontes que formam o sistema elétrico e investigando a instabilidade da geração de fontes renováveis, por meio de modelos econométricos de volatilidade.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, S.; KLOBODOU, E. K. M.; APIO, A. Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. **Renewable Energy**, v. 125, p. 755-767, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração por fonte**. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/dados/geracao>. Acesso em: 30 set. 2019.
- ANDERSEN, H; HEPBURN, B. Scientific Method. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. Disponível em: <https://stanford.library.sydney.edu.au/entries/scientific-method/>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- ANTONAKAKIS, N.; CHATZIANTONIOU, I.; FILIS, G. Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: An ethical dilemma. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. 1, p. 808-824, 2017.
- ARMINEN, H.; MENEGAKI, A. N. Corruption, climate and the energy-environment-growth nexus. **Energy Economics**, v. 80, p. 621-634, 2019.
- ATEMS, B.; HOTALING, C. The effect of renewable and nonrenewable electricity generation on economic growth. **Energy Policy**, v. 112, p. 111-118, 2018.
- BARROS, R. M., TIAGO FILHO, G. L., SILVA, T. R. da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150-164, 2014.
- BIERNASKI I.; SILVA, C. Main variables of Brazilian public policies on biomass use and energy. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, 2018.
- BLACK, M. **Critical Thinking: An Introduction to Logic and Scientific Method**. Pickle Partners Publishing, 2018.
- BROWN, R. C. (2019). **Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power**. Wiley Series in Renewable Resource. New Jersey: John Wiley & Sons.
- BUENO, R. de L. da S. **Econometria de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- CADENAS, E.; RIVERA, W. Wind speed forecasting in three different regions of Mexico, using a hybrid ARIMA e ANN model. **Renewable Energy**, v. 35, p. 2732-2738, 2010.
- CAI, Y.; SAM, C. Y.; CHANG, T. Nexus between clean energy consumption, economic growth and CO2 emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 1001-1011, 2018.
- CAMELO, H. do N. et al. A hybrid model based on time series models and neural network for forecasting wind speed in the Brazilian northeast region. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 28, p. 65-72, 2018.

- _____. Innovative hybrid modeling of wind speed prediction involving time-series models and artificial neural networks. **Atmosphere**, v. 9, n. 2, 2018.
- CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396-404, 2019.
- CHESSER, M. et al. The positive feedback cycle in the electricity market: Residential solar PV adoption, electricity demand and prices. **Energy Policy**, v. 122, p. 36-44, 2018.
- DICKEY, D. A. Stationarity issues in time series models. **North Carolina State University**, paper 192-30, 2015.
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. **Econometrica**, v. 49, n. 4, p. 1057-1072, 1981.
- DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, p. 65-76, 2008.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco energético nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 07 nov. 2019.
- ENDERS, W. **Applied econometric time series: Wiley series in probability and mathematical statistics**. New York: Wiley, 1995.
- ERENOĞLU, A. K.; ERDİNÇ, O.; TAŞCIKARAOĞLU, A. History of Electricity. In: TAŞCIKARAOĞLU, A; ERDİNÇ, O. (Org.). **Pathways to a Smarter Power System**, Cambridge: Academic Press, 2019, cap. 1, p. 1-27.
- ESSO, L. J.; KEHO, Y. Energy consumption, economic growth and carbon emissions: Cointegration and causality evidence from selected African countries. **Energy**, v. 114, p. 492-497, 2016.
- ESTRELA, C. (Org.). **Metodologia Científica: Ciência, Ensino, Pesquisa**. 3. ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 2018.
- FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 181-191, 2018.
- FERREIRA, J. H. I. et al. Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 380-387, 2016.
- FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2010.

GONÇALVES, V. A. da S.; SANTOS, F. M. H. dos. Energy management system ISO 50001:2011 and energy management for sustainable development. **Energy Policy**, v. 133, 2019. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.07.004.

GORUS, M. S.; AYDIN, M. The relationship between energy consumption, economic growth, and CO2 emission in MENA countries: Causality analysis in the frequency domain. **Energy**, v. 168, p. 815-822, 2019.

GRANGER, C. W. J. Time Series Analysis, Cointegration, and Applications. **American Economic Review**, v. 94, n. 3, p. 421-425, 2004.

GUAN, J.; PANG, L. Bidirectional relationship between network position and knowledge creation in Scientometrics. **Scientometrics**, v. 115, n. 1, p. 201–222, 2018.

GUJARATI; D. N. **Econometria básica**. São Paulo: Makron Books, 2000.

HAO, Y.; HU, X. L.; CHEN, H. Y. On the relationship between water use and economic growth in China: New evidence from simultaneous equation model analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 953-965, 2019.

HASEEB, M. et al. The Impact of Renewable Energy on Economic Well-Being of Malaysia: Fresh Evidence from Auto Regressive Distributed Lag Bound Testing Approach. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 9, n. 1, p. 269-275, 2018.

HDOM, H. A. D. Examining carbon dioxide emissions, fossil & renewable electricity generation and economic growth: Evidence from a panel of South American countries. **Renewable Energy**, v. 139, p. 186-197, 2019.

HOELTGEBAUM, H.; FERNANDES, C.; STREET, A. Generating joint scenarios for renewable generation: the case for non-gaussian models with time-varying parameters. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 6, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Total primary energy supply (TPES) by source, World 1990-2017**. IEA, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/>. Acesso em 29 nov. 2019.

_____. **Share of Renewables in Total Energy Production (%)**. IEA, 2017. Disponível em: <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1076250891/1>. Acesso em 29 nov. 2019.

_____. **Share of Renewables in Electricity Production (%)**. IEA, 2017. Disponível em: <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1076250891/4>. Acesso em 29 nov. 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global energy transformation: a roadmap to 2050**. Abu Dhabi, 2018. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>. Acesso em: 21 nov. 2018.

JONG, P. et al. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390-401, 2019.

JOPPERT, C. et al. Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 63-73, 2017.

JUNQUEIRA, T.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. The virtual sugarcane biorefinery a simulation tool to support public policies formulation in bioenergy. **Industrial Biotechnology**, v. 12, p. 62-67, 2016.

KHAN, S.; PENG, Z.; LI, Y. Energy consumption, environmental degradation, economic growth and financial development in globe: Dynamic simultaneous equations panel analysis. **Energy Reports**, v. 5, p. 1089-1102, 2019.

KRUG, J. H. A. Accounting of GHG emissions and removals from forest management: a long road from Kyoto to Paris. **Carbon Balance and Management**, v. 13, 2018. Disponível em: <https://cbmjournals.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-017-0089-6#citeas>. Acesso em 29 nov. 2019. DOI:10.1186/s13021-017-0089-6.

KWIATKOWSKI, D. et al. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. **Journal of Econometrics**, v. 54, p. 159-178, 1992.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M de A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LIMA, F. J. L. de et al. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 335-346, 2019.

LIU, H. et al. A hybrid model for wind speed prediction using empirical mode decomposition and artificial neural networks. **Renewable Energy**, v. 48, p.545-556, 2012.

LLERENA, O. R. P. et al. Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 65-75, 2019.

LUZ, T. da; MOURA, P. Power generation expansion planning with complementarity between renewable sources and regions for 100% renewable energy systems. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 29, n. 7, 2019. DOI: 10.1002/2050-7038.2817.

MARDANI, A. et al. Energy consumption, economic growth, and CO2 emissions in G20 countries: Application of adaptive neuro-fuzzy inference system. **Energies**, v. 11, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/en11102771.

MASTEN, M. A. Random coefficients on endogenous variables in simultaneous equations models. **The Review of Economic Studies**, v. 85, n. 2, p. 1193-1250, 2018.

MCCOLLUM, D. L. et al. Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. **Nature Energy**, v. 3, n. 7, p. 589–599, 2018. DOI:10.1038/s41560-018-0179-z.

- MENDES, L. F. R.; STHEL, M. S. Analysis of the hydrological cycle and its impacts on the sustainability of the electric matrix in the state of Rio de Janeiro/Brazil. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, p. 119-126, 2018.
- MIRZA, F. M.; KANWAL, A. Energy consumption, carbon emissions and economic growth in Pakistan: Dynamic causality analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1233-1240, 2017.
- MORETTIN, P. A. **Econometria financeira: um curso em séries temporais financeira**. 3. ed. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- NASREEN, S.; SAIDI, S.; OZTURK, I. Assessing links between energy consumption, freight transport, and economic growth: evidence from dynamic simultaneous equation models. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 17, p. 16825-16841, 2018.
- NG, J. Y.; TURNER, S. W. D.; GALELLI, S. Influence of El Niño Southern Oscillation on global hydropower production. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 3, p. 1-10, 2017.
- NORONHA, M de O.; ZANINI, R. R.; SOUZA, A. M. The impact of electric generation capacity by renewable and non-renewable energy in Brazilian economic growth. **Environmental Science and Pollution Research**, 2019, DOI: 10.1007/s11356-019-06241-4.
- OMRI, A.; KAHOUALI, B. Causal relationships between energy consumption, foreign direct investment and economic growth: Fresh evidence from dynamic simultaneous-equations models. **Energy Policy**, v. 67, p. 913-922, 2014.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O Sistema Interligado Nacional**. ONS, 2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- _____. **O Que é ONS**. ONS, 2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- PARAJULI, R.; ZHANG, D.; CHANG, S. J. Modeling stumpage markets using vector error correction vs. simultaneous equation estimation approach: A case of the Louisiana sawtimber market. **Forest Policy and Economics**, v. 70, p. 16-19, 2016.
- PEDROSO, L. L. de A. et al. Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo / Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.
- PES, M. et al. Climate trends on the extreme winds in Brazil. **Renewable Energy**, v. 109, p. 110-120, 2017.
- PINTO, J.; AMARAL, K.; JANISSEK, P. Deployment of fotovoltaics in Brazil scenarios perspectives and policies for lowincome housing. **Solar Energy**, v. 133, p. 73-84, 2016.
- POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. The logic of scientific discovery. Tradução Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. 2. ed. São Paulo: Cultrix, 2013.

QUEIROZ, A. R. de et al. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873-882, 2019.

RAMSER, C. A. DE S. et al. The importance of principal components in studying mineral prices using vector autoregressive models: Evidence from the Brazilian economy. **Resources Policy**, v. 62, p. 9–21, 2019.

REBOUÇAS, F. P. et al. Energy production predication via internet of thing-based machine learning system. **Future Generation Computer Systems**, v. 97, p. 180-193, 2019.

REGO, E. E.; RIBEIRO, C. de O. Successful Brazilian experience for promoting wind energy generation. **The Electricity Journal**, v. 31, n. 2, p. 13-17, 2018.

ROCHA, F. J. S.; BRILHANTE, Á. A. **Introdução à metodologia de Vetor Autorregressivo (VAR): teoria e aplicação**. São Paulo: Iglu, 2015.

RODRIGUES, S. A. et al. Potential use of methane and syngas from residues generated in rice industries of Pelotas, Rio Grande do Sul, thermal and electrical energy. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1003-1016, 2019.

SAIDI, K.; HAMMAMI, S. The impact of energy consumption and CO2 emissions on economic growth: Fresh evidence from dynamic simultaneous-equations models. **Sustainable Cities and Society**, v. 14, p. 178-186, 2015.

SANCHEZ, L.; VÁSQUEZ, C.; VILORIA, A. The data envelopment analysis to determine efficiency of Latin American countries for greenhouse gases control in electric power generation. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 8, p. 197-208, 2018.

SANTOS, V. dos et al. Isotopic composition of precipitation during strong El Niño–Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. **Hydrological Processes**, v. 33, p. 647-660, 2018.

SARMIENTO, N. et al. A solar irradiation gis as decision support tool for the province of Salta Argentina. **Renewable Energy**, v. 132, p. 68-80, 2018.

SENNA, V. de; SOUZA, A. M. Assessment of the relationship of government spending on social assistance programs with Brazilian macroeconomic variables. **Physica A**, v. 462, p. 21-31, 2016.

SGARBI, F. de A. et al. An assessment of the socioeconomic externalities of hydropower plants in Brazil. **Energy Policy**, v. 129, p. 868-879, 2019.

SILVA, W. L. et al. Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, n. 1-2, p. 353-371, 2019.

SMIL, V. **Energy in World History**. Abingdon: Routledge, 2019. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=0AScDwAAQBAJ&dq=energy+in+world+history&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s. Acesso em 29 nov. 2019.

SOUZA, F.M. **Modelos de previsão**: aplicações à energia elétrica ARIMA-ARCH-AI e ACP. 1. ed. Curitiba: Appris, 2016.

SOUKIAZIS, E.; PROENÇA, S.; CERQUEIRA, P. A. The Interconnections between Renewable Energy, Economic Development and Environmental Pollution: A Simultaneous Equation System Approach. **Energy Journal**, v. 40, n. 4, p. 1-23, 2019.

TORINELLI, V. H.; SILVA JR, A. F. de A. da; ANDRADE, J. C. S. Wind power energy in Brazil: public financing and future perspectives. **Latin American Journal of Management for Sustainable Development**, v. 4, n. 1, p. 41-54, 2018.

TRAN, N. V. et al. Trade off between environment, energy consumption and human development: Do levels of economic development matter? **Energy**, v. 173, p. 483-493, 2019.

WANG, J.; ZHAO, J.; LI, H. The Electricity Consumption and Economic Growth Nexus in China: A Bootstrap Seemingly Unrelated Regression Estimator Approach. **Computational Economics**, v. 52, n. 4, p. 1195-1211, 2018.

WANG, Z. et al. Renewable energy consumption, economic growth and human development index in Pakistan: Evidence form simultaneous equation model. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1081-1090, 2018.

YAO, S.; ZHANG, S.; ZHANG, X. Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1338-1352, 2019.

YU, J. J.; YOO, S. H.; BAEK, C. Economies of Scale in the South Korean Natural Gas Industry. **Energies**, v. 12, n. 8, 1557, 2019.

ZELLNER, A. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. **American Statistical Association Journal**, v. 57, n. 298, p. 348-368. 1962.