



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
MESTRADO E DOUTORADO EM ECONOMIA

DAIANA DALLA VECCHIA

DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS
NÃO CONVENCIONAIS: UMA ANÁLISE EM TRÊS ENSAIOS

SALVADOR

2019

DAIANA DALLA VECCHIA

**DESAFIOS PARA A CONSOLIDAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS
NÃO CONVENCIONAIS: UMA ANÁLISE EM TRÊS ENSAIOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Economia.

Área de concentração: Economia Aplicada.

Orientador: Prof^a. Dra. Gisele Ferreira Tiryaki.

SALVADOR

2019

V397

Vecchia, Daiana Dalla

Desafios para a consolidação das fontes de energia renováveis não convencionais: uma análise em três anos/ Daiana Dalla Vecchia. – Salvador, 2019.

146 f.; il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Economia. Orientadora: Prof^ª Dr^ª Gisele Ferreira Tiryaki.

1. Fontes de energia. 2. Energia eólica. 3. Energia – fontes renováveis. 4. Fontes renováveis – custos. I. Universidade Federal da Bahia. II. Tiryaki, Gisele Ferreira. III. Título.

CDD: 333.794



Universidade Federal da Bahia
Faculdade de Economia
Programa de Pós-Graduação em Economia
Mestrado e Doutorado em Economia

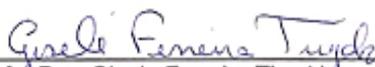
TERMO DE APROVAÇÃO

Daiana Dalla Vecchia

"Desafios para a consolidação das fontes de energia renováveis não convencionais:
uma análise em três ensaios"

Tese de Doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora em Economia no Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia da Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Salvador, 15 de maio de 2019.


Prof.ª Dra. Gisele Ferreira Tiryaki
(Orientadora - PPGE/ECO/UFBA)


Prof. Dr. André Luís Mota dos Santos
(PPGE/ECO/UFBA)


Prof. Dr. Gervásio Ferreira dos Santos
(PPGE/ECO/UFBA)


Prof. Dr. Paulo Nazareno Alves Almeida
(UEFS)


Prof. Dr. Osvaldo Livio Soliano Pereira
(UFBA)

Aos meus pais Wilson e Deloni, meu irmão Pablo e meu
companheiro Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, por me guiar, dar coragem e inspiração durante essa trajetória cheia de incertezas.

À minha família, pelo incessante apoio e carinho, em especial à minha amada mãe pelo seu amor incondicional.

Ao meu companheiro Marcelo, por estar ao meu lado todos os dias, pelas palavras de incentivo e por toda atenção a mim dedicada.

Aos meus amigos, pelos bons e por aqueles nem tão bons momentos compartilhados.

À minha orientadora, professora Gisele, pelo apoio e paciência despendidos.

Aos professores Paulo, Osvaldo, André e Gervásio, por aceitarem fazer parte da banca.

À secretaria do PPGE.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo apoio financeiro concedido para a realização do curso.

RESUMO

O uso de fontes de energia renováveis é importante não só para mitigar os impactos ambientais, como também para reduzir a dependência, promover a autossuficiência e ampliar o acesso da população à energia. Em que pese as fontes convencionais ainda atenderem a maior parte da demanda mundial por eletricidade, a geração via fontes renováveis não convencionais, ou seja, que não incluem usinas hidrelétricas de grande porte, tem sido fortemente incentivada. O uso dessas fontes estimula a difusão tecnológica, particularmente em países em desenvolvimento, onde os fornecedores de equipamentos muitas vezes criam novas unidades industriais, gerando empregos e fomentando o desenvolvimento de negócios locais. Nesse sentido, o uso de fontes de energia abundantes, economicamente acessíveis e menos nocivas ao meio ambiente é elemento crucial na superação das contradições do modelo econômico atual. O objetivo geral desta tese é analisar os desafios para a consolidação das fontes de energia renováveis não convencionais. Para tanto, a mesma está estruturada em três ensaios. O primeiro analisa o impacto da qualidade institucional sobre os custos dos investimentos privados em fontes renováveis não convencionais, em países em desenvolvimento. Contribui para a literatura que se refere à relação entre instituições e qualidade ambiental, ampliando o foco de análise ao abordar aspectos econômicos desta relação. Ademais, se destaca por utilizar uma amostra significativa de mais de 1600 projetos de fontes renováveis não convencionais, em 68 países em desenvolvimento. O segundo ensaio avalia a eficiência técnica dos projetos de energia eólica brasileiros em operação comercial. Contribui para o desenvolvimento da literatura ao ser o primeiro trabalho a analisar a eficiência técnica na geração eólica brasileira, uma das fontes que mais tem se expandido no país nos últimos anos. O terceiro ensaio analisa se a introdução de fontes renováveis não convencionais no Brasil tem proporcionado preços mais acessíveis aos consumidores. É um estudo inédito para o setor energético brasileiro, contribuindo para o desenvolvimento da literatura. Os resultados apontam que a qualidade do arcabouço institucional, a eficiência dos projetos e a modicidade dos preços da energia elétrica gerada são importantes para fomentar o uso das fontes renováveis não convencionais. A inserção dessas fontes permite a construção de uma matriz energética mais competitiva, segura e sustentável do ponto de vista social, econômico e ambiental.

Palavras-chave: Energia Renovável. Instituições de Governança. Ambiente de Negócios. Eficiência Técnica. Preços.

ABSTRACT

The use of renewable energy sources is important not only to mitigate environmental impacts, but also to reduce dependency, promote self-sufficiency and broaden people's access to energy. Although conventional sources still meet most of the world's demand for electricity, generation through non-conventional renewable sources, i.e. not including large hydroelectric plants, has been strongly encouraged. The use of these sources encourages technological diffusion, particularly in developing countries, where equipment suppliers often create new industrial units, generating jobs and fostering the development of local businesses. In this sense, the use of abundant sources of energy, economically accessible and less harmful to the environment is a crucial element in overcoming the contradictions of the current economic model. The general objective of this thesis is to analyze the challenges for the consolidation of non-conventional renewable energy sources. Therefore, it is structured in three trials. The first examines the impact of institutional quality on the costs of private investment in non-conventional renewable sources in developing countries. It contributes to the literature that refers to the relationship between institutions and environmental quality, broadening the focus of analysis when addressing economic aspects of this relationship. In addition, it stands out for using a significant sample of over 1600 unconventional renewable energy projects in 68 developing countries. The second essay evaluates the technical efficiency of Brazilian wind energy projects in commercial operation. It contributes to the development of literature as the first work to analyze technical efficiency in Brazilian wind generation, one of the sources that has expanded the most in the country in recent years. The third essay examines whether the introduction of non-conventional renewable sources in Brazil has provided more affordable prices to consumers. It is an unprecedented study for the Brazilian energy sector, contributing to the development of literature. The results indicate that the quality of the institutional framework, the efficiency of the projects and the low prices of the electric energy generated are important to promote the use of non-conventional renewable sources. The insertion of these sources allows the construction of a more competitive, secure and sustainable energy matrix from the social, economic and environmental point of view.

Keywords: Renewable Energy. Institutions of Governance. Business environment. Technical Efficiency. Prices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estatísticas de Influência, dados países em desenvolvimento - 2002 a 2017.....	46
Figura 2 - Eficiência Técnica e Alocativa	63
Figura 3 - Técnicas de Mensuração de Fronteiras de Eficiência.....	64
Figura 4 - Ambientes de Contratação de Energia Elétrica no Brasil.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por Região: 1990-2017.	24
Gráfico 2 - Percentual de investimento e capacidade instalada de novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por país: 1990-2017.....	25
Gráfico 3 - Novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por fonte: 1990-2017.	26
Gráfico 4 - Investimento por unidade de capacidade de novos projetos de geração de energia, por tipo de fonte: 1990-2017.	27
Gráfico 5 – Custo por unidade de capacidade de novos projetos de geração de energia, por tipo de fonte e por país: 1990-2017.	28
Gráfico 6 - Evolução da potência eólica instalada, Brasil – 2000 a 2018.	56
Gráfico 7 - Preço médio da energia eólica nos leilões realizados no Brasil – 2009 a 2018.	57
Gráfico 8 - Preço médio de venda leilões de energia realizados no Brasil entre 2005 e 2018.	58
Gráfico 9 - Geração média energia eólica por estado, 2015 a 2017- Brasil.	59
Gráfico 10 - Número de consumidores no ACL – 2006 a 2018.....	96
Gráfico 11 - PLD médio mensal por submercado - 2003 a 2018.....	97
Gráfico 12 – Volatilidade e média do PLD – 2005 a 2018.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Principais técnicas de fronteira e não fronteira de análise de eficiência.....	66
Quadro 2- Diferença entre ACR e ACL	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlações Cruzadas entre indicadores de governança institucional e ambiente de negócios.....	38
Tabela 2 - Análise Econométrica: Resultados MQO e MQROB.	47
Tabela 3 - Resultados da regressão da função fronteira de produção utilizando o modelo proposto por Schmidt e Sickles (1984).	83
Tabela 4 - Distribuição de frequência dos níveis de eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica.	83
Tabela 5 - Ranking dos projetos de energia eólica mais eficientes.	85
Tabela 6 - Resultados da análise de regressão de <i>TOBIT</i> para os projetos eólicos.	86
Tabela 7- Testes de erro de especificação da regressão, teste de heterocedasticidade e teste de autocorrelação.....	113
Tabela 8 - Resultados das regressões estimadas por meio do método MQ2E.	114

LISTA DE SIGLAS

ABRACEEL	Associação Brasileira dos Agentes Comercializadores de Energia Elétrica
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AFP	Análise do Fator Principal (<i>Principal Factor Analysis</i>)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BTS	Teste de esfericidade de Bartlett (<i>Bartlett test of sphericity</i>)
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCEAR	Contratos de Compra e Venda de Energia Elétrica no Ambiente Regulado
CFA	Análise Confirmatória de Fatores (<i>Confirmatory Factor Analysis</i>)
CMO	Custo Marginal de Operação
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
DEA	Análise Envoltória de Dados (<i>Data Envelopment Analysis</i>)
DMU	Unidades Tomadoras de Decisões (<i>Decision Making Unit</i>)
EFA	Análise Exploratória de Fatores (<i>Exploratory Analysis of Factors</i>)
FDH	Fronteira com Livre Descarte de Recursos (<i>Free Disposal Hull</i>)
GMM	Métodos dos Momentos Generalizados (<i>Generalized method of moments</i>)
IAA's	Índices de Ajustes Absolutos
IAI's	Índices de Ajustes Incrementais
ILE	Índice de Liberdade Econômica (<i>Index of Economic Freedom-IEF</i>)
LER	Leilões de Energia Nova
LER	Leilões de Energia de Reserva
LFA	leilões de Fontes Alternativas
MCP	Mercado de Curto Prazo
MME	Ministério de Minas e Energia
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MQROB	Mínimos Quadrados Robustos
MSA	Medida de Adequação de Amostra de Kaiser
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONGs	Organizações Não Governamentais

ONS	Operador Nacional do Sistema Eléctrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH's	Pequenas Centrais Hidreléctricas
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PND	Plano Nacional de Desestatização
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Eléctrica
SEB	Setor Eléctrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SFA	Análise de Fronteira Estocástica (<i>Stochastic Frontier Analysis</i>)
UE	União Europeia
VAR	Vetor Autorregressivo
WWF	Fundo Mundial para a Natureza (<i>World Wide Fund For Nature</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	ARCABOUÇO INSTITUCIONAL E O CUSTO DOS INVESTIMENTOS EM FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO	21
2.1	INTRODUÇÃO.....	21
2.2	ENERGIAS RENOVÁVEIS NÃO CONVENCIONAIS EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO.....	23
2.3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	29
2.3.1	Conceito e importância do arcabouço institucional	30
2.4	REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA.....	32
2.5	METODOLOGIA.....	34
2.5.1	Descrição das variáveis	34
2.5.2	Variáveis de Governança Institucional e Ambiente de Negócios	35
2.5.3	Análise de Fatores	39
2.5.4	Variáveis de controle	41
2.5.5	Estatísticas de Influência	43
2.5.6	Mínimos Quadrados Robustos - MQROB	45
2.6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
2.7	CONCLUSÃO.....	48
3	EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: UMA ABORDAGEM PARAMÉTRICA DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA	51
3.1	INTRODUÇÃO.....	51
3.2	ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO DA EVOLUÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB).....	53
3.3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	60
3.3.1	Eficiência: Definição e Tipos	60
3.3.2	Técnicas de mensuração da Eficiência	64
3.4	REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA.....	67
3.5	METODOLOGIA.....	69
3.5.1	Descrição das variáveis	70
3.5.2	Metodologia econométrica	72
3.5.2.1	Análise de Fronteira Estocástica (<i>Stochastic Frontier Analysis - SFA</i>)	73
3.5.2.2	Modelo <i>TOBIT</i>	78

3.6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
3.6.1	Resultados Análise de Fronteira Estocástica	82
3.6.2	Resultados modelo <i>TOBIT</i>	85
3.7	CONCLUSÃO	87
4	OS IMPACTOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NÃO CONVENCIONAL SOBRE OS PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	90
4.1	INTRODUÇÃO	90
4.2	AMBIENTES DE CONTRATAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)	92
4.2.1	Mercado de Curto Prazo (MCP) e o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD)	95
4.3	REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA	100
4.4	METODOLOGIA	104
4.4.1	Descrição das variáveis	104
4.4.2	Metodologia econométrica	106
4.4.2.1	Variáveis Instrumentais e método MQ2E	107
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	111
4.6	CONCLUSÃO	116
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICES	134
	APÊNDICE A - Medida de Adequação de Amostra de Kaiser (MSA) e teste de esfericidade de Bartlett (<i>Bartlett test of sphericity</i> – BTS)	134
	APÊNDICE B - Análise de Fatores: Indicadores de Governança Institucional – 2002	134
	APÊNDICE C - Análise de Fatores: Indicadores de Governança Institucional – 2017.	135
	APÊNDICE D - Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Ordinários – MQO.	136
	APÊNDICE E - Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Robustos – MQROB.	138
	APÊNDICE F - Projetos de geração eólica que entraram em operação comercial até 2017 – Brasil	140
	APÊNDICE G - Índices e classificação de eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica.	141

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, iniciada na Europa no século XVIII, ficou caracterizada como um evento que mudou o mundo tecnológica e ambientalmente. Por um lado, o desenvolvimento tecnológico e o consequente aumento da produtividade proporcionaram uma melhora significativa na qualidade de vida material dos indivíduos. Por outro lado, a partir do início do século XX, já era possível notar os impactos negativos do uso massivo de recursos não renováveis sobre meio ambiente. A partir de então, o uso de fontes de energia abundantes, economicamente acessíveis e menos nocivas ao meio ambiente passou a ter um papel crucial na superação das contradições ecológicas do modelo econômico praticado.

Nesse contexto, as fontes de energia renováveis não convencionais¹ - eólica, solar, biomassa, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), biogás e geotérmica - passaram a emergir como importantes elementos do consumo de energia mundial. A tendência de estímulos ao uso dessas fontes tem sido impulsionada não só devido às preocupações ambientais relacionadas ao excesso de emissões de gases do efeito estufa, como também devido à necessidade de diversificação tecnológica que permita reduzir a dependência energética, à busca pela autossuficiência e à possibilidade de proporcionar acesso à energia para milhares de pessoas.

O crescimento e o desenvolvimento econômico sustentável são impulsionados pelo uso de fontes de energia renováveis. Os benefícios do uso dessas fontes são inúmeros, tais como: o aumento da produtividade dos recursos, o aumento do dinamismo e competitividade das economias devido ao uso eficiente da energia e a redução da carga sobre os recursos terrestres, aéreos e aquáticos, ampliando as oportunidades de ganhos de produtividade e melhorando a qualidade de vida das pessoas (OCDE, 2011).

Atualmente, diversos países têm adotado políticas que visam substituir fontes convencionais por fontes renováveis não convencionais. Os incentivos mais comuns são as tarifas especiais (*feed-in*)², quotas para fontes renováveis, créditos fiscais, redução de impostos e o uso de certificados de energia renovável (OCDE, 2015). Esses mecanismos têm se mostrado cruciais

¹ Não incluem as usinas hidrelétricas de grande porte, pois em que pese ser fonte renovável, a implantação desse tipo de usina tem impactos sociais e ambientais relevantes.

² Uma tarifa *feed-in* é um mecanismo de incentivo ao uso de fontes alternativas renováveis que se dá por meio da oferta de contratos de longo prazo aos produtores, normalmente com base no custo de geração de cada tecnologia (COUTURE; CAGNON, 2010).

na promoção da expansão do mercado. O considerável comprometimento com políticas e o horizonte promissor têm proporcionado crescimento acelerado da participação das fontes de energia renováveis não convencionais, principalmente em países em desenvolvimento.

Em um contexto de restrições orçamentárias por parte do setor público, mecanismos e políticas têm sido delineados visando estimular o investimento privado na geração de energia renovável. A atuação do setor privado nesses projetos em países em desenvolvimento, além de trazer ganhos em eficiência produtiva, também garante o fluxo de investimentos. Entre 1990 e 2017, mais de 30% do total investido em novas unidades de geração em países emergentes foram em novas plantas de energia renovável não convencional (BANCO MUNDIAL, 2018a).

Todavia, apesar da participação dessas fontes na matriz energética mundial ter aumentado substancialmente, devido aos inúmeros mecanismos de incentivo e ao aumento da participação do setor privado nos investimentos, ainda existem barreiras de mercado, econômicas, financeiras, técnicas e institucionais que contribuem para que os países não tenham um melhor desempenho. Apesar das dificuldades enfrentadas, acredita-se que melhores práticas de governança têm potencial de promover ganhos em termos de eficiência, qualidade e expansão na oferta de energia por impactar sobre os custos das fontes renováveis não convencionais.

O Brasil é destaque quando o assunto é energia limpa, está entre os maiores investidores mundiais em fontes renováveis. Além de contar com uma matriz elétrica predominantemente renovável, o modelo energético do país apresenta um forte potencial de expansão, o que resulta em uma série de oportunidades de investimentos de longo prazo. Atualmente, considerando apenas a geração de energia elétrica, o uso de fontes renováveis é superior a 80%.

A reforma do setor elétrico brasileiro, ocorrida em 2004, trouxe benefícios tanto para o lado da oferta como também da demanda de energia, com estímulos à eficiência econômica por meio de regras que visam contratações a médio e longo prazo. Diversos obstáculos que dificultavam os investimentos em fontes de energia limpa foram superados. A reforma tem buscado proporcionar equilíbrio entre a participação dos agentes públicos e privados, com o intuito de viabilizar a segurança do abastecimento e a expansão da oferta de eletricidade de maneira eficiente e sustentável.

Diante do contexto exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar os desafios para a consolidação e sustentabilidade das fontes de energia renováveis não convencionais. Para tanto, busca identificar a importância das instituições de governança como elemento de redução dos custos dos investimentos em fontes renováveis não convencionais. Ademais, avalia se as firmas geradoras de energias renováveis têm operado de maneira eficiente e se a inserção dessas fontes tem impactos sobre os preços finais da eletricidade. Com o intuito de aprofundar a análise de cada um dos objetivos específicos e facilitar a compreensão do leitor, o presente trabalho está dividido em três ensaios.

O primeiro ensaio tem por objetivo mostrar a importância de elementos de governança institucional e do ambiente de negócios para viabilizar o investimento privado no setor energético. A investigação do papel das instituições em setores de infraestrutura é de grande relevância, especialmente em economias menos desenvolvidas nas quais interferências políticas e/ou governamentais tendem a ocorrer com maior frequência. Desta forma, contribui para a literatura que se refere à relação entre instituições e qualidade ambiental, ampliando o foco de análise ao abordar aspectos econômicos desta relação.

Em geral, a literatura nessa linha de pesquisa busca identificar a importância das instituições para a introdução de novos investimentos em fontes renováveis. O presente capítulo inova ao analisar se as instituições impactam sobre o custo dos investimentos em fontes de energia renováveis. A qualidade das instituições de um país possui uma relação inversa com o custo dos investimentos nessas fontes.

Um ambiente política e economicamente estável, com respeito às normas legais, ausência de corrupção, proteção aos direitos de propriedade, credibilidade política e eficiência na provisão de serviços públicos estimula a participação do setor privado nos investimentos em infraestrutura. Além disso, uma maior autonomia econômica está associada de maneira significativa com sociedades mais saudáveis, com ambiente mais limpo, maior renda *per capita*, mais desenvolvimento humano, democracia e redução da pobreza. Todos esses fatores têm ligação direta com sustentabilidade e, portanto, com o uso de fontes de energia renováveis. Dessa forma, acredita-se que um arcabouço institucional robusto impacta nos custos dos investimentos ao reduzir o prêmio de risco estimado pelos investidores.

O trabalho faz uma análise ampla devido ao grande número de projetos considerados. Ademais, considera apenas países em desenvolvimento, ao contrário da maioria dos trabalhos encontrados na literatura que estão voltados para países desenvolvidos, em geral pertencentes à União Europeia.

O segundo ensaio, por sua vez, identifica os principais determinantes da eficiência das empresas geradoras de energia a partir de fontes renováveis. Para viabilizar o desenvolvimento de estratégias ou políticas econômicas apropriadas que visem atender as reais necessidades dos setores é preciso identificar os gargalos existentes no processo produtivo das firmas. Conforme destaca Lovell (1996), tanto as medidas de eficiência como as de produtividade devem ser classificadas como indicadores de resultados ou medidas de desempenho, por meio das quais as unidades produtivas devem ser avaliadas. O progresso tecnológico, o aumento na altura dos aerogeradores, o diâmetro das pás e dos rotores, juntamente com as especificidades dos ventos brasileiros são fatores relevantes que podem explicar o recente e crescente desenvolvimento da indústria eólica no país.

O trabalho mostra-se inédito, já que não foram encontrados outros trabalhos direcionados ao setor eólico brasileiro. Ao analisar um número de projetos relativamente grande, a análise torna-se mais completa e heterogênea. Ademais, o uso de dois estágios, por meio das técnicas Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis – SFA*) e do modelo *TOBIT*, é mais um diferencial do trabalho, visto que é possível não só identificar a empresa com as melhores práticas, como também identificar quais fatores são mais relevantes para elevar o desempenho das empresas.

É crucial que sejam desenvolvidos mecanismos que promovam iniciativas de energias ao menor custo, visto que a indústria brasileira, segundo Firjan (2017), possui uma das tarifas de energia elétrica mais caras do mundo. Tal fato causa impactos financeiros para o consumidor, além de afetar a produtividade e a competitividade das indústrias, refletindo no desenvolvimento e crescimento do país como um todo. Nesse sentido, o terceiro ensaio tem como objetivo analisar se introdução de fontes renováveis não convencionais na matriz energética brasileira reduz os preços da energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

A modicidade tarifária é uma questão frequentemente colocada no centro de um intenso debate econômico e social, sendo inclusive um dos compromissos assumidos com a reestruturação do

Setor Elétrico Brasileiro (SEB) ocorrida em 2004. Nesse sentido, este trabalho é importante para que as políticas de incentivo e os investimentos sejam avaliadas a fim de que o enorme potencial renovável do país seja aproveitado da melhor forma possível e preços módicos sejam atingidos.

Cabe destacar que não foi encontrado na literatura nenhum trabalho direcionado ao Brasil que analise o efeito da inserção de fontes de energia renováveis sobre os preços no ACL. A maioria dos trabalhos foi realizada para países desenvolvidos da Europa e analisam apenas uma fonte renovável, em geral a eólica. O presente trabalho faz uso de séries de tempo em uma abordagem de variáveis instrumentais.

Cada um dos três ensaios desenvolvidos nesta tese reflete um desafio para a consolidação e sustentabilidade das fontes de energia renováveis não convencionais em países em desenvolvimento, especialmente no Brasil. A última seção traz as considerações finais sobre os desafios identificados e chama atenção para o papel econômico, social e ambiental desempenhado pelo aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial.

2 ARCABOUÇO INSTITUCIONAL E O CUSTO DOS INVESTIMENTOS EM FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis não convencionais - eólica, solar, biomassa, Pequenas Centrais Hidrelétricas-PCH's, biogás e geotérmica - têm emergido como um importante elemento do consumo de energia mundial nos últimos anos. Todavia, a transição para um sistema sustentável ainda enfrenta desafios, visto que tais projetos demandam elevado volume de recursos e, além disso, os custos irreversíveis e o longo prazo de maturação dos mesmos atuam como entraves na alavancagem do setor.

As dificuldades enfrentadas, principalmente em países em desenvolvimento, devido à falta de disponibilidade orçamentária, conduzem para a redução do volume de investimentos nos setores de infraestrutura em geral, o que prejudica o potencial de crescimento e desenvolvimento econômico dos países (PERCOCO, 2014).

Diante desse contexto, os governos têm procurado delinear mecanismos e políticas visando estimular o investimento privado na geração de energia renovável. Segundo dados do Banco Mundial (2018a), esses incentivos têm apresentado bons e promissores resultados. Não obstante o volume desses investimentos ter aumentado de maneira significativa nas últimas décadas, ainda existem outros fatores que limitam tais investimentos, sendo importante identificá-los.

Uma crescente literatura tem enfatizado que elementos de governança institucional são essenciais para viabilizar o investimento em setores de infraestrutura. Conforme destaca Jacqmin (2015), o mau funcionamento das instituições induz a custos adicionais implícitos devido à lentidão dos procedimentos ocasionados por ineficiências administrativas e/ou regulamentos complexos. As relações com instituições privadas ficam comprometidas, gerando dificuldades para o acesso ao mercado de empréstimos. Para os investimentos em fontes de energia renováveis, particularmente, isso tem um efeito negativo relevante, pois os custos por unidade de capacidade normalmente são superiores aos custos de fontes convencionais. Ainda segundo Jacqmin (2015) direitos de propriedades mal definidos e a corrupção aumentam as incertezas de retornos, tanto no curto como no longo prazo.

Boa parte da literatura tem analisado a relação entre instituições e qualidade ambiental, como por exemplo: Fredriksson e Svensson (2003) que analisam se a instabilidade política e a corrupção têm efeitos sobre a implementação de políticas ambientais e Culas (2007), Di Vita (2009) e Castiglione e outros (2013) que analisam o impacto das instituições de proteção à propriedade e da origem legal sobre a qualidade ambiental.

Outra parte da literatura tem se dedicado a analisar a relação entre instituições e fontes renováveis de energia, como é o caso de Radulovic (2003) e Bernard e outros (2011) que analisam o papel das instituições na promoção do uso das fontes solar e eólica, respectivamente; Cadoret e Padovano (2015) e Jacqmin (2015) que analisam se indicadores de liberdade econômica têm efeitos sobre a implantação de energias renováveis e Mehrara e outros (2015) que analisam se as instituições estão entre os fatores determinantes do consumo de energias renováveis.

O presente ensaio se diferencia da literatura existente ao analisar a questão dos custos dos investimentos, ou seja, leva em consideração os aspectos econômicos da relação entre arcabouço institucional e fontes de energia renováveis. Ademais, ao analisar apenas países em desenvolvimento destaca-se, visto que a maior parte da literatura direciona seus estudos a países desenvolvidos, em geral pertencentes à União Européia. Acredita-se que existe uma relação inversa entre a qualidade institucional e os custos dos investimentos em fontes de energia renováveis.

De acordo com Tiryaki (2008), um ambiente política e economicamente estável, com respeito às normas legais, ausência de corrupção, proteção aos direitos de propriedade, credibilidade política e eficiência na provisão de serviços públicos tem condições de estimular a participação do setor privado nos investimentos em infraestrutura. Além disso, um ambiente de negócios mais livre está associado a sociedades mais saudáveis, com ambiente mais limpo, maior renda per capita, desenvolvimento humano, democracia e redução da pobreza (MILLER; KIM; ROBERTS, 2018). Todos esses fatores têm ligação direta com sustentabilidade e, portanto, com o uso de fontes de energia renováveis. Dessa forma, acredita-se que um arcabouço institucional robusto tem condições de impactar nos custos dos investimentos, visto que reduz o prêmio de risco estimado pelos investidores.

O presente ensaio tem a vantagem de trabalhar com uma amostra ampla de mais de 1600 projetos de fontes de energia renováveis não convencionais em diversos países, em uma abordagem com dados *cross - section* para o período entre 2002 e 2017. Em geral, a literatura tem analisado um número de países bem inferior e muitas vezes considera apenas uma fonte de energia na análise.

Além dessa introdução, este capítulo contará com mais seis subseções. Na segunda subseção o perfil dos investimentos privados em energias renováveis não convencionais em países em desenvolvimento é discutido. A terceira subseção apresenta o referencial teórico, discutindo o conceito e a importância das instituições segundo a visão de distintos autores. A quarta subseção apresenta uma revisão da literatura que analisa a relação das instituições com a qualidade ambiental e com investimentos em fontes de energia. A quinta subseção, por sua vez, descreve as variáveis utilizadas e a metodologia econométrica empregada. A sexta subseção apresenta os resultados obtidos e por fim, a sétima subseção apresenta as conclusões do capítulo.

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS NÃO CONVENCIONAIS EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

Os países estruturam suas matrizes energéticas levando em consideração, particularmente, aspectos como a disponibilidade de recursos naturais e a viabilidade de exploração dos mesmos. Nos últimos anos o planejamento energético de muitos países também vem dando atenção especial a questões ambientais. Cada vez mais a necessidade de investir em fontes de energias renováveis é reconhecida e tem-se buscado desenvolver ações a fim de atrair a participação privada no setor.

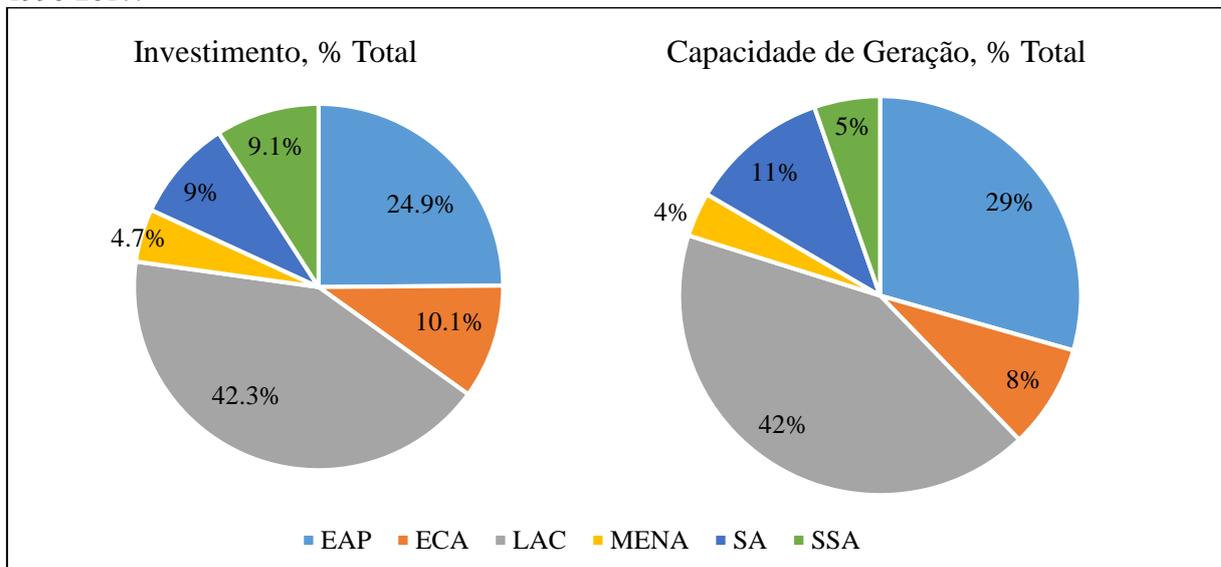
A atuação da iniciativa privada em projetos de geração de energia a partir de fontes renováveis em economias em desenvolvimento é ainda mais relevante. Além de trazer ganhos em eficiência produtiva, também garante o fluxo de investimentos em um contexto de restrições orçamentárias por parte do setor público. Entre 1990 e 2017, cerca de 30% do total investido em novas unidades de geração em países em desenvolvimento foram em plantas de energias renováveis não convencionais (BANCO MUNDIAL, 2018a)³.

³ Todos os dados utilizados nesta seção e na análise econométrica foram obtidos no PPI Database (Banco Mundial, 2018a). Os valores referem-se a novos projetos de geração de energia que envolvem participação de investidores

Embora a geração de energia a partir de combustíveis fósseis ainda seja predominante - geração à base de carvão, diesel e gás natural respondem por quase dois terços do total investido entre 1990 e 2017 - a participação das fontes renováveis não convencionais tem crescido de forma acelerada. O aumento no fluxo de investimentos direcionados a projetos de energia renováveis não convencionais pode ser resultado do crescente interesse de investidores em mercados emergentes, do aumento da demanda por energia, da maior acessibilidade aos recursos renováveis e da redução de custo de algumas tecnologias.

De acordo com dados do Banco Mundial (2018a), a América Latina e Caribe vêm se destacando na implementação de projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, absorvendo cerca de 42,3% dos investimentos e respondendo por 42% da nova capacidade de geração instalada, seguido do Leste Asiático e Pacífico com 24,9% e 29,4%, respectivamente (ver Gráfico 1).

Gráfico 1 - Novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por Região: 1990-2017.



Fonte: Banco Mundial (2018a).

Nota: EAP - Leste Asiático e Pacífico; ECA - Europa Oriental e Ásia Central; LAC - América Latina e Caribe; MENA - Oriente Médio e Norte da África; SA - Sul Asiático; e SSA - África Subsaariana.

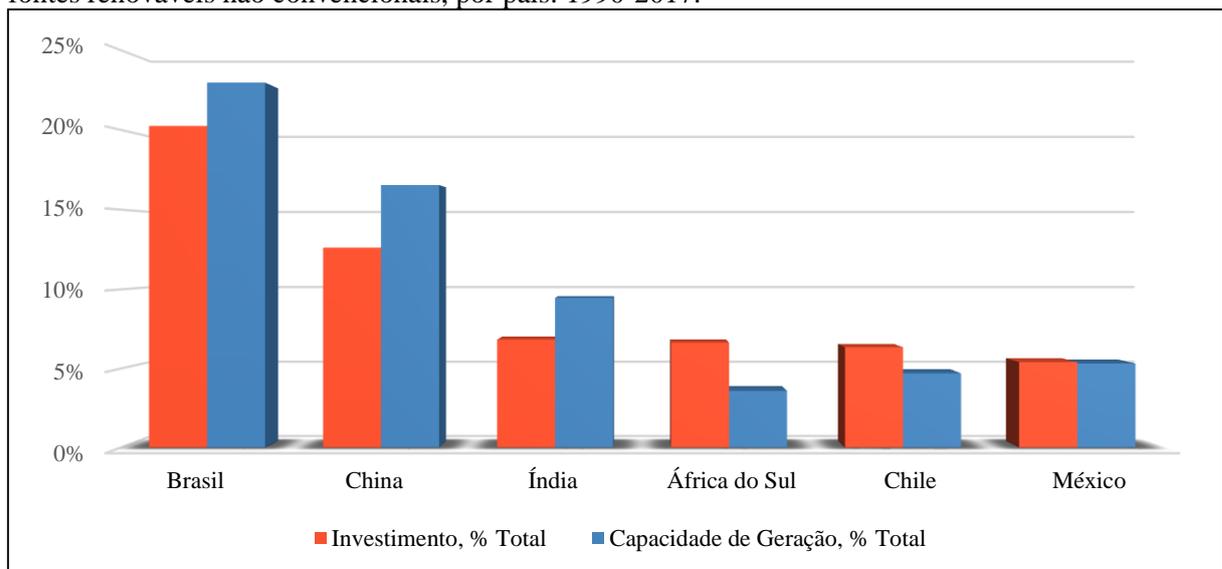
Os países na América Latina dispõem de muitos recursos naturais, o que facilita a exploração de atividades de geração a partir de fontes renováveis. Os elevados preços da eletricidade em boa parte da região, a crescente demanda por energia, os problemas relacionados à segurança

privados (projetos do tipo *greenfield*). Detalhes da metodologia adotada pelo Banco Mundial estão disponíveis em <http://ppi.worldbank.org>.

energética e o potencial de exportação de alguns países têm proporcionado boas oportunidades de investimentos em tecnologias renováveis.

Considerando os seis países em desenvolvimento com maior volume de investimentos e capacidade de geração instalada a partir de fontes renováveis não convencionais (ver Gráfico 2) percebe-se que três deles pertencem a América Latina - Brasil, Chile e México - com destaque para o Brasil que além responder por cerca de metade dos investimentos e da capacidade instalada na região a qual pertence é também o primeiro colocado no ranking geral dos países, respondendo por cerca de 20% e 23%, respectivamente. Outro país que se destaca é a China. No ranking geral apresenta-se na segunda colocação, respondendo por cerca de 13% dos investimentos e 17% da capacidade de geração instalada. Já na região a qual pertence, Leste Asiático e Pacífico, responde por aproximadamente 50% e 56%, respectivamente.

Gráfico 2 - Percentual de investimento e capacidade instalada de novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por país: 1990-2017.



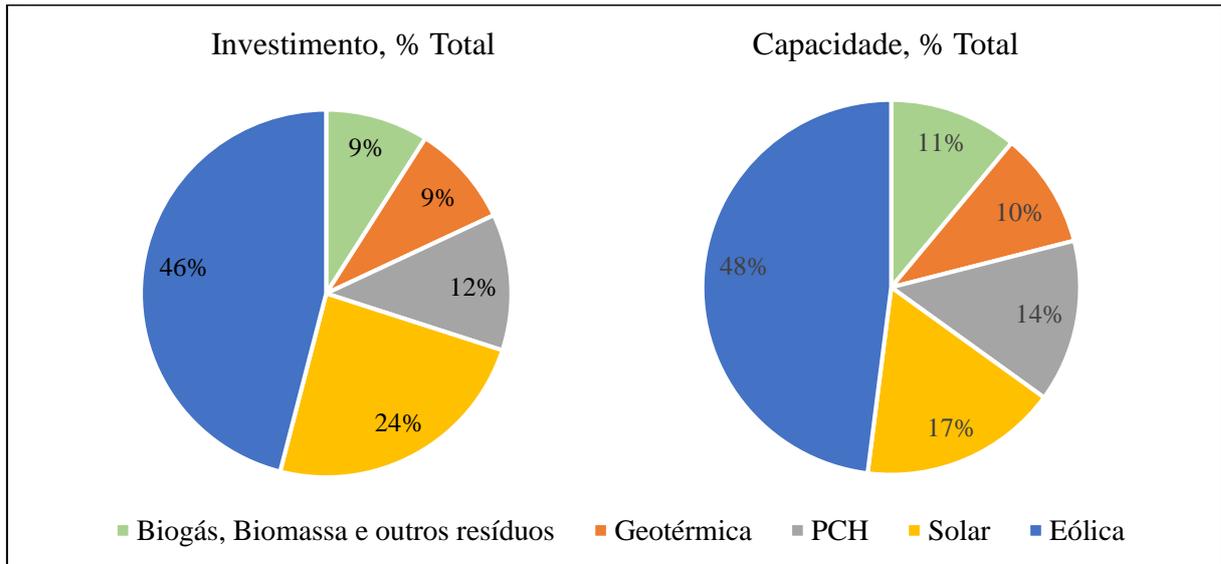
Fonte: Banco Mundial (2018a).

A participação privada em projetos de energia renovável não convencional está concentrada no segmento de energia eólica que absorveu quase metade dos investimentos e da nova capacidade instalada (ver Gráfico 3). A geração solar também teve participação expressiva, absorvendo cerca de 24% dos investimentos e representando cerca de 17% da nova capacidade de geração instalada.

Os investimentos e a capacidade instalada em fontes renováveis não convencionais dos países que mais investem nesse mercado – Brasil, China, Índia, África do Sul, Chile e México - estão concentrados nas fontes solar e eólica. No caso brasileiro é a fonte eólica que se destaca, com

mais de 80% dos investimentos e cerca de 70% da capacidade de geração instalada. A energia solar ainda é incipiente no país, apenas 6% dos investimentos e 3% da capacidade instalada. A título de comparação, enquanto no Brasil entre 1990 e 2017 existiam apenas 896 MW de capacidade energia solar instalados, na China haviam 5.965,76 MW.

Gráfico 3 - Novos projetos de geração a partir de fontes renováveis não convencionais, por fonte: 1990-2017.

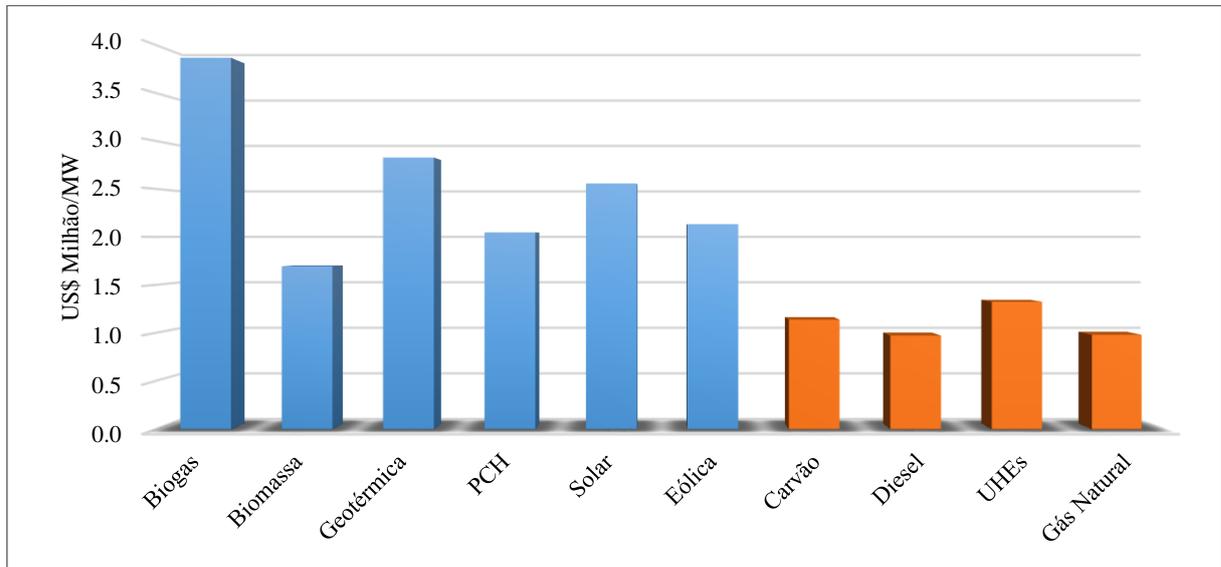


Fonte: Banco Mundial (2018a).

A energia renovável obtida a partir das fontes eólica e solar foi durante muito tempo vista como algo inacessível para países em desenvolvimento, em função dos altos custos e do estágio de desenvolvimento dessas tecnologias em relação às tecnologias convencionais disponíveis no mercado. Incentivos econômicos e regulatórios foram necessários para que as barreiras técnicas e econômicas fossem reduzidas. A adoção de políticas de apoio a essas fontes levou ao aumento de suas participações na matriz energética de diversos países. O uso da fonte eólica e solar abrange inúmeras vantagens com relação as energias convencionais e até mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis não convencionais. Apesar de possuírem um elevado custo inicial têm baixo custo operacional e reduzido impacto socioambiental.

A redução dos custos das fontes renováveis é fundamental para torná-las cada vez mais competitivas. Os dados do Banco Mundial (2018a) mostram que apesar dos crescentes incentivos, as fontes biogás, geotérmica e solar possuem os maiores valores de investimento por unidade de capacidade (ver Gráfico 4). Já a energia obtida a partir da biomassa, tem apresentado investimentos médios mais baixos dentre as fontes renováveis não convencionais, apesar de ainda possuir custo mais elevado que as fontes convencionais.

Gráfico 4 - Investimento por unidade de capacidade de novos projetos de geração de energia, por tipo de fonte: 1990-2017.



Fonte: Banco Mundial (2018a).

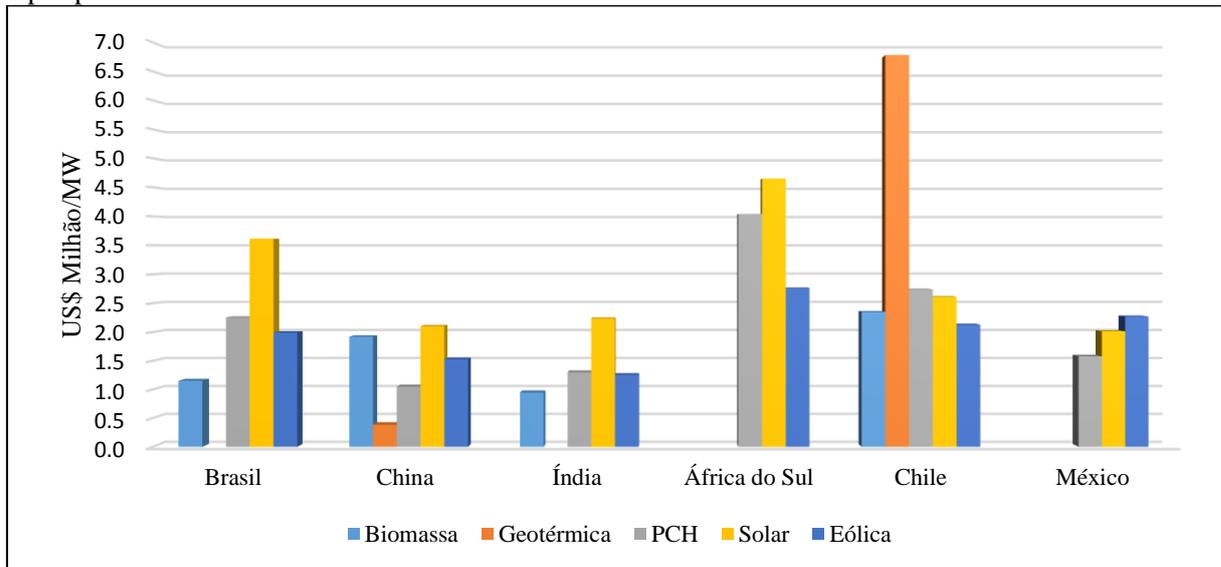
Nota: Valores ajustados pelo Índice de Preços ao Consumidor dos Estados Unidos, com ano base de 2017 (ST. LOUIS FED, 2017).

A fim de realizar uma análise mais específica, o Gráfico 5 apresenta valores de investimento por unidade de capacidade por fonte para os seis países líderes em investimento e potência instalada. É possível perceber que a fonte solar tem maior custo por MW com relação as demais fontes no Brasil, China, Índia e na África do Sul. Ademais, verifica-se que o Brasil é o segundo país, ficando atrás apenas da África do Sul, com custo por MW mais elevado.

Segundo dados da ANEEL (2018b) o primeiro leilão que contemplou a fonte solar ocorreu apenas em 2014. A despeito do atraso brasileiro no uso da fonte solar com relação a outros países o setor tem se desenvolvido de maneira progressiva ao longo dos últimos anos, aumentando a eficiência e reduzindo seus custos, buscando tornar o segmento de energia solar cada vez mais competitivo.

Os demais países líderes, apesar de possuírem custos significativos com relação à fonte solar, têm direcionado cada vez mais esforços para alavancar o setor. No caso da China, por exemplo, a ascensão da energia solar se deve, em boa parte, ao apoio governamental, motivado pela crescente preocupação com a poluição do ar e com a degradação do meio ambiente. O país tem buscado cada vez mais diminuir sua dependência em relação ao carvão.

Gráfico 5 – Custo por unidade de capacidade de novos projetos de geração de energia, por tipo de fonte e por país: 1990-2017.



Fonte: Banco Mundial (2018a).

Outro país que vale a pena destacar é o Chile. Na busca pela autossuficiência e aproveitando o enorme potencial solar e eólico existente do deserto do Atacama o país tem instituído políticas dedicadas ao setor que têm atraído cada vez mais investimentos. Além disso, em 2017 o país inaugurou a primeira usina geotérmica da América do Sul, não obstante ter iniciado processo de exploração e perfuração para fins de geotermia há décadas.

Conforme pode ser visto no Gráfico 5, a fonte geotérmica no Chile apresenta um elevado custo por MW, que pode estar atrelado ao fato de ser a primeira usina do mundo construída a 4.500 metros de altitude, incorporando avançada tecnologia geotérmica para torná-la apropriada às condições extremas de uma área que possui oscilações de temperatura relevantes e altitude muito elevada.

A geração de energia com biomassa vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética brasileira, entre 1990 e 2017 a capacidade instalada no país era de 6.033,80 MW. É a fonte com menor custo por MW no país. Dentre os distintos insumos disponíveis para a geração de biomassa, o mais utilizado no Brasil é o bagaço da cana-de-açúcar, representando cerca de 80% da fonte biomassa (UNICA,2018).

Na Índia, a biomassa também é a fonte com menor custo por MW. Todavia, a capacidade instalada no mesmo período era de apenas 309,5 MW (BANCO MUNDIAL, 2018a).

Considerado um dos maiores consumidores de energia do mundo, a Índia sofre com problemas na distribuição de energia para parte da população. O país tem urgência em tornar sua matriz energética mais sustentável a fim de gerar empregos, melhorar a qualidade de vida das pessoas, limpar a água e o ar e combater as alterações climáticas. Diante desse contexto e considerando que o potencial de geração solar e eólica são elevados, o país tem apostado em projetos sustentáveis para geração de energia nos últimos anos.

Percebe-se que os principais motivos para investir em fontes renováveis não são exatamente os mesmos em cada país. Alguns necessitam tornar suas matrizes energéticas mais limpas com grande urgência devido aos elevados índices de poluição, como é o caso da China, outros lutam para reduzir a dependência em determinada fonte, como é o caso do Chile, que é bastante dependente de combustíveis fósseis, e do Brasil que depende principalmente das hidrelétricas. Outros, como é o caso da Índia, buscam garantir a segurança na geração de energia. Não obstante apresentarem objetivos de certa forma distintos, todos têm em comum a necessidade de tornar suas economias mais sustentáveis e, portanto, tem despendido muitos esforços no intuito de introduzir as fontes alternativas nas suas matrizes energéticas.

2.3 REFERENCIAL TEÓRICO

O papel das instituições para a economia e a sociedade é discutido frequentemente. A economia institucional pressupõe que as instituições ou a ausência delas têm forte capacidade de influenciar o comportamento dos indivíduos e, conseqüentemente, têm grande relevância sobre o crescimento e desenvolvimento das nações. Existe um consenso na literatura a respeito do que as instituições representam e quais são suas principais atribuições e implicações. Entretanto, não há uma definição exclusiva e universal do que são as instituições. De forma geral, esta subseção busca mostrar o papel crucial das instituições para o desenvolvimento sustentável. Ademais, apresenta alguns dos principais trabalhos que relacionam as instituições com questões ambientais e energéticas, destacando o caráter inovador do presente trabalho em analisar o efeito dessas sobre os custos dos investimentos em fontes de energias renováveis não convencionais em países em desenvolvimento.

2.3.1 Conceito e importância do arcabouço institucional

O desempenho e a forma com que um sistema econômico é operado são limitados por um conjunto de normas e instituições que o regulam. De um lado, é possível notar a existência de uma vertente, na qual os autores Coase e Williamson se destacam, em que se investiga a forma com que as normas e as estruturas de governança afetam as transações entre indivíduos.

Aspectos relevantes para o entendimento da teoria e de fenômenos e comportamentos econômicos, tais como os custos de transação e sua relação mútua com as concepções de contratos e incertezas são incluídos nessa abordagem. Tais aspectos possuem uma relação direta com a decisão de investir em setores de infraestrutura, como é o caso do setor de energia, onde o risco de possíveis medidas ou alterações legais e o longo prazo de maturação dos projetos são determinantes (GONÇALVES JR. *et al.*, 2009).

Para Coase (1937, 1998) instituições são as firmas, o mercado e o Estado. Sendo assim, é função de uma instituição reduzir os custos transacionais existentes. Custos esses caracterizados como os dispêndios necessários para dar prosseguimento a uma determinada transação por meio de uma troca no mercado. Semelhante à Coase, Williamson (1985) interpreta instituições como firmas, mercados e relações contratuais. O autor considera que os indivíduos são oportunistas e possuem limitações cognitivas, tornando as instituições necessárias para realizar o controle desse comportamento e apoiar suas escolhas.

Por outro lado, há uma abordagem na qual o protagonista é Douglas North. Nessa visão analisa-se a maneira com que as instituições impactam na eficiência econômica, reduzindo as assimetrias de informações entre os indivíduos, diminuindo, dessa forma, a incerteza e assegurando os direitos de propriedades (GONÇALVES JR. *et al.*, 2009).

Para North (1991), o Estado é considerado uma organização e as instituições são um conjunto de regras. As instituições são restrições desenvolvidas pelos indivíduos como arcabouço para as interações políticas, econômicas e sociais. São regras de comportamento informais - penalidades, restrições, práticas, valores, códigos de conduta, hábitos, etc. - e formais - constituições, leis, direitos de propriedade, etc. Os indivíduos criam essas regras a fim de restringir as próprias ações permitindo a interação social. Eles cumprem as regras visto que existem sanções quando as mesmas não são respeitadas. Dessa forma, o agente econômico é

visto como um sujeito oportunista, que tem seu agir controlado por sanções, impostas na maioria das vezes pelo Estado.

Contudo, North (1991) evidencia que o indivíduo também pode agir de maneira não oportunista, ou seja, pode deixar de tirar proveito em uma ocasião onde sua punição seria improvável. Esse comportamento de respeitar as regras mesmo na ausência de punições é explicado, segundo o autor, pela ideologia. A ideologia é a visão de mundo dos indivíduos, ou seja, são modelos mentais desenvolvidos em torno da realidade na qual se vive (NORTH, 1991).

O autor adota em sua abordagem o conceito de racionalidade limitada, entendendo as instituições como complementos cognitivos para aqueles indivíduos incapazes de processar todas as informações necessárias à escolha ótima. Dessa forma, tanto as regras determinadas pelo sistema social, como as regras internalizadas atuam como suporte para a tomada de decisões dos indivíduos, dando a esses a noção do que deve ou não ser feito, do que é certo e o que é errado, possibilitando aos indivíduos com racionalidade limitada escolher, decidir e agir no mundo social.

Definir o que é uma instituição não é uma tarefa simples, visto que há variações de acordo com distintas abordagens. Entretanto, de maneira geral, as instituições podem ser consideradas como um comportamento coletivo padronizado, capaz de constituir o universo cultural de uma sociedade (CARVALHO; VIEGAS; CARVALHO, 2016). Dentro dessa noção de instituição, é possível considerar tanto as organizações desenvolvidas pelos governos - agências administrativas - ou pelo setor privado para determinados fins - famílias, bancos, escolas, penitenciárias, etc.-, como o conjunto de usos e costumes, leis e códigos de conduta, religião, formas de pensamento e ação, hábitos, convenções, etc.

Diante do exposto, é possível verificar que as instituições são constituídas a fim de diminuir as incertezas existentes nas interações humanas. Além disso, possuem capacidade de delimitar as escolhas feitas pelos indivíduos e contam com estratégias de governança e de tomada de decisões. Uma regulação mal elaborada e/ou custos associados à assimetria de informação e incerteza inibem investimentos e elevam custos de transação. Sendo assim, é possível dizer que existe uma relação inversa entre o arcabouço institucional e os investimentos em setores de infraestrutura e que a evolução do sistema institucional contribui de maneira positiva para o desenvolvimento de uma nação.

2.4 REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA

Nos últimos anos vários trabalhos têm procurado identificar a relação entre a qualidade institucional e as decisões de implementação da política energética e ambiental. Tem crescido o consenso de que a governança institucional tem impactos relevantes sobre questões energéticas e ambientais. Bons indicadores de governança têm potencial para reduzir a pobreza e estimular o desenvolvimento sustentável. Economias com instituições de qualidade conseguem regular e reforçar as políticas que respeitam as questões ambientais.

Fredriksson e Svensson (2003), por exemplo, estabeleceram a relação teórica e empírica dos efeitos da instabilidade política e da corrupção sobre a implementação de políticas ambientais em distintos países. Os autores concluíram que a corrupção reduz o rigor das normas ambientais, ou seja, a eficiência da execução de tais políticas. Essa conclusão também foi compartilhada por Cole (2007).

Culas (2007) e Di Vita (2009) salientaram a importância das instituições de proteção à propriedade e a origem legal para a qualidade ambiental de um país. Similarmente, Castiglione e outros (2013) mostraram que países com maior proteção aos direitos de propriedade emitem menos poluentes, enquanto que Gallego e outros (2014) apresentaram evidências empíricas da relação entre fatores institucionais, representados pelo estilo da administração pública no controle da corrupção e o desempenho ambiental. A conclusão desses estudos mostra que qualidade das instituições é capaz de influenciar a participação da sociedade no processo de preservação e recuperação ambiental.

Os trabalhos destacados até então buscam identificar a relação entre instituições e meio ambiente. O presente capítulo se diferencia desses, pois busca estabelecer uma relação direta entre aspectos institucionais e o uso de fontes renováveis de energia, não ignorando, evidentemente, as questões ambientais, porém tendo como foco principal aspectos econômicos desta relação.

Questões econômicas têm impacto expressivo sobre distintos aspectos da vida dos indivíduos, bem como sobre o meio ambiente. Sendo assim, um ambiente institucional favorável, principalmente em países em desenvolvimento onde as restrições orçamentárias são mais evidentes, pode ser impulsionador de investimentos que garantam o bem-estar social,

assegurando o crescimento e desenvolvimento econômico necessário para atender a demanda atual e as necessidades das gerações futuras.

Assim como o presente ensaio, alguns trabalhos buscaram identificar a relação entre instituições e fontes de energia renováveis. Radulovic (2003), por exemplo, examinou o papel do Estado na promoção do uso de energia solar fotovoltaica na Índia, enquanto que Bernard e outros (2011) analisaram o papel das instituições na implementação de energia eólica nos Estados Unidos, Alemanha e Espanha. Esses autores concluíram que a questão institucional tem um papel relevante, contribuindo positivamente para uma maior participação das fontes renováveis na matriz energética.

Cadoret e Padovano (2015), por sua vez, analisaram o papel desempenhado por fatores políticos na implantação de energias renováveis na União Europeia. Os resultados apontam que o *lobby* na indústria agrícola tem um efeito negativo sobre a implantação de fontes renováveis, enquanto a qualidade do governo tem um efeito positivo. Com trabalho semelhante, Jackmin (2015) buscou identificar a ligação entre instituições e a geração de energia a partir de fontes renováveis na União Europeia. Os resultados mostram que existe uma correlação positiva e significativa entre o arcabouço institucional e a geração de energia. Essa relação positiva é impulsionada, principalmente, pela estabilidade do sistema monetário que proporciona menores oscilações nos preços e processos de administração mais eficazes.

Por fim, Mehrara e outros (2015) procuraram identificar os principais determinantes do consumo de energias renováveis entre dez países que fazem parte da Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Os resultados obtidos indicam que a melhoria da qualidade das instituições e do capital humano têm papel relevante no crescimento das fontes de energia renováveis e na redução das externalidades ocasionadas pelo consumo de energias fósseis.

Como é possível notar, a literatura que busca identificar a relação entre instituições e o uso de fontes renováveis é relativamente recente. A maioria dos trabalhos encontrados faz análise para países desenvolvidos pertencentes à União Europeia e busca identificar os fatores que impulsionam o uso das fontes renováveis. Diferente da maioria dos trabalhos vistos na literatura, o presente ensaio analisa países em desenvolvimento e busca identificar o impacto institucional nos custos dos investimentos em fontes de energia limpas.

Averiguar o papel das instituições em setores de infraestrutura é de grande relevância, especialmente em economias menos desenvolvidas, onde as interferências políticas e/ou governamentais tendem a ocorrer com maior frequência. A questão dos custos também se mostra crucial, visto que a atração de investimentos no setor energético traz inúmeros benefícios sociais, econômicos e ambientais para a sociedade.

2.5 METODOLOGIA

A análise econométrica utilizada no presente trabalho envolve o uso de dados em *cross-section* para 68 países em desenvolvimento⁴. Foram levantadas informações de investimento por unidade de capacidade de 1632 projetos de geração de energia renovável não convencional. As estimações são para o período entre 2002 e 2017. Vale destacar que se optou por excluir os projetos de grandes hidrelétricas visto que esses, não obstante serem baseados em uma fonte renovável causam impactos sociais e ambientais significativos, pois grandes áreas são desmatadas e os alagamentos atingem habitantes das localidades onde a usina é implantada, fazendo com que os mesmos tenham que deixar suas residências.

A equação estimada foi a seguinte:

$$CUSTOMW = \beta_0 + \beta_1 GOVERN + \beta_2 ILE + \beta_3 X + \gamma D_T + \delta D_P + \varepsilon$$

Onde X é a matriz de variáveis de controle **PIBPC**, **INDUSTRIA**, **VOLCAMBIO** e **INFLACAO**, DT é matriz de variáveis *dummies* representando as tecnologias (PCH, biomassa, eólica, solar, biogás e geotérmica), DP é a matriz de variáveis *dummies* representando os países⁵. As subseções que se seguem apresentam as variáveis utilizadas e a metodologia econométrica adotada.

2.5.1 Descrição das variáveis

⁴ África do Sul, Afeganistão, Albânia, Angola, Argélia, Argentina, Bangladesh, Belize, Brasil, Bulgária, Burkina Faso, Camboja, Cabo Verde, Chile, China, Colômbia, Costa Rica, Equador, Egito, El Salvador, Etiópia, Filipinas, Gabão, Geórgia, Guatemala, Honduras, Índia, Indonésia, Irã, Jamaica, Jordânia, Laos, Libéria, Lituânia, Madagascar, Malásia, Maurícia, México, Moçambique, Mongólia, Marrocos, Montenegro, Namíbia, Nepal, Nicarágua, Nigéria, Paquistão, Panamá, Peru, Quênia, República Dominicana, Romênia, Ruanda, Rússia, Santa Lúcia, Senegal, Sérvia, Serra Leoa, Sri Lanka, Tailândia, Tonga, Turquia, Uganda, Ucrânia, Uruguai, Vanuatu e Vietnam, Zâmbia.

⁵ Para evitar singularidade, exclui-se a variável *dummy* representando projetos com fonte Biogás de D_T e as *dummies* representando Afeganistão, Angola e Serra Leoa de D_P.

Os dados sobre volume de investimento anual e capacidade instalada de geração de energia foram obtidos a partir do banco de dados *PPI Database* (BANCO MUNDIAL, 2018a). Esses valores representam investimentos em projetos de energia renovável com a participação do setor privado. Expressos originalmente em dólares americanos e em termos nominais foram convertidos para valores reais utilizando o Índice de Preços ao Consumidor dos Estados Unidos, com ano base de 2017 (ST. LOUIS FED, 2017).

Utilizou-se como *variável dependente* o logaritmo natural da razão do investimento pela capacidade de cada planta (**CUSTOMW**) (US\$ milhões/MW). A escolha dos países incluídos na amostra foi feita com base na existência de projetos em fontes não convencionais de energia renovável durante o período abordado, 2002 a 2017. Além disso, o período foi determinado levando em consideração a disponibilidade das informações.

2.5.2 Variáveis de Governança Institucional e Ambiente de Negócios

Existe um consenso de que a existência de um arcabouço institucional robusto é crucial para o bom funcionamento do mercado, para o aumento da produção nacional e, conseqüentemente, para o progresso econômico e social de um país. Regras claras, respeito às leis e ao direito de propriedade, controle da corrupção, estabilidade política e regulatória contribuem para reduzir o custo de investimento em projetos de infraestrutura, ao diminuir o prêmio de risco estimado pelos investidores.

Além disso, um ambiente com instituições consolidadas normalmente reflete a preocupação da sociedade com questões ambientais, tornando o ambiente de negócios propício ao investimento em projetos de geração a partir de fontes renováveis. Sendo assim, vários indicadores foram utilizados para apontar a qualidade institucional e o ambiente de negócios dos países abordados na análise. Vale destacar que diversas fontes dispõem de dados referente a qualidade institucional, todavia optou-se por utilizar os Indicadores de Governança Mundiais (*Worldwide Governance Indicators – WGI*), da base de dados do Banco Mundial (BANCO MUNDIAL, 2018b), e o Índice de Liberdade Econômica (ILE) (*Index of Economic Freedom – IEF*), desenvolvido pela Heritage Foundation (MILLER; KIM; ROBERTS, 2018), devido a amplitude da amostra e a qualidade metodológica das abordagens.

Os indicadores de governança do Banco Mundial são estimados a partir de informações sobre o ponto de vista de um grande número de empresas, cidadãos e da pesquisa de especialistas entrevistados tanto em países desenvolvidos, como em países em desenvolvimento. Eles são baseados em mais de 30 fontes de dados individuais produzidos por uma variedade de institutos de pesquisa, grupos de reflexão, organizações não governamentais, organizações internacionais e empresas do setor privado.

O uso de dados subjetivos, que se baseiam na percepção dos agentes econômicos é fundamentado por alguns autores como, por exemplo, Kaufmann e outros (2011) pelos seguintes fatores:

- A intuição dos indivíduos tem grande importância, visto que esses conduzem suas ações de acordo com que as instituições de determinado país operam, com base em suas percepções, expectativas e visões;
- Alguns aspectos de governança não apresentam evidências concretas e isso faz com que informações alternativas e passíveis de serem utilizadas para quantificar esses aspectos sejam reduzidas;
- Mesmo quando existem dados objetivos ou baseados em fatos, geralmente essas medidas para estimar o nível de governança são desenvolvidas com base em determinadas regulamentações. Contudo, o que é estabelecido em lei pode diferir substancialmente da realidade.

As fontes de dados sobre os indicadores de governança são redimensionadas e combinadas a fim de criar os indicadores agregados que utilizam a metodologia conhecida como modelo de componentes não-observáveis. Os indicadores variam entre -2,5 a 2,5, com valores maiores indicando governança institucional mais robusta. A versão do banco de dados utilizada conta com dados para 214 países ao longo do período 1996-2017, para seis dimensões de governança, quais sejam:

- Controle de Corrupção (**CORRUP**): Medem a percepção de até que ponto o poder público é exercido para ganhos privados.
- Eficiência do Governo (**EFICIGOV**): Mensura a percepção da qualidade na provisão de serviços públicos, a qualidade da formulação e implementação das políticas e a credibilidade do compromisso do governo de tais políticas.

- Estabilidade Política (**ESTPOL**): Combina vários indicadores que mensuram a percepção existente entre agentes econômicos da probabilidade de que um governo seja desestabilizado ou destituído eventualmente, de forma inconstitucional ou violenta.
- Qualidade da Regulação (**QUALREG**): Capta a percepção dos agentes econômicos sobre a capacidade do governo em formular e implementar políticas robustas e regulamentos que viabilizem o desenvolvimento do setor privado.
- Voz e Responsabilidade (**VOZRESP**): Reflete a percepção da medida em que os agentes econômicos são capazes de participar na seleção de seu governo, bem como a liberdade de expressão, liberdade de associação e liberdade da mídia.
- Respeito à Legislação (**DEFPROP**): Mensura a percepção com que os indivíduos confiam e respeitam as regras da sociedade, em particular no que se refere à qualidade da manutenção de contratos, à proteção aos direitos de propriedade, à efetividade da polícia e do sistema judiciário e ao controle do crime e violência.

O Índice de Liberdade Econômica (**ILE**) do Heritage Foundation representa aspectos mais específicos do ambiente de negócios. Ele mensura o grau de liberdade econômica de 186 países, varia entre 0 e 100, com maiores valores indicando maior liberdade econômica (MILLER; KIM; ROBERTS, 2018). A liberdade econômica é medida com base em 12 critérios quantitativos e qualitativos que são agrupados em quatro grandes grupos de liberdade econômica, quais sejam:

- **Grupo 1- Estado de Direito:**
 - **Direitos de Propriedade:** Mede o grau em que as leis de um país protegem os direitos de propriedade privados e o grau em que o governo garante que essas leis sejam de fato cumpridas. Também avalia a probabilidade de o Estado expropriar uma propriedade privada.
 - **Integridade do Governo:** Mensura a existência de corrupção sistêmicas nas instituições governamentais e a tomada de decisões guiada por práticas de suborno, extorsão, nepotismo, favoritismo, estelionato, clientelismo e corrupção.
 - **Eficácia Judicial:** Mostra o quão eficiente e justo são os sistemas judiciais para garantir que as leis sejam plenamente respeitadas.
- **Grupo 2 – Tamanho do Governo:**
 - **Gastos do governo:** Considera o nível das despesas do governo como percentual do PIB.
 - **Carga tributária:** Reflete as alíquotas sobre a renda pessoal e o nível geral de tributação como percentual do PIB.

- **Saúde Fiscal:** Analisa a ampliação do déficit e o crescente endividamento causados por má gestão do orçamento do governo que causam piora na saúde fiscal de um país. Essa piora está associada à instabilidade macroeconômica e a incertezas.

- **Grupo 3- Eficiência Regulatória:**

- **Liberdade de negócios:** Indica a facilidade de iniciar, operar e encerrar uma empresa. É uma referência para o peso da regulamentação e à eficiência do governo com relação ao processo de regulamentação.

- **Liberdade de Trabalho:** É uma medida quantitativa de vários aspectos do quadro legal do mercado de trabalho de um país.

- **Liberdade Monetária:** Combina uma medida de estabilidade de preços com uma avaliação dos controles de preços. A estabilidade de preços sem intervenção microeconômica é o estado ideal para o livre mercado.

- **Grupo 4- Mercados Abertos**

- **Liberdade Comercial:** Indica o ônus causado por barreiras tarifárias e não tarifárias que afetam as importações e exportações de bens e serviços.

- **Liberdade de Investimento:** Indica o grau de restrições ao fluxo de capital de investimento.

- **Liberdade Financeira:** É uma medida da eficiência bancária, da independência do controle do governo e da interferência no setor financeiro. Em um ambiente bancário e de financiamento ideal o governo interfere minimamente, há independência de supervisão do Banco Central e a regulamentação das instituições financeiras se limita a execução das obrigações contratuais e prevenção de fraudes.

Após a descrição das variáveis utilizadas apresenta-se, na tabela 1, as correlações cruzadas entre os vários indicadores de governança institucional e o indicador de ambiente de negócios.

Tabela 1 - Correlações Cruzadas entre indicadores de governança institucional e ambiente de negócios.

	CORRUP	EFICIGOV	ESTPOL	QUALREG	DEFPROP	VOZRESP	ILE
CORRUP	1,000						
EFICIGOV	0,932	1,000					
ESTPOL	0,731	0,678	1,000				
QUALREG	0,869	0,932	0,624	1,000			
DEFPROP	0,952	0,954	0,737	0,922	1,000		
VOZRESP	0,768	0,763	0,616	0,790	0,804	1,000	
ILE	0,744	0,798	0,500	0,889	0,788	0,669	1,000

Fonte: Dados da Pesquisa.

Observa-se que as variáveis de governança apresentam correlações significativas, o que pode elevar a variância dos estimadores. Devido ao elevado número de variáveis utilizadas o estudo pode se tornar complexo. Ademais, é possível que algumas das variáveis estejam medindo aspectos distintos de uma mesma variável subjacente. Para resolver essas dificuldades e reduzir o elevado número de variáveis utilizou-se análise de fatores. A análise de fatores pressupõe a existência de fatores latentes que influenciam o comportamento das variáveis de governança em estudo.

Quanto ao **ILE**, optou-se por não incluí-lo na análise de fatores tendo em vista que apesar de ter uma correlação relevante o mesmo já é uma agregação de vários critérios. Ademais, ao incluí-lo na análise de fatores de forma desagregada e realizando os procedimentos indicados para esse tipo de abordagem, vários critérios são excluídos tornando o método inadequado.

2.5.3 Análise de Fatores

A análise de fatores pode ser dividida em: Análise Exploratória de Fatores (*Exploratory Analysis of Factors - EFA*) e Análise Confirmatória de Fatores (*Confirmatory Factor Analysis - CFA*). A primeira é usada para identificar correlações complexas entre itens ou grupo de itens, que são parte de conceitos unificados. A princípio não são feitos pressupostos quanto às relações entre os fatores. Já a segunda testa a hipótese de que os itens são associados a fatores específicos. Para mostrar quanto das variações nas variáveis observadas são resultantes das variáveis latentes e mostrar a correlação entre variáveis latentes, a CFA usa modelagem de equações estruturais (SHALIZI, 2009).

Na EFA, utilizada neste trabalho, cada variável tem “ p ” características, sendo que X_{ij} é o valor da característica j da variável i . Existem “ k ” variáveis fatoriais e cada observação é uma combinação linear de escores de fatores (F_{ir}) mais o ruído:

$$X_{ij} = \epsilon_{ij} + \sum_{r=1}^k F_{ir} w_{rj} \quad 1$$

Os pesos w_{rj} são as cargas dos fatores (*factor loadings*) das características observáveis e indicam o quanto a característica j se modifica, na média, em resposta a uma unidade de variação no escore de fator r). Cada característica pode ser relacionada com mais de um fator (dado j , w_{rj} pode ser não-zero para múltiplos r)

Para condução da análise fatorial primeiramente é preciso analisar se os dados são apropriados. Para tanto, é necessário verificar se a amostra e a matriz de correlação são adequadas. Não há um consenso na literatura quanto ao tamanho ideal da amostra ou da razão entre o número de observações e o número de variáveis. Valores distintos são sugeridos para a razão número de observações/ número de variáveis, tais como: 3:1, 6:1, 10:1, 15:1 ou 20:1 (WILLIAMS; ONSMAN; BROWN, 2010). Sendo assim, foram utilizadas mais de 190 observações e 6 variáveis para cada ano o que gera uma razão entre número de observações e número de variáveis bem elevada.

Com relação a matriz de correlação é preciso que as variáveis usadas na análise de fatores apresentem um coeficiente de no mínimo $\pm 0,30$. Conforme destaca Hair e outros (2009), coeficientes de pelo menos $\pm 0,40$ são importantes e de $\pm 0,50$ significantes. As correlações entre as variáveis utilizadas na análise foram significativas, todas ficando acima de 0,60.

Como as correlações são significativas e a razão entre o número de observações e o número de variáveis é elevada, a amostra mostra-se apropriada para a condução da análise de fatores. Essa conclusão é validada pela Medida de Adequação de Amostra de Kaiser (MSA) calculada para cada ano da análise e apresentada no apêndice A por questões de espaço. Seu valor situou-se entre 0,870 e 0,901, um valor satisfatório de acordo com Fávero e outros (2009). A estatística MSA varia entre 0 e 1 e para que a análise de fatores possa ser conduzida é necessário obter um valor de pelo menos 0,50. Além disso, o teste de esfericidade de Bartlett (*Bartlett test of sphericity* - BTS) rejeitou, em todos os anos, a hipótese nula de que a matriz de correlações é uma matriz identidade, indicando dessa forma que o modelo fatorial é apropriado.

Na extração dos fatores, utilizou-se o método da Análise do Fator Principal (*Principal Factor Analysis* - PFA), o qual busca identificar o número menor de fatores que respondem pela variância comum (correlação) de um conjunto de variáveis. PFA não é afetada por mudanças de escala nos dados e é o método mais utilizado em análise exploratória de fatores. Para selecionar o número de fatores a serem retidos foi utilizada a análise paralela, que é um método obtido com base em simulação Monte-Carlo onde compara-se os autovalores observados com aqueles obtidos de variáveis normais não correlacionadas; um fator é retido se o seu autovalor é maior do que a 95° parte dos autovalores derivados de dados aleatórios gerados na simulação. Cabe destacar que essas estratégias metodológicas adotadas são consideradas padrão em análise exploratória de fatores (WILLIAMS; ONSMAN; BROWN, 2010).

A qualidade de ajuste do modelo pode ser observada com a condução de distintos testes. O objetivo desses testes é analisar se a correlação existente entre as variáveis é derivada de fatores latentes ou é apenas aleatória. Os testes comumente utilizados são os Índices de Ajuste Absoluto (IAA's) e os Índices de Ajuste Incremental (IAI's). Os IAA's mostram que o modelo mais adequado tem ajuste de zero. Dessa forma, quanto mais elevados os valores desses índices, pior é o ajuste do modelo estimado. A hipótese nula é de que os fatores são capazes de explicar de maneira satisfatória a variância dos dados. Os IAI's realizam uma comparação direta entre os resultados obtidos com uma especificação de referência. Seus valores variam de 0 a 1, sendo que o modelo é considerado adequado para valores maiores que 0,95 (HU; BENTLER,1999).

Por questões de espaço e conveniência optou-se por apresentar no apêndice B e C os resultados da análise de fatores, assim como o resumo dos testes de adequação do modelo apenas para o ano de 2002 e de 2017. Todavia, cabe ressaltar que o modelo se mostrou adequado, com os indicadores de ajuste absoluto e de ajuste incremental situando-se em níveis satisfatórios para todos os anos analisados. Apenas um fator foi retido em cada um dos anos analisados. Este fator foi nomeado **GOVERN**. Além disso, foi incluído na análise, separadamente, o indicador de ambiente para negócios denominado **ILE**, ambos constituem medidas de robustez institucional de um país. De posse do fator e do indicador de ambiente de negócios associou-se cada projeto implementado em cada país, em determinado ano, a um valor que foi utilizado na análise em *cross-section*.

2.5.4 Variáveis de controle

Foram incluídas nas análises de regressão variáveis que representam outros fatores com potencial para afetar o custo dos investimentos em projetos de energias renováveis não convencionais. Essas variáveis foram obtidas no banco de dados do Banco Mundial, *World Development Indicators*, que são dados compilados a partir de fontes internacionais oficialmente reconhecidas (BANCO MUNDIAL, 2018c).

Há um consenso entre diversos autores que o desempenho ambiental, que está também associado ao maior volume de investimento em fontes renováveis, depende do desempenho econômico de um país. Esty e Porter (2005), Scruggs (1999 e 2001) e Cracolici e outros (2010), por exemplo, argumentam que existe uma correlação positiva entre renda e desempenho ambiental. A preocupação com a sustentabilidade é mais evidente em países com níveis de

renda maiores e a pressão social leva a legislações locais mais favoráveis ao investimento em fontes renováveis de energia, seja via menores tributos ou com concessão de subsídios, reduzindo os custos destes projetos.

Outro ponto de vista tem relação com as mudanças nos padrões de consumo de energia que vêm ocorrendo em diversos países do mundo. Indivíduos com níveis rendas mais altas tendem a ter um consumo de energia mais elevado, visto que o nível de propriedade de bens duráveis convencionais aumenta constantemente. Dessa forma, entende-se que existe uma relação direta entre renda e demanda por energia. O aumento na demanda por energia faz com que seja possível obter retornos de escala com a produção e assim seja possível reduzir os custos. A medida utilizada como indicador do nível de renda foi o logaritmo natural do PIB per capita a preços internacionais constantes de 2010 no ano de implementação do projeto (**PIBPC**).

Também foi adicionada como variável de controle o valor adicionado da indústria a preços internacionais constantes de 2010 no ano de implementação do projeto (**INDUSTRIA**). De acordo com Sadorsky, (2013) o termo industrialização geralmente é utilizado para se referir a um aumento da atividade industrial. A maioria dos autores considera que a industrialização induz ao maior uso de energia, visto que a introdução de novas máquinas, equipamentos e técnicas para produzir bens já existentes ou novos bens aumenta a atividade industrial que utilizará mais energia do que a agricultura ou fabricação tradicional. Em países com um setor industrial mais pujante a demanda por energia é maior, viabilizando projetos de geração de energia de maior porte, com potencial para se beneficiarem de economias de escala. Portanto, é possível que projetos de geração de energia em países mais industrializados envolvam menores custos por unidade de capacidade.

Outro fator importante para a viabilidade de projetos é a estabilidade econômica de um país. Em economias mais estáveis o prêmio de risco exigido pelo investidor é menor, o que reduz os custos de investimento. Foram utilizadas duas variáveis para medir a estabilidade econômica:

- A volatilidade da taxa de câmbio oficial (**VOLCAMBIO**): a estabilidade cambial é importante para projetos de energia renovável não convencional que muitas vezes dependem da importação de componentes essenciais da unidade geradora. Essa variável é representada pelo desvio padrão da taxa de câmbio no ano de implementação do projeto.
- A taxa de inflação anual (**INFLACAO**): Países com elevadas taxas de inflação dificultam a implementação de projetos, elevando o prêmio de risco dos investidores. A variável foi

medida pela variação percentual do índice de preços ao consumidor no ano de implementação do projeto.

A fim de introduzir características qualitativas no modelo foram incluídas variáveis *dummies* para o país e tecnologia do projeto. As variáveis *dummies* que indexam os países foram adicionadas para controlar as diferentes características não observáveis dos locais de implementação do projeto e as variáveis *dummies* de tecnologia capturam os diferenciais de custos associados a projetos de fontes de energia diferentes - pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, biogás, solar, eólica e geotérmica.

2.5.5 Estatísticas de Influência

Para testar a robustez dos resultados encontrados nas estimações realiza-se o cálculo das estatísticas de influência, visando identificar a presença de *outliers*, ou seja, observações que apresentem um significativo afastamento das demais observações ou sejam inconsistentes com elas. A existência de *outliers* na amostra pode enviesar os resultados obtidos, por isso é relevante que tais testes sejam realizados.

As estatísticas de influência foram desenvolvidas por Belsley, Kuh, e Welsch (1980) e são utilizadas para mostrar como uma observação é capaz de influenciar as estimativas dos parâmetros da regressão. Sendo assim, uma observação é influente caso sua exclusão do ajuste da regressão traga uma significativa mudança na análise de regressão, nas estimativas dos coeficientes do modelo ou nos valores ajustados. Sendo assim, alguns testes⁶ foram desenvolvidos a fim de identificar possíveis *outliers*. Neste trabalho foram realizados três destes testes, quais sejam:

- *RSTUDENT*: Esse teste é obtido pelo quociente dos resíduos por seus erros padrão estimados, tal como:

$$RSTUDENT = \frac{r_i}{S_{(i)}\sqrt{(1-h_i)}} \quad 2$$

Caso as observações com *RSTUDENT* apresentem valores absolutos superiores a 2, então é possível que estas sejam *outliers*.

⁶ Ver Rousseeuw e Leroy (2005) e Johnson (2006) para uma discussão detalhada dessas metodologias.

- *DFFITS*: Essa estatística é capaz de calcular a mudança no valor previsto na i -ésima observação devidos a exclusão da observação j do conjunto de dados:

$$DFFITS_j = \hat{y}_j - \hat{y}_{(-j)} \quad 3$$

Sendo que \hat{y}_j é o valor previsto para a observação j de todo o modelo e $\hat{y}_{(-j)}$ é o valor previsto para a observação j baseado nos parâmetros estimados após a eliminação da observação j . A estatística *DFFITS* é definida por:

$$DFFITS_j = \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{(-j)}}{\sqrt{QMRes_i h_{jj}}} \quad 4$$

Onde *QMRes* é o erro quadrático médio do modelo de regressão.

Valores absolutos excedentes a $DFFITS > 2\sqrt{\frac{p}{n}}$ indicam observações influentes para grandes amostras ou $|DFFITS_i| > 1$ para pequenas e médias amostras.

- *COVRATIO*: Essa estatística é utilizada na obtenção de informações a respeito da precisão geral das estimativas. Ela mensura o efeito da exclusão da i -ésima observação no determinante da matriz de covariância das estimativas. A estimativa é definida por:

$$COVRATIO_i = \frac{\det[QMRes_i(X_i'X_i)^{-1}]}{\det[QMRes_i(X'X)^{-1}]} \quad 5$$

Se $COVRATIO_i > 1 + 3p/n$ ou $COVRATIO_i < 1 - 3p/n$ é possível dizer que são pontos influentes. De acordo com Belsley, Kuh e Welsch (1980) o limite inferior é adequado somente quando $n > 3p$.

Se for identificada a presença de *outliers* nas estimativas realizadas por MQO é possível atuar de duas maneiras. A primeira é através da exclusão das observações com valores extremos. Entretanto, essa conduta além de ser arbitrária ainda implica na exclusão de informações relevantes que apresentam as características da amostra analisada.

A segunda alternativa é o uso de métodos robustos de estimação. Os estimadores de regressão robustos contam com algumas propriedades que permitem a realização de estimações mais confiáveis mesmo quando existem desvios dos pressupostos básicos do MQO. De maneira geral, os métodos robustos substituem a função que será minimizada por outra menos sensível a valores extremos.

2.5.6 Mínimos Quadrados Robustos - MQROB

As técnicas de regressão robustas fornecem respostas semelhantes às técnicas clássicas de mínimos quadrados quando os erros da relação linear existente entre as variáveis têm distribuição normal. Porém, fornecem respostas distintas quando os erros não têm distribuição normal ou quando os dados possuem *outliers* significantes (MATHSOFT, INC, 1997).

Esse tipo de regressão é utilizado por ser considerada uma técnica robusta com relação a *outliers* e também com relação aos pontos extremos que possuem grande influência sobre o resultado. Além disso, quanto maior for o número de variáveis consideradas no modelo, mais complexo é identificar *outliers* por meio de técnicas de regressão clássicas (DA CUNHA *et al.*, 2002).

Para que os estimadores sejam robustos eles precisam possuir certas propriedades que irão permitir que as estimações sejam confiáveis mesmo quando os dados possuem certa contaminação, ou seja, os estimadores podem ser considerados linearmente robustos a desvios dos pressupostos básicos do método de mínimos quadrados. A literatura tem proposto métodos que substituem a função a ser minimizada por outra que não seja tão sensível a *outliers*.

De acordo com Rousseeuw e Leroy (2005), o modelo robusto pode ser estimado corrigindo-se para a presença de *outliers* na variável dependente - estimação do tipo M -, para a presença de *outliers* nas variáveis independentes - estimação do tipo S - ou para a presença de *outliers* nas variáveis dependente e independentes - estimação do tipo MM.

A presença de variáveis *dummies* binárias independentes inviabilizam as estimações do tipo S e do tipo MM. Nesses casos, a estimação do tipo M é a mais indicada. Os estimadores do tipo M, propostos por Huber (1973) generalizam o conceito de estimação de Máxima Verossimilhança. Podem ser considerados uma classe genérica de estimadores que inclui como

um de seus casos particulares o estimador de MQO. Os estimadores do tipo M são definidos como os valores (β_n, σ_n) que minimizam a seguinte função de dispersão dos resíduos:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{y_i - \hat{x}_i \beta}{\sigma} \right) = \sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{r_i}{s} \right) \quad 6$$

2.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo é inicialmente estimado utilizando-se Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com controle para a heterocedasticidade, que é comum em estimativas em *cross-section*. Para testar a robustez dos resultados encontrados foram realizadas as estatísticas de influência, conforme pode ser visto na figura 1:

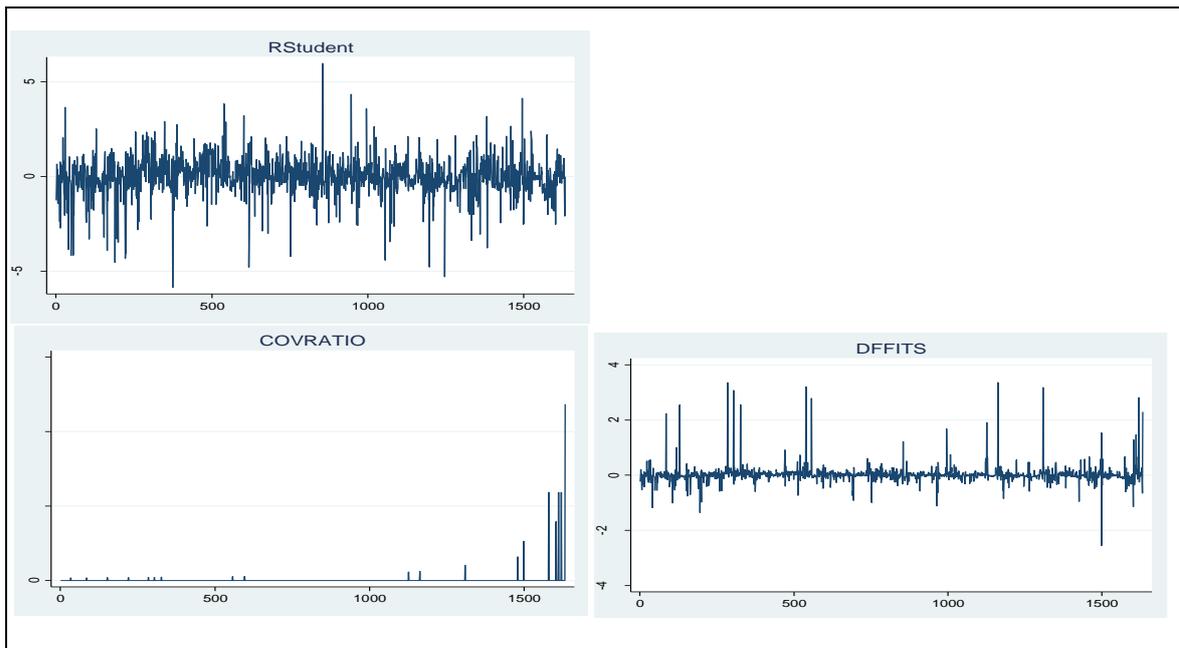


Figura 1- Estatísticas de Influência, dados países em desenvolvimento - 2002 a 2017.

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos na análise econométrica são apresentados na Tabela 2. Por questões de espaço optou-se por apresentar os coeficientes de DP (φ) no apêndice D e E, embora os resultados relevantes sejam discutidos a seguir.

Tabela 2 - Análise Econométrica: Resultados MQO e MQROB.

MQO			MQROB		
Variável	Coefficiente	p-valor	Variável	Coefficiente	p-valor
C	1,128	0,311	C	-0,592	0,344
GOVERN	0,022	0,897	GOVERN	-0,190	0,096*
ILE	-0,017	0,076*	ILE	-0,013	0,032**
LNPIBPC	0,044	0,662	LNPIBPC	0,076	0,220
INDUSTRIA	0,044	0,000***	INDUSTRIA	0,055	0,000***
INFLACAO	-0,009	0,061*	INFLACAO	-0,004	0,325
VOLCAMBIO	0,000	0,644	VOLCAMBIO	0,000	0,062**
D_WIND	-0,730	0,000***	D_WIND	-0,804	0,000***
D_SOLAR	-0,505	0,000***	D_SOLAR	-0,565	0,000***
D_BIOMASS	-1,008	0,000***	D_BIOMASS	-0,977	0,000***
D_PCH	-0,760	0,000***	D_PCH	-0,746	0,000***
D_GEOTHERMAL	-0,420	0,028**	D_GEOTHERMAL	-0,090	0,434
R ²	0,295		R ²	0,320	
Adj. R ²	0,260		Rw ²	0,558	
F-statistic	8,539		Rn ² Stat.	1454,782	
Prob (F-statistic)	0,000		Prob. Rn ² Stat.	0,000	
Nº Obs.	1632		Nº Obs.	1632	

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: *, ** e *** indicam significância estatística de 10%, 5% e 1%, respectivamente; ajustes utilizados para a estimação do tipo M: peso = Bisquare, sintonia = 4.685, escala = MAD (centralizado pela mediana (erros padrão e covariância do Tipo I de Huber)).

Observa-se que o coeficiente da variável **GOVERN** não tem representatividade estatística na estimativa utilizando MQO. Contudo, na estimativa utilizando MQROB o coeficiente passa a ser estatisticamente significativo a um nível de 10%. O coeficiente da variável **ILE** apresentou representatividade estatística a 10% na estimativa MQO e sua relevância estatística se eleva para 5% nos resultados obtidos com MQROB. O sinal dos coeficientes das variáveis **GOVERN** e **ILE** são os esperados: indicadores de governança e de ambiente para negócios mais robustos reduzem o custo dos investimentos em fontes renováveis não convencionais.

Além de terem representatividade estatística, os coeficientes de **GOVERN** e de **ILE** também são economicamente relevantes. Utilizando os dados da estimação robusta, considere o projeto BW Guirapa I Wind Park de energia eólica implementado no Brasil em 2014, a um investimento de US\$ 1,7 milhão/MW (projeto com custo mais próximo da mediana dos investimentos brasileiros). Se o indicador de governança **GOVERN** e de ambiente de negócios **ILE** do país fosse 10% mais alto naquele ano, o volume de recursos por MW disponibilizado pelos

investidores seria 0,10% e 7,1% menor, respectivamente. Nesse sentido, percebe-se que apesar de ambos os indicadores impactarem no custo do investimento, o indicador de ambiente de negócios **ILE** apresenta uma resposta maior.

As variáveis de controle **LNPIBPC** e **INFLACAO** não apresentaram significância estatística nas estimativas via MQROB. Em contrapartida, as variáveis **INDUSTRIA** e **VOLCAMBIO** apresentaram ao nível de 1% e 10% de significância, respectivamente. A primeira com sinal oposto ao esperado, indicando que é possível que não estejam ocorrendo ganhos de escala, visto que um aumento na industrialização está gerando aumentos nos custos dos investimentos.

Os coeficientes das variáveis *dummies* de tecnologia apresentaram relevância estatística, com exceção da que representa os projetos de fonte geotérmica na estimativa com MQROB. Verifica-se que o fato de o projeto envolver as tecnologias biomassa, eólica, PCH e solar implica em menores valores de investimento por MW. A magnitude dos coeficientes indica que projetos de biomassa requerem menos investimento, seguidos de eólica, PCH e solar.

Quanto às *dummies* de países, a maioria foi estatisticamente significativa. Dentre elas, os coeficientes que indexaram a China, Gabão e Vietnã foram negativos, ou seja, projetos desenvolvidos nesses países requerem menos investimento por MW.

2.7 CONCLUSÃO

O uso de fontes renováveis tem se tornado cada vez mais importante em razão da necessidade de diversificação tecnológica, da dependência energética de muitos países, da falta de acesso à energia para milhares de pessoas e, principalmente, devido aos impactos ambientais ocasionados por fontes convencionais. A implementação de fontes mais limpas tem impacto sobre a produtividade, os custos e a competitividade das economias e é crucial para a promoção do crescimento e desenvolvimento econômico e sustentável de nações menos desenvolvidas.

Em uma conjuntura de restrições orçamentárias por parte do setor público, geralmente observada em países em desenvolvimento, o fomento ao envolvimento do setor privado tem viabilizado maior eficiência operacional e eliminado gargalos na provisão de infraestrutura, em particular no setor de energia a partir de fontes renováveis não convencionais. Contudo, a

ausência de um arcabouço institucional robusto pode ocasionar entraves na alavancagem do setor.

A relevância da qualidade das instituições de governança e do ambiente de negócios para o crescimento e desenvolvimento econômico, bem como para as decisões de implementação da política energética e ambiental tem sido objeto de estudo de uma crescente literatura. A análise empírica realizada neste ensaio foi capaz de evidenciar que um maior desenvolvimento institucional pode ser capaz de reduzir o custo do investimento em projetos de energias renováveis não convencionais com a participação do setor privado, em países em desenvolvimento.

Esses projetos demandam elevado volume de recursos e, além disso, possuem custos irreversíveis e longo prazo de maturação. Um ambiente institucional robusto é capaz de impactar sobre os custos dos investimentos ao reduzir o prêmio de risco estimado pelos investidores estimulando-os a elevar o nível de investimentos. Os testes indicam que as variáveis de governança e de ambiente de negócios possuem representatividade estatística. Esses indicadores também podem ser considerados economicamente relevantes, visto que um aumento nos mesmos proporciona redução na magnitude do custo do investimento por MW.

Uma sociedade com instituições de governança fortalecidas permite que os indivíduos expressem suas preocupações e participem da seleção de suas forças governamentais. Isso abre espaço para que questões ambientais e energéticas tenham maior ênfase e sejam discutidas com maior frequência. Um governo eficaz é crucial para demonstrar o compromisso com políticas energéticas. Regulamentações sólidas permitem e promovem o desenvolvimento do setor privado, estimulando os investimentos em fontes de energias renováveis.

Em contrapartida, a instabilidade afeta prioridades do governo e os recursos financeiros, muitas vezes, deixam de ser direcionados a importantes iniciativas de políticas energéticas. Além disso, a corrupção beneficia apenas um grupo isolado de indivíduos, fazendo com que as políticas direcionadas ao setor energético não sejam equilibradas e muito menos sustentáveis.

Um ambiente de negócios com menos limitações tende a tornar o consumo de energia mais eficiente, estimula a manutenção de ambientes mais limpos e sustentáveis e proporciona acesso a tecnologias e produtos que são capazes de tornar a vida dos indivíduos mais saudável. Nesse

sentido, uma economia menos burocrática e mais eficaz mostra-se importante para o desenvolvimento das fontes de energias renováveis não convencionais e, conseqüentemente, para a promoção de melhorias ambientais.

Sociedades que possuem um sistema judicial imparcial, têm direitos de propriedades bem definidos e protegidos e contam com a efetiva aplicação das leis asseguram que os mercados funcionem de maneira eficiente e assim, os investimentos em fontes de energia renováveis sejam impulsionados. O livre comércio proporciona a concorrência, criando oportunidades para as empresas adotarem tecnologias mais modernas e eficientes. A inovação e o maior acesso à energia impulsionado pela concorrência produzem, como efeito final, a redução dos custos dos investimentos.

Portanto, é possível dizer que países que conseguem ampliar a qualidade de suas instituições de governança e reduzir as limitações do ambiente de negócios expandem amplamente as oportunidades de desenvolvimento das fontes de energia renováveis não convencionais, obtêm ganhos econômicos significativos, aumentam o bem-estar geral e conseguem proteger o meio ambiente de maneira mais efetiva.

Espera-se que o presente trabalho sirva como base para que trabalhos futuros aprofundem a análise e busquem identificar de forma desagregada quais instituições e em que magnitude afetam os custos dos investimentos em fontes de energia renováveis. Ademais, sugere-se incluir na análise países desenvolvidos a fim de fazer comparações e identificar as melhores práticas adotadas por cada país.

3 EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: UMA ABORDAGEM PARAMÉTRICA DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA

3.1 INTRODUÇÃO

A reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) ocorrida nos anos 1990 redesenhou o papel do Estado. A iniciativa privada passou a ser responsável pelo fornecimento de diversos serviços de infraestrutura. Essa reformulação criou oportunidades de competição principalmente para o segmento de geração e comercialização de energia. Devido às elevadas economias de escala e escopo, os segmentos de transmissão e distribuição permaneceram estabelecidos como monopólios naturais regulados.

De acordo com Borenstein e outros (2002), apesar dos mecanismos para estimular a competição, falhas de mercado afetam a concorrência entre as firmas. Diante de um contexto de competição imperfeita, essas podem não estar operando de forma ótima, o que justifica a relevância em mensurar a eficiência, buscando identificar fatores que estejam afetando a operação e os resultados dessas firmas.

Conforme Golany, Roll e Rybak (1994) as análises de eficiência na indústria de geração de energia são fundamentais quando boa parte das empresas pertence ao setor público e, portanto, sujeitam-se a regulamentações que determinam a necessidade de avaliações de produtividade. Ademais, analisar a eficiência é de suma relevância tendo em vista que os custos associados a construção e operação das unidades geradoras representam um percentual expressivo do PIB em boa parte dos países desenvolvidos. Nesse sentido, pequenas melhorias representam benefícios monetários significativos.

Em países menos desenvolvidos, onde o setor privado tem sido crucial para o desenvolvimento do setor energético, a mensuração da eficiência também é crucial. Os elevados investimentos que os projetos demandam e o aumento da competitividade do mercado têm compelido as empresas a repensar e aperfeiçoar suas atividades, no intuito de obter maiores lucros e, sobretudo, conseguir se manter atuante no mercado.

Apesar dos elevados custos, os recursos energéticos renováveis têm se mostrado uma das soluções mais adequadas para resolver problemas relacionados à segurança e dependência

energética, à crescente demanda por energia, às mudanças climáticas e aos impactos ambientais. Na matriz energética brasileira, o consumo de fontes não renováveis ainda é maior do que o de renováveis. Entretanto, a matriz elétrica do país é predominantemente renovável, devido principalmente a geração de energia por meio de usinas hidrelétricas de grande porte. Essa dependência da fonte hídrica e conseqüentemente das termelétricas, que são ativadas quando o setor hidrelétrico dá indícios de que não conseguirá suprir a demanda de consumo, tem apontado para a necessidade de o país diversificar sua matriz a fim de reduzir os riscos e os altos custos inerentes ao modelo.

Os esforços para diversificar cada vez mais a matriz elétrica brasileira têm sido evidenciados pela notória expansão não só, mas principalmente, do setor eólico. A fonte eólica possui vantagens para a sociedade como um todo, visto que é uma fonte inesgotável, não gera resíduos ou gases poluentes e contribui para redução da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, gera benefícios para as comunidades onde os parques estão inseridos já que a implantação desses é compatível com o desenvolvimento de outras atividades no mesmo terreno, proporcionando a geração de empregos e o aumento dos investimentos na região.

O crescimento do setor eólico pode ser explicado em parte pelos vultosos investimentos com participação privada, avanços tecnológicos, condições climáticas favoráveis, desenvolvimento da cadeia produtiva local e também pela qualidade dos ventos nacionais. Considerando o contexto apresentado, o objetivo desse trabalho é estimar a fronteira de eficiência para projetos de energia eólica brasileiros. Analisar a eficiência de um mercado em ascensão, como é o caso da fonte eólica no Brasil, é relevante para que os gestores consigam otimizar suas estratégias operacionais, reduzindo seus custos por meio da redução do nível de insumos utilizados para produzir determinada quantidade, ou alternativamente, possam elevar sua produção, mantendo a quantidade de insumos inalterada.

Neste trabalho foi utilizada a definição de projeto eólico estabelecida pelo Banco Mundial. Cada projeto representa um conjunto de parques eólicos que são financiados substancialmente pelo setor privado. Normalmente os dados, inclusive contábeis, são apresentados de forma agregada, portanto é necessário trabalhar com essa definição.

A priori foi utilizada a técnica Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis – SFA*) para identificar os projetos com as melhores práticas, ou seja, que estão sobre a fronteira

de produção. Posteriormente, no intuito de identificar quais fatores explicam os níveis de eficiência obtidos, foi utilizado um modelo *TOBIT*. A análise foi realizada para um painel de dados entre 2015 e 2017. O curto período de análise deve-se ao fato que uma parte significativa dos parques entraram em operação recentemente no Brasil, não havendo assim dados para um número relevante de projetos para anos anteriores.

O presente trabalho mostra-se inédito visto que não foram encontrados na literatura nacional trabalhos direcionados ao setor de geração de energia via fonte eólica. Cabe destacar que Machado (2014) é o que mais se aproxima com o que foi proposto neste ensaio. Entretanto, o mesmo considera em sua análise apenas usinas hidrelétricas e termelétricas.

Além desta introdução, o capítulo está dividido em outras seis subseções. A segunda subseção mostra a expansão da fonte eólica no contexto da evolução do setor elétrico brasileiro. A terceira apresenta o conceito de eficiência na visão de distintos autores, bem como descreve os tipos de eficiência existentes e as principais técnicas de mensuração. A quarta subseção apresenta uma revisão da literatura referente ao uso de técnicas de fronteira para análises de eficiência no setor energético. A quinta subseção apresenta a descrição das variáveis utilizadas, bem como detalhes sobre a metodologia econométrica aplicada. A sexta subseção apresenta os resultados obtidos e, por fim, a sétima subseção apresenta as principais conclusões do capítulo.

3.2 ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO DA EVOLUÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)

A partir dos anos 1990 o Estado deixa de lado sua função de executor dos serviços e passa a assumir a função de agente regulador, transferindo para o setor privado a responsabilidade de fornecer diversos serviços de infraestrutura. Com relação ao setor elétrico o entendimento era de que a entrada de capitais privados seria uma boa alternativa na resolução do déficit fiscal enfrentado no período, além disso poderia elevar o volume de investimentos e aumentar a eficiência das empresas energéticas, contribuindo para a ampliação do sistema elétrico nacional.

A despeito do programa de privatizações ter sido considerado bem sucedido, visto que conseguiu atrair capital privado nacional e estrangeiro para o setor energético, o modelo setorial mostrou-se insustentável devido a questões estruturais, ou seja, relacionadas ao próprio modelo, bem como razões conjunturais, relacionadas ao período. Os investimentos inadequados na

capacidade de geração e transmissão de energia elétrica, o atraso no cronograma de obras de grande porte e longos períodos de estiagem vivenciados na época foram responsáveis por tornar o sistema defasado, no qual a oferta de energia era insuficiente para acompanhar o acelerado aumento da demanda (LEME, 2009).

Nessa época houve necessidade de implementar programas de racionamento de energia elétrica por aproximadamente oito meses, entre 2001 e 2002, além disso foram introduzidas políticas de incentivo à geração de energia por meio de fontes renováveis alternativas como, por exemplo, a eólica. A operação de usinas eólicas teve início ainda nos anos 1990, porém sua consolidação foi restringida nessa época devido à ausência de políticas e os elevados custos da tecnologia.

O marco inicial da política de expansão da fonte eólica no Brasil foi a criação do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) em 2001. O programa almejava atingir 1050MW de potência instalada, para entrada em operação até o final de 2003. Apesar do PROEÓLICA não ter conseguido viabilizar a entrada emergencial de novos projetos, o programa proporcionou a abertura de mercado para empresas estrangeiras atuantes no segmento de renováveis. Nesse momento, a necessidade de estruturar uma legislação que pudesse de fato tornar o desenvolvimento do mercado de renováveis no Brasil efetivo no longo prazo tornava-se cada vez mais evidente (ALVES, 2010).

Com vistas a superar o risco iminente de corte de energia elétrica no Brasil foi criado em 2002 e revisado em 2003, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O programa surgiu no intuito de ser um instrumento capaz de diversificar a matriz energética brasileira, por meio do aumento da participação de empreendimentos das fontes eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), garantindo maior segurança no abastecimento e explorando as potencialidades regionais (BRASIL, 2017).

Nessa época, a fonte eólica era a mais cara e menos desenvolvida dentre as três fontes incentivadas pelo programa. O PROINFA foi o primeiro programa estruturado indutor do desenvolvimento dessas fontes em grande escala, abrindo possibilidades para instalações de fábricas e experimentações com tais tecnologias. Segundo Martins (2010), o programa pode ser classificado com um subsídio indireto, não alinhado ao mercado competitivo, visto que tem

características de um programa de incentivo por meio de contratos de longo prazo fixados com empresas estatais e tendo remuneração garantida por meio de tarifas especiais.

Após o desenvolvimento do PROINFA, distintas empresas estrangeiras mostraram interesse em investir no Brasil e muitas iniciaram a implantação de parques eólicos. De forma geral, é possível dizer que, juntamente com outras ações governamentais, o PROINFA colaborou para o fortalecimento da indústria de geração de eletricidade brasileira (BRASIL, 2017).

Em 2004, o setor elétrico passou por uma nova reestruturação. O novo modelo foi desenvolvido com interesse de atingir a modicidade dos preços, garantir a segurança de suprimento de energia elétrica, alcançar a estabilidade no mercado a fim de possibilitar a atração de novos investidores e universalizar o fornecimento de energia.

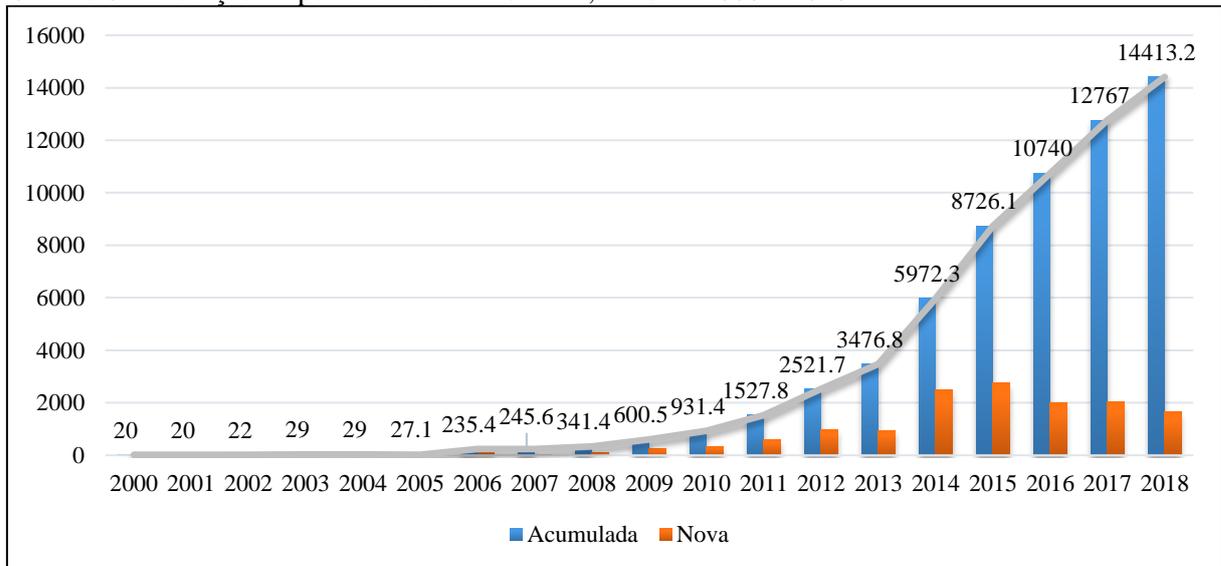
Além do Ambiente de Contratação Livre (ACL), que já existia no modelo vigente entre 1995 e 2003, a reestruturação do setor adotou um novo modelo de regulamentação da comercialização de energia elétrica baseado em um Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e em leilões de energia nova. Nesse novo modelo, as empresas estatais voltam a ocupar espaço no setor elétrico, coexistindo com as privadas (VIEIRA *et al.*, 2009). Os leilões podem ser considerados subsídios indiretos alinhados ao mercado competitivo, visto que o critério de seleção dos empreendimentos é o econômico, e ao definir como vencedores do leilão os menores valores dos lances estimula a competitividade entre os agentes.

Fazem parte do Ambiente de Contratação Regulado (ACR) os consumidores de energia que não conseguem optar de forma livre pelo seu fornecedor, geralmente os residenciais, comerciantes e empresas de pequeno porte. A distribuidora concessionária responsável contrata toda a demanda desse ambiente. Para que a demanda futura desses consumidores seja atendida são realizados Leilões de Energia Nova (LEN) referente à contratação de longo prazo de empreendimentos futuros de geração de eletricidade. Além dos LEN, outros tipos de leilões passaram a ser desenvolvidos posteriormente, tais como os leilões de Fontes Alternativas (LFA) e os Leilões de Energia de Reserva (LER)⁷.

⁷ Uma descrição detalhada do sistema de leilões foge ao escopo deste trabalho e pode ser obtida em BRASIL, (2004) e BRASIL, (2016b).

A partir do desenvolvimento do sistema de leilões, a fonte eólica passou a ter crescente expansão. De acordo com o gráfico 6 até o início da década de 2000 a potência eólica instalada era pouco representativa. Entretanto, a partir da desregulamentação do setor elétrico, a potência instalada acumulada da fonte eólica cresceu exponencialmente, passando de 29 MW em 2005 para 14.413 MW em 2018. A potência nova instalada teve um crescimento maior nos anos de 2014 e 2015 em comparação com os demais.

Gráfico 6 - Evolução da potência eólica instalada, Brasil – 2000 a 2018.

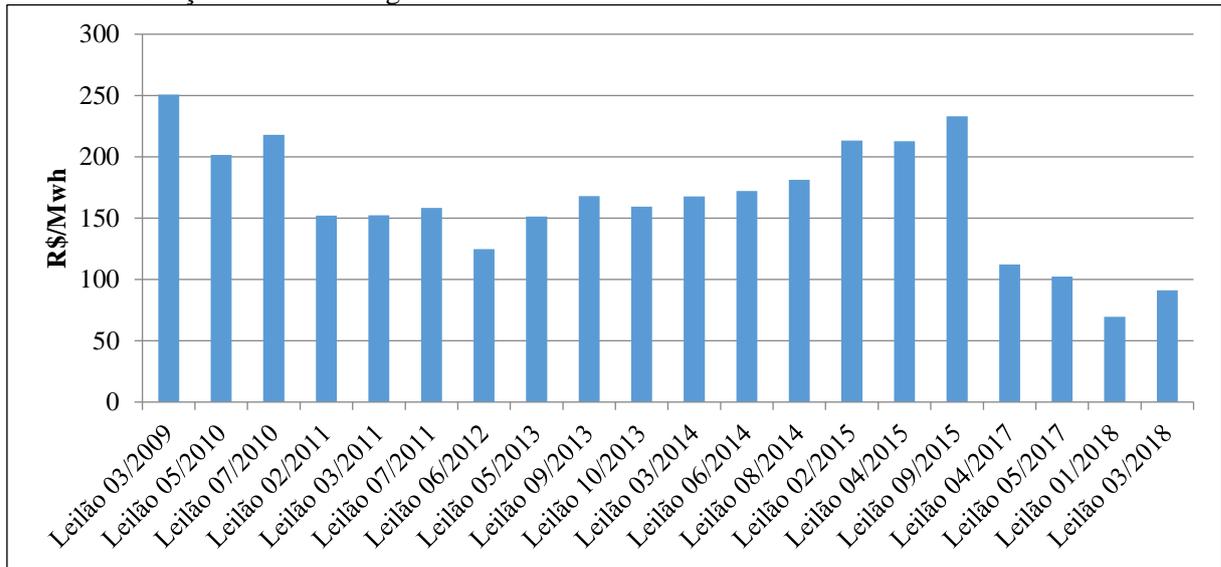


Fonte: ABEEÓLICA, (2018).

De acordo com WWF BRASIL (2015), a fonte eólica entrou de forma definitiva na matriz energética brasileira e no mapa da indústria mundial a partir de 2009, ano em que foi realizado o primeiro leilão de geração exclusivo dessa fonte. Desde então, já foram realizados outros 19 leilões com participação da fonte eólica (ANEEL, 2018b).

Com a prática dos leilões a fonte eólica passou a liderar as vendas de energia no país. O mercado se tornou muito atraente, tanto para investidores nacionais como estrangeiros. Assim como em outros países, o apoio governamental foi crucial no processo de alavancagem do setor eólico nacional. O gráfico 7 apresenta o preço médio da energia eólica para os leilões em que a fonte teve participação.

Gráfico 7 - Preço médio da energia eólica nos leilões realizados no Brasil – 2009 a 2018.



Fonte: CCEE, (2018a).

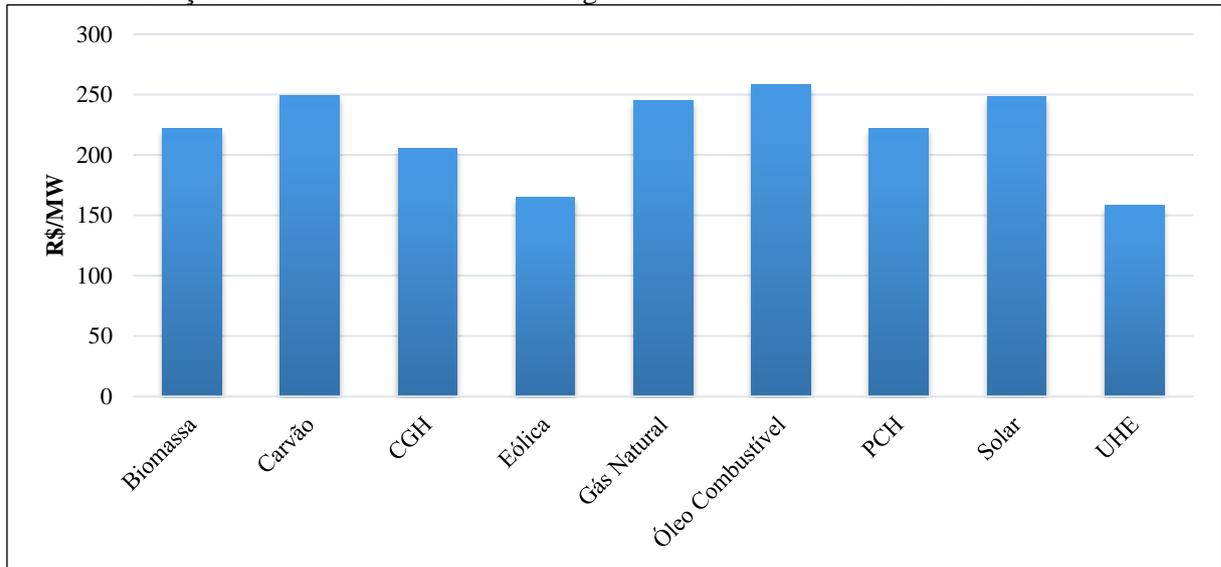
Nota: Preço médio ajustado pelo IPC-A para outubro de 2018.

Os reflexos da crise financeira internacional de 2008 puderam ser vistos nos preços obtidos nos leilões de energia eólica, principalmente nos dois primeiros realizados em 2011. Conforme destaca Lopes (2011), a recessão provocou uma redução na demanda por equipamentos para usinas eólicas nos países desenvolvidos. Dessa forma, os fabricantes desses equipamentos passaram a procurar mercados em ascensão, como era o caso do mercado brasileiro, ofertando seus produtos a preços bem menores do que teriam sido ofertados em países desenvolvidos em períodos de estabilidade econômica.

A partir do terceiro leilão realizado em 2011 os custos passaram a aumentar. Os valores obtidos no primeiro leilão de 2012 podem ser considerados atípicos. Foram os valores mais baixos entre todos os leilões, visto que a quantidade de energia negociada foi muito pequena e, além disso, a maioria das usinas estava localizada em áreas próximas e eram controladas por uma única empresa (LOPES, 2011).

Em 2015, devido à desvalorização do real, os preços aumentaram significativamente. Em virtude da crise, em 2016 não foram realizados leilões. A partir de 2017 voltam a ser realizados, mas apresentam preços bem inferiores aos anos anteriores. Atualmente a fonte eólica é a segunda mais competitiva do Brasil, ficando atrás apenas das usinas hidrelétricas de grande porte, conforme pode ser visto no gráfico 8:

Gráfico 8 - Preço médio de venda leilões de energia realizados no Brasil entre 2005 e 2018.



Fonte: CCEE, (2018a).

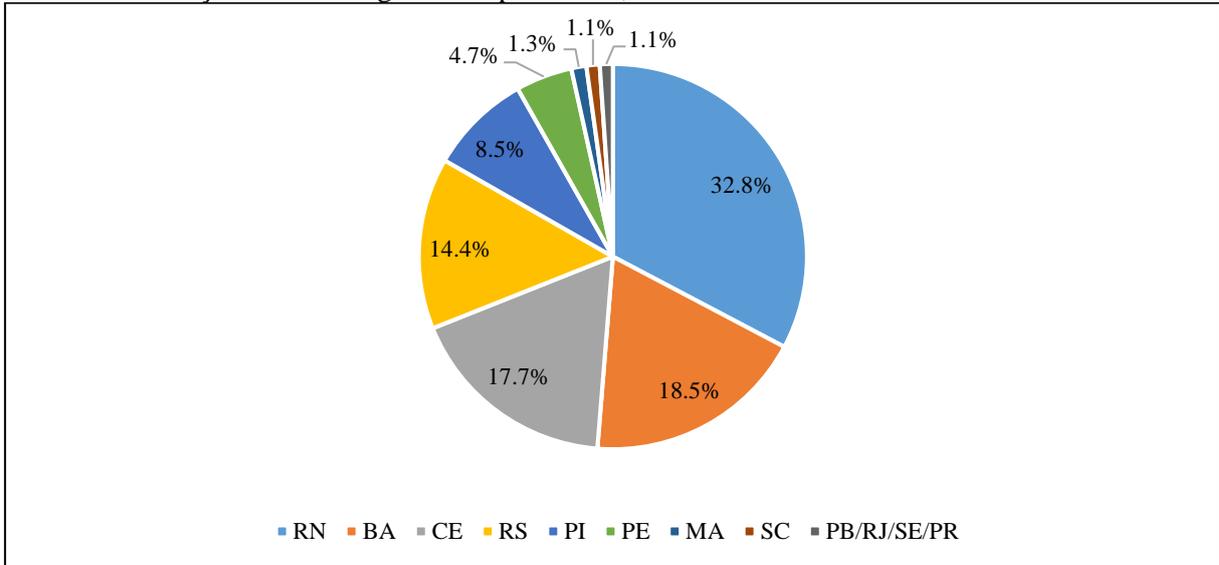
Nota: Preço médio ajustado pelo IPC-A para agosto de 2018.

As fontes biomassa, PCH's e solar, apesar de ainda apresentarem preços elevados, têm aumentado sua competitividade ano a ano, fato que mostra que a matriz energética brasileira tende a se tornar cada vez mais limpa e diversificada.

Em 2017, a potência eólica instalada teve uma expansão de 2027MW com relação ao ano anterior. Tal fato colocou o país na 6ª posição no ranking mundial de nova capacidade instalada no ano. Além disso, o Brasil também ficou entre os “top 10” no ranking mundial de capacidade acumulada de geração eólica com 12.767 MW instalados em 2017 (ABEEÓLICA,2018).

Assim como a potência, a geração de energia eólica brasileira vem aumentando ano a ano de maneira considerável. A produção de energia cresceu quase 28% em 2017 com relação a 2016, passando de 3772,7 MW médios para 4815,3MW médios. Conforme o gráfico 9, o estado que mais gerou energia eólica entre 2015 e 2017 foi o Rio Grande do Norte representando mais de 1/3 da geração nacional, seguido da Bahia representando cerca de 18,5%, Ceará 17,7%, Rio Grande do Sul 14,4%, Piauí 8,5% e Pernambuco representando cerca de 4,7%. Os demais Estados, representam um percentual inferior a 4% juntos. Como pode ser visto, a região Nordeste se destacou na geração de energia eólica entre os anos de 2015 e 2017.

Gráfico 9 - Geração média energia eólica por estado, 2015 a 2017- Brasil.



Fonte: ABEEÓLICA, (2018).

A maioria dos parques eólicos brasileiros estão instalados no Nordeste, fato que faz da região o principal polo da energia eólica do país, respondendo por mais de 80% da geração total. A qualidade dos ventos brasileiros, em especial da região Nordeste, ajuda a explicar o destaque do país no cenário internacional da indústria eólica. Se comparados com os ventos de países da Europa e com os EUA, os ventos brasileiros possuem características que possibilitam as máquinas otimizarem sua operação.

Somado à conjuntura de crise internacional e as especificidades dos ventos brasileiros, a trajetória tecnológica, o aumento da altura dos aerogeradores e o diâmetro das pás e dos rotores permitem ao Brasil uma vantagem comparativa singular. A política de nacionalização da produção de equipamentos e insumos passou a ser reforçada pelo governo brasileiro no intuito de aumentar o número de fabricantes e assim permitir que empresas que não operavam no país passassem a operar.

Distintos fabricantes de aerogeradores, torres, pás e outras peças passaram a fazer parte da cadeia produtiva da indústria eólica brasileira e isso, por sua vez, se tornou um importante vetor de investimentos e criação de empregos em distintas regiões do país (BRASIL, 2015). Atualmente, a fonte eólica passa por um momento de consolidação no Brasil e apesar do país estar atravessando um momento de turbulências políticas e econômicas, a indústria eólica segue crescendo e as perspectivas são bastantes otimistas.

3.3 REFERENCIAL TEÓRICO

A eficiência sempre foi um atributo valorizado em uma empresa. Todavia, sua importância vem crescendo significativamente nas últimas décadas devido a globalização econômica que tem compelido as empresas a repensarem e aperfeiçoarem suas atividades, dado o crescente aumento da competitividade do mercado. Nesse sentido, quando o interesse é mensurar o desempenho de uma organização é fundamental que o conceito de eficiência seja bem conhecido.

Conforme destaca Lovell (1996), o conceito pode ser considerado um indicador de sucesso, medida de desempenho por meio da qual distintas unidades são analisadas. Esta subseção analisa o conceito do termo eficiência e os tipos de eficiência que podem existir. Ademais, mostra as principais estratégias empíricas utilizadas para mensurar a eficiência de uma unidade produtiva. Por fim, faz uma breve revisão da literatura no intuito de mostrar as técnicas que têm sido utilizadas com maior frequência pelos pesquisadores nos últimos anos.

3.3.1 Eficiência: Definição e Tipos

A crescente competitividade tem impulsionado as firmas a melhorar seu desempenho. Várias técnicas de mensuração da eficiência têm sido aplicadas com o intuito de mostrar um resultado comparativo entre as distintas Unidades Tomadoras de Decisões (*Decision Making Units - DMUs*) de um mesmo segmento, possibilitando a aplicação de ações que visem corrigir possíveis falhas e aproximar todas as unidades de um patamar de produção ótimo.

A eficiência de uma unidade produtiva é definida de distintas maneiras na literatura. Conforme Lovell (1993), ela pode ser obtida por meio da comparação entre os valores observados e os valores ótimos de seus insumos e produtos. Essa comparação pode estar relacionada à maximização da produção, ou seja, observa-se qual é a produção máxima possível a partir do uso de determinados insumos. Alternativamente, relaciona-se a minimização dos insumos, ou seja, dado determinado nível de produção identifica qual é o mínimo de insumos necessários a serem utilizados.

Tupy e Yamaguchi (1998) e Lovel (1996) sugerem que a eficiência pode ser compreendida como um conceito relativo, que faz uma comparação entre a produção efetiva por unidade de

insumo com o que poderia ter sido produzido, considerando os mesmos insumos disponíveis. Os autores destacam ainda que essa comparação pode ser:

- Em relação ao produto obtido e o nível máximo possível, mantendo fixa a quantidade de insumos utilizada;
- Entre a quantidade de insumo utilizada e o mínimo necessário para produzir determinada quantidade de produto;
- Uma combinação dos itens anteriores.

Para Almeida, Mariano e Nascimento (2015), a eficiência de um sistema qualquer é definida pela razão entre um indicador de desempenho desse sistema e o maior valor que ele tem capacidade de atingir. Eficiência pode ser considerada como a capacidade de um sistema usar os recursos disponíveis e de aproveitar as condições ambientais da melhor maneira possível com o intuito de obter desempenho ótimo em alguma dimensão.

Não obstante, existirem definições genéricas para o termo, a eficiência pode ser decomposta em diferentes tipos, os quais podem ser analisados isoladamente. Os trabalhos de Koopmans (1951) e Debreu (1951) marcaram o início dos estudos dedicados à análise da eficiência. Koopmans (1951) definiu o que ficou conhecido como **eficiência técnica**. Para o autor, um vetor de insumos ou produtos será tecnicamente eficiente se, e somente se, o aumento de um produto ou a redução de um insumo seja possível apenas se houver a redução de algum outro produto, ou o aumento de algum outro insumo.

De maneira mais clara, diz-se que a eficiência técnica está relacionada com a capacidade de converter os insumos em produtos. Um produtor será tecnicamente eficiente se conseguir aumentar a produção sem desperdiçar insumos ou ainda se não existir uma forma alternativa de atingir o mesmo nível de produção usando uma quantidade menor de pelo menos um insumo. A **eficiência técnica** é afetada por problemas característicos de engenharia como, por exemplo, a falta de qualificação ou treinamento dos trabalhadores, problemas com maquinário ou com a qualidade do material usado.

Em 1951, Debreu disponibilizou a primeira medida radial de **eficiência técnica** em termos de um coeficiente de uso dos recursos. A eficiência foi definida pelo autor como a unidade menos a redução proporcional máxima do consumo observado de todos os insumos, de forma que a produção permaneça inalterada. Essa medida proposta por Debreu foi utilizada por Farrel

(1957) no desenvolvimento de um método de programação matemática não paramétrica para mensurar os índices de ineficiência em fazendas dos EUA.

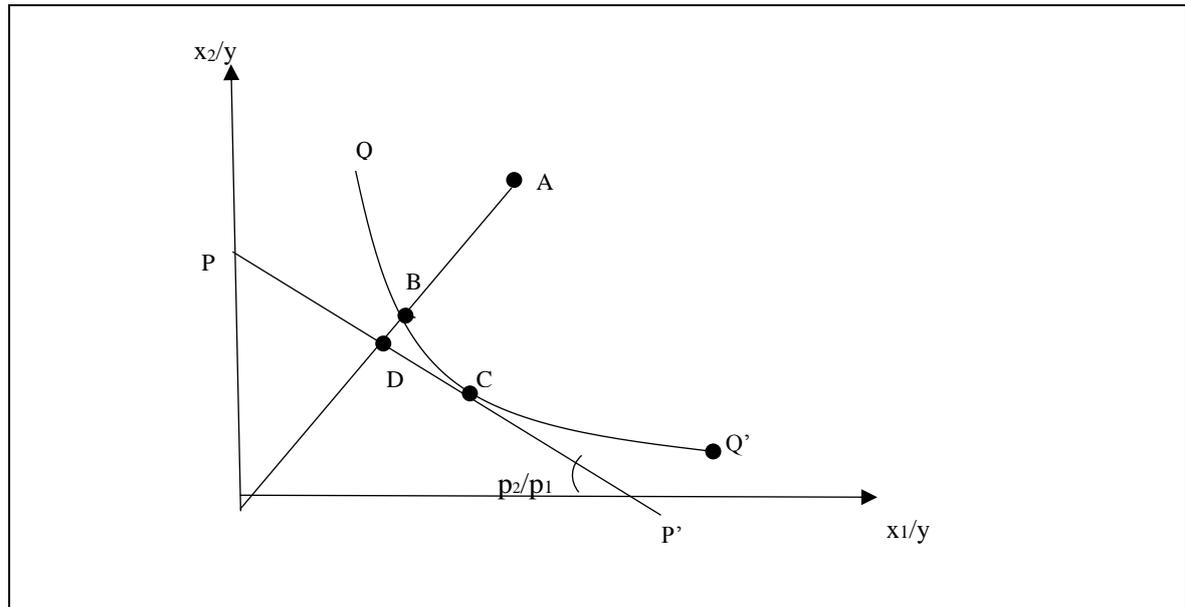
Farrell (1957) atentou-se para a necessidade de considerar o conceito de eficiência de Koopmans como uma noção relativa, ou seja, relacionada à melhor prática observada no conjunto de referência ou grupo de comparação, trazendo a possibilidade de diferenciar as unidades de produção eficientes das ineficientes. Farrel (1957) sugeriu que o indicador de eficiência de uma firma era composto por mais dois componentes, além da eficiência técnica destacada por Koopmans (1951), quais sejam: **eficiência alocativa e econômica**.

A **eficiência alocativa** está relacionada à capacidade de alocar os recursos econômicos no processo produtivo, ou seja, a **eficiência alocativa** mostra se um recurso está sendo utilizado economicamente de forma ótima. É a capacidade de escolher, considerando os preços dos fatores e a tecnologia de produção, os insumos e produtos numa proporção ótima (AZAMBUJA,2002).

A **eficiência produtiva** ou também conhecida como **eficiência econômica total** é considerada pelo autor como o produto da eficiência técnica e alocativa. Dessa forma, se uma empresa utiliza todos os seus recursos de maneira eficiente do ponto de vista técnico e alocativo é possível inferir que a mesma atingiu a eficiência econômica total. Em contrapartida, quando a empresa operar com ineficiência técnica e alocativa diz-se que ela opera com eficiência econômica menor do que a eficiência total possível (DARAIO; SIMAR, 2007).

A partir do trabalho de Farrel (1957) o conceito de função de fronteira foi desenvolvido. Levando em consideração esse conceito, os resultados de uma empresa podem ser comparados com o desempenho previsto das melhores empresas que estão sob as mesmas condições de mercado na indústria, ou seja, é possível mensurar o quão bem uma empresa executa suas atividades em relação ao desempenho previsto das empresas consideradas melhores. A função de fronteira mostra a capacidade que a administração tem de controlar os custos e utilizar os recursos de maneira mais adequada para produzir resultados (ZHENG,2015). A figura 2 mostra a distinção entre eficiência técnica e alocativa:

Figura 2 - Eficiência Técnica e Alocativa



Fonte: CANTO (2002), adaptado.

A figura 2 representa uma firma com uma função de produção de fronteira $y = f(x_1, x_2)$. Considerando x_2 em função de x_1 obtém-se a isoquanta unitária $1 = f(x_1/y, x_2/y)$, representada pela curva QQ' . A curva PP' é a curva de isocusto. A curva QQ' representa a isoquanta unitária da firma eficiente que avalia a eficiência das firmas A, B e C.

A firma representada pelo ponto C possui eficiência técnica e alocativa visto que a combinação $x_1/y, x_2/y$ representa a tangência da isoquanta com a isocusto e além disso, opera com o menor custo possível. A firma representada pelo ponto A opera com ineficiência técnica e alocativa, isso porque a combinação $x_1/y, x_2/y$ apresenta insumos em excesso para a produção unitária, logo possui um custo maior do que PP' . Por fim, a empresa representada pelo ponto B opera com eficiência técnica, porém possui ineficiência alocativa, pois sua combinação de $x_1/y, x_2/y$ apesar de estar sobre a fronteira de produção possui um custo superior a PP' .

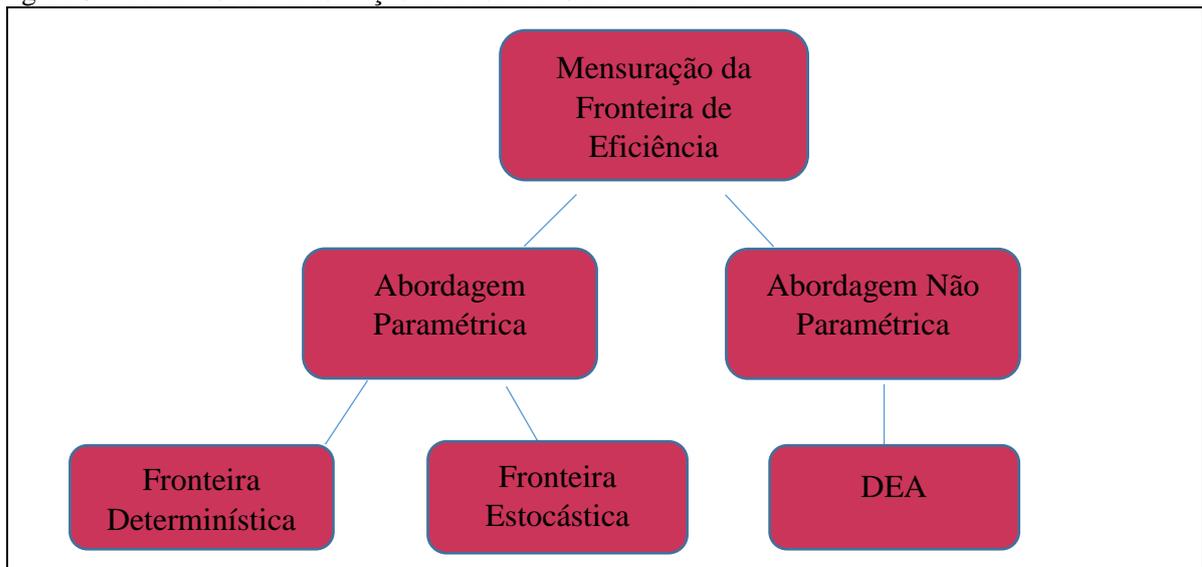
A razão OB/OA mostra a eficiência técnica e a proporção com que a função de produção da firma A atinge a função da empresa considerada de melhor prática na indústria, ou seja, mostra a razão entre a combinação de insumos que foi de fato utilizada e aquela que seria ideal para produção do produto. A razão OD/OB mostra a eficiência alocativa e indica a proporção com que a combinação de insumos usada se aproxima da combinação ideal, a de custo inferior. Finalmente, a eficiência econômica total é dada pelo produto entre eficiência técnica e alocativa, ou seja, $OB/OA * OD/OB$ (CANTO,2002).

O presente trabalho busca identificar a **eficiência técnica** dos projetos eólicos em operação comercial no Brasil desde 2015. O intuito é analisar se um projeto consegue elevar a geração de energia, mantendo a quantidade de insumos inalterada, ou ainda manter a geração inalterada, utilizando uma quantidade menor de insumos no processo produtivo.

3.3.2 Técnicas de mensuração da Eficiência

Estudos sobre eficiência podem ser realizados por metodologias que não formam fronteiras, como é o caso da análise de regressão simples e da abordagem de números índices. Entretanto, as funções fronteiras são consideradas base das estimativas de eficiência. O fluxograma apresentado na figura 3, adaptado de Sarafidis (2002), mostra de forma clara como as técnicas de fronteira para mensuração da eficiência estão divididas.

Figura 3 - Técnicas de Mensuração de Fronteiras de Eficiência



Fonte: Adaptado de Sarafidis (2002).

Como é possível visualizar na figura 3, as técnicas de mensuração de fronteiras de eficiência estão subdivididas em duas grandes categorias, quais sejam: técnicas de fronteira não paramétricas (programação linear) e técnicas de fronteira paramétricas (econométricas).

Nas técnicas de fronteira não paramétricas não há necessidade de se definir uma forma funcional *a priori*. A relação entre insumos e produtos é estimada sob premissas mínimas (CHARNES *et al.*, 1985). A eficiência é calculada a partir do desenvolvimento empírico de uma fronteira. De acordo com Casa Nova (2002), a fronteira de eficiência é o espaço geométrico

no qual as DMUS do conjunto consideradas eficientes estão alocadas. As unidades consideradas ineficientes se encontram abaixo dessa fronteira. A desvantagem dessas técnicas é que elas não admitem erros de medidas e choques aleatórios. Tais fatores são atribuídos integralmente à ineficiência, o que pode induzir a distorções nas estimativas (ZHENG,2015).

Alternativamente, as técnicas de fronteira paramétricas mensuram a eficiência por meio da construção de uma função de produção. De acordo com os fundamentos da microeconomia, essa função relaciona os insumos com a quantidade máxima de produtos que podem ser produzidos. Para Abel (2000), ela é a relação que mostra o quanto é possível obter de um ou mais produtos a partir de certa quantidade de insumos.

Para Azambuja (2002), uma função de produção é uma descrição da relação técnica que existe entre insumos e produtos em um processo produtivo, em determinado período de tempo. Essa função é capaz de definir a quantidade máxima de produto que resulta de uma determinada quantidade de insumos. De outra forma, é possível dizer que a função de produção é uma formulação matemática capaz de descrever a fronteira de eficiência.

Nas técnicas paramétricas de análise da eficiência considera-se a especificação da forma funcional do processo produtivo e admitem-se erros de medida e choques aleatórios. No entanto, o risco de impor suposições sobre a tecnologia de produção baseando-se em formas funcionais é uma desvantagem desse tipo de abordagem. As propriedades da distribuição da tecnologia de produção não são conhecidas e existem dificuldades para especificar a estrutura dos erros (EMROUZNEJAD *et al.*, 2008).

As técnicas de fronteira de análise de eficiência ainda podem ser divididas em: modelos determinísticos e modelos estocásticos. Segundo Zheng (2015), a abordagem não paramétrica determinística é baseada em fronteiras lineares, geralmente calculadas por técnicas de programação matemática. Os dados são envolvidos com bastante rigor e sujeitam-se a suposições com respeito a estrutura da tecnologia de produção. Já a abordagem paramétrica determinística considera que as DMUS compartilham uma fronteira de produção, custo ou lucro comum e as alterações no desempenho das unidades decisoras são integralmente atribuídas à distância que essas estão da referida fronteira.

Na abordagem paramétrica estocástica, considera-se a variação aleatória da fronteira entre as DMUS. Ademais, são capturados erros de medidas, outros ruídos estatísticos e choques aleatórios que estão fora do controle da firma (GREENE, 2008).

O quadro 1, adaptado do trabalho de Gilsa (2012), mostra algumas das principais técnicas de mensuração da eficiência utilizadas na literatura:

Quadro 1- Principais técnicas de fronteira e não fronteira de análise de eficiência

Técnica	Características	
Análise Envoltória de Dados (<i>DEA</i>)	Não Paramétrico	Fronteira
Índice de Laspeyres	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Paasche	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Fischer	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Törnqvist	Paramétrico	Não Fronteira
Índice de Malmquist	Paramétrico	Não Fronteira
Processo de Análise Hierárquica (<i>AHP</i>)	Não Paramétrico	Não Fronteira
Mínimos Quadrados Ordiniais (<i>OLS</i>)	Paramétrico	Não Fronteira
Mínimos Quadrados Ordiniais Corrigidos (<i>COLS</i>)	Paramétrico	Fronteira
Análise de Fronteira Estocástica (<i>SFA</i>)	Paramétrico	Fronteira
<i>Free Disposal Hull (FDH)</i>	Não Paramétrico	Fronteira
<i>Thick Frontier Approach (TFA)</i>	Paramétrico	Fronteira
<i>Distribution Free Approach (DFA)</i>	Paramétrico	Fronteira

Fonte: Adaptado de Gilsa (2012).

Como é possível perceber, várias são as técnicas que podem ser utilizadas para analisar a eficiência de unidades produtivas. Entretanto, de acordo com Daraio e Simar (2007), as abordagens utilizadas com maior frequência em trabalhos empíricos são: a abordagem não paramétrica determinística de fronteira, com destaque para a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis-DEA*) e a abordagem paramétrica de fronteira estocástica, com destaque para a Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Approach- SFA*).

O *DEA* é um modelo não paramétrico baseado em programação linear, que constrói fronteiras de produção e mensura a eficiência relativa às fronteiras construídas. O método não considera o ruído dos dados, supõe apenas a concavidade da função de produção. A vantagem dessa técnica é que ela não precisa de nenhuma restrição na forma funcional e também não exige suposição para a distribuição subjacente do termo de ineficiência. Em contrapartida, a técnica *SFA* é uma abordagem paramétrica que considera o ruído dos dados. Exige que a forma funcional da função de produção, custo ou lucro seja especificada e impõe suposições para a distribuição do termo de ineficiência (ÖZGEN, 2011).

A técnica *DEA* considera que a empresa tem controle sobre todos os desvios da fronteira de eficiência. Ademais, não permite a realização de testes para observar a significância estatística. Por outro lado, a técnica *SFA* consegue modelar os choques estocásticos com a ajuda do erro aleatório inserido na especificação da fronteira e ainda é possível realizar testes estatísticos em distintos modelos com especificações alternativas (ÖZGEN, 2011). O presente trabalho faz uso desta última, qual seja, *SFA*, para analisar a eficiência dos projetos eólicos brasileiros em operação comercial desde 2015. Levando em consideração que as técnicas de fronteira *DEA* e *SFA* são as mais utilizadas na mensuração da eficiência, a próxima subseção apresenta uma revisão da literatura voltada a análises feitas para o setor de energia considerando essas duas abordagens.

3.4 REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA

A literatura a respeito de estudos que analisam o desempenho das firmas é extensa. Especificamente, em termos de eficiência no setor de geração de energia elétrica e através do uso de análise de fronteiras, o volume de estudos tem crescido desde a década de 1980. O conceito de eficiência e as técnicas que incluem Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis - SFA*) e Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis- DEA*) são empregados com frequência. Suas variações dependem tanto da natureza, quanto da disponibilidade de dados. Conforme destaca Iglesias e outros (2010), o avanço nessas metodologias proporcionou o desenvolvimento de inúmeros trabalhos direcionados ao setor de energia. Eles incluem mudanças nas técnicas básicas, nas variáveis de insumo e produto incluídas, nos indicadores de contexto e aplicações em diferentes fases do setor.

Os primeiros trabalhos que utilizaram a técnica *SFA* no setor de geração de energia elétrica foram desenvolvidos por Schmidt e Lovell (1979,1980). Os autores utilizaram uma amostra de 150 plantas de energia elétrica a vapor de propriedade privada, construídas entre 1947 e 1965 nos EUA. Já na década de 2000, Domah e outros (2004) analisaram a eficiência técnica na geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis em pequenas economias insulares, usando conjuntamente as técnicas *DEA* e *SFA*. Utilizaram um painel de dados de 16 ilhas e 121 propriedades de investidores norte-americanos, em uma análise para os anos de 1994 a 2000. Os resultados indicaram para a existência de diferenças relevantes entre a estrutura de produção de energia das pequenas ilhas e das propriedades dos investidores, além disso, não há evidências que apontem as ilhas como menos eficientes.

Saleem (2007) fez uma análise da eficiência técnica de 21 usinas de geração de energia elétrica do Paquistão, usando dados em painel para o período 1998-2003. Utilizou tanto a técnica *SFA* como a *DEA*. Os resultados mostraram que a propriedade pública impacta de forma negativa sobre a eficiência técnica das empresas. Os autores sugerem que há necessidade de reformas, concorrência e regulamentação adequada no setor.

Iglesias e outros (2010) mensuraram a eficiência de um conjunto de 57 parques eólicos espanhóis durante o período 2001 a 2004 por meio das técnicas *SFA* e *DEA*. Os resultados obtidos permitiram identificar que a eficiência técnica é bastante elevada em todos os parques. Entretanto, os autores chamam a atenção para considerar os resultados com cautela visto o número limitado de parques eólicos e do período analisado.

See e Coelli (2012) utilizaram a metodologia *SFA* a fim de mensurar os níveis de eficiência técnica de usinas de energia térmica da Malásia e investigar o grau em que distintos fatores são capazes de afetar a eficiência dessas plantas. A amostra envolveu 86 observações para o período de 1998 a 2005. Os resultados empíricos apontam que a propriedade, o tamanho da planta e o tipo de combustível utilizado influenciam significativamente os níveis de eficiência técnica.

Outro trabalho recente é o de Marmolejo-Saucedo e outros (2015). Os autores estimaram a eficiência técnica usando um painel de dados de 21 termoelétricas do sistema de geração de energia Mexicano, para o período 2009 a 2013 por meio de *SFA*. Concluíram, de maneira geral, que cerca de 81% das unidades termoelétricas são tecnicamente eficientes na sua operação. Os autores destacaram também, que analisar a eficiência técnica é de grande relevância para controlar a operação das unidades termoelétricas e avaliar seu desempenho, a fim de identificar quais unidades necessitam de maior atenção para atingir a máxima eficiência no seu funcionamento.

Ueasin e outros (2015) analisaram a eficiência de 57 usinas de biomassa gerada a partir da casca de arroz na Tailândia no ano de 2012, por meio das técnicas *SFA* e *DEA*. Os autores destacaram que o desenvolvimento sustentável deve ser promovido em todas as fábricas de produção de energia do país. O proprietário deve esforçar-se para minimizar o custo de produção, se livrar dos insumos excedentes para aumentar a produção e maximizar o lucro líquido.

Hwangi, Voii e Finance (2016) analisaram a eficiência técnica de dez firmas geradoras de energia elétrica japonesas, durante o período de 1996 a 2007 por meio da técnica *SFA*. Os resultados obtidos apontaram que a geração de energia nuclear e hidrelétrica têm maiores níveis de eficiência técnica quando comparada com outros tipos de geração de energia. Além disso, os autores puderam concluir que não há economias de escala na geração de eletricidade japonesa, nesse sentido, apontam a relevância de uma política de separação entre a geração e os demais segmentos do setor de eletricidade.

Para o segmento de geração de eletricidade do Brasil é possível destacar o trabalho de Machado (2014), que utilizou um painel com 21 firmas geradoras de eletricidade brasileiras em uma análise feita para o período de 2001 a 2010 por meio das técnicas *SFA* e *DEA*. Os resultados obtidos com a aplicação da técnica *SFA*, indicam que os desvios da função de custo das firmas são perdas sistemáticas e significativas de eficiência. Além disso, destaca que as reduções de custos identificadas no período são resultado do progresso técnico e não da melhoria na eficiência. Os resultados obtidos a partir da técnica *DEA* mostram que existem ineficiências de magnitude considerável no mercado de geração de eletricidade brasileiro que tendem a desviar as geradoras da fronteira de eficiência.

Após essa revisão da literatura foi possível perceber que apenas um dos trabalhos citados foi voltado para o Brasil, o que demonstra a carência de estudos direcionados ao país. O presente capítulo inova ao analisar o segmento de geração de energia eólica brasileiro, visto que a maioria dos trabalhos encontrados na literatura se concentra na análise de fontes hidráulicas e de combustíveis fósseis. Estudos voltados para as fontes renováveis não convencionais, principalmente as que apresentam boas expectativas de crescimento, como é o caso da fonte eólica, tornam-se relevantes em razão da necessidade de mudanças na matriz energética mundial a fim de reduzir impactos ambientais, reduzir custos, elevar a eficiência e produtividade e garantir o desenvolvimento sustentável.

3.5 METODOLOGIA

A eficiência técnica dos projetos de energia eólica foi analisada por meio de dois estágios. No primeiro estágio, a técnica Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis – SFA*) foi aplicada em um painel de dados a fim de gerar os escores de eficiência de cada um dos projetos. Já no segundo estágio, o método *TOBIT* foi empregado no intuito de verificar

quais variáveis estão associadas à eficiência e à ineficiência dos projetos eólicos analisados. Esta subseção fundamenta-se essencialmente nas descrições metodológicas realizadas por Zhang (2012), Almeida (2017) e Kumbhakar e outros (2015). Nas subseções que se seguem, são descritas as variáveis utilizadas e a metodologia econométrica adotada.

3.5.1 Descrição das variáveis

Um painel de dados referente aos anos de 2015, 2016 e 2017 foi utilizado para analisar a eficiência de 66 projetos eólicos brasileiros (ver APÊNDICE F) com participação do setor privado, os quais são compostos por 256 parques. Os dados para cada parque eólico que compõe o projeto foram obtidos através dos relatórios de Informações ao Mercado da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2019); do Boletim Mensal de Geração Eólica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018); e dos documentos e processos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018a).

A metodologia utilizada na obtenção dos índices de eficiência técnica foi a Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Approach- SFA*) que consistiu na estimativa de uma função fronteira de produção. Tal função incluiu os fatores de produção capital e combustível. A variável trabalho estava prevista no modelo. Todavia, essa variável não pôde ser representada devido a indisponibilidade de dados⁸.

A variável dependente e as variáveis explicativas utilizadas na estimativa da fronteira de produção, são apresentadas a seguir, respectivamente:

- Geração eólica (**GERACAO**) – É a geração de energia eólica média anual do projeto que é dada pela soma da geração média anual dos parques que compõem o mesmo. Seus valores são expressos em MW médios.
- Potência instalada (**POTINST**): A potência instalada representa o insumo capital na função de produção e está associada à capacidade em MW dos parques que é obtida como o produto entre o número de turbinas eólicas e a potência nominal de cada turbina. A potência instalada de cada projeto é obtida pela soma da potência instalada dos

⁸ Conforme contato direto com as empresas responsáveis pelos projetos abordados nesse trabalho, a mão de obra no segmento de geração eólica é, em sua maioria, terceirizada, logo não há um número fixo de trabalhadores em cada parque eólico. Esse número pode variar de acordo com a necessidade de manutenção dos parques ou com a ocorrência de algum imprevisto na operação dos aerogeradores, por exemplo.

parques que compõe o projeto. Essa variável é positivamente relacionada com a geração de energia eólica, ou seja, quanto maior for a capacidade em MW dos projetos, mais energia poderá ser gerada.

- Fator de Capacidade (**FATORCAP**): Representa o insumo combustível na função fronteira de produção. O combustível que alimenta as instalações dos parques eólicos depende do vento e é dado de forma exógena pela natureza. Dessa forma, o fator de capacidade foi utilizado para representá-lo. Este avalia o potencial eólico e pode ser interpretado como o percentual de aproveitamento do total da potência máxima instalada. O fator de capacidade está positivamente relacionado com a geração de energia, ou seja, quanto maior o percentual de aproveitamento do total da potência máxima instalada mais energia pode ser gerada.

$$\mathbf{FATORCAP} = \frac{E_{elétrica}}{P_{nominal} \cdot T}$$

Onde:

Eelétrica – é a energia gerada durante um ano;

Pnominal - corresponde à potência nominal do aerogerador (watts);

T - Período de análise em horas (8760 horas em um ano).

A técnica *SFA* apresenta os escores de eficiência de cada DMU. Entretanto, não identifica a participação individual das variáveis no índice de eficiência técnica. A leitura da ineficiência deve manter a proporcionalidade para todas as variáveis explicativas, conforme o valor obtido. As variáveis explicativas utilizadas na estimativa da função fronteira de produção referem-se aos insumos de produção. Após a estimativa da função fronteira de produção e, posterior obtenção dos índices, procedeu-se à investigação sobre os fatores que podem afetar a eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica. Tal investigação foi realizada por meio da modelagem *TOBIT*. O intuito deste procedimento é tentar explicar os níveis de eficiência dos projetos eólicos, obtidos no primeiro estágio.

No modelo *TOBIT* os escores de eficiência obtidos pela técnica *SFA* foram regredidos em função de outras três variáveis, quais sejam:

- Idade do projeto eólico (**IDADE**) – é a idade de cada parque definida como o último dia do ano em análise, menos o dia de início das operações comerciais. Posteriormente, para

obter um valor em anos, a quantidade de dias foi dividida por 365. Todavia, a DMU deste trabalho é dada por cada projeto eólico que contém um número de parques com diferentes idades. Sendo assim, a idade média dos parques eólicos que compõem cada projeto foi usada para representar a idade do mesmo. Acredita-se que a idade dos projetos tenha certo poder explicativo sobre a eficiência dos projetos eólicos. Ademais, espera-se que exista uma relação inversa, ou seja, quanto mais antigo o projeto, menos eficiente ele será. A literatura tem ilustrado essa relação decrescente. De acordo com Wu e outros (2016), parques eólicos mais antigos tendem a ser menos eficientes do que os mais novos, isso porque a velocidade com que os equipamentos se tornam obsoletos é maior do que outros ganhos possíveis de serem obtidos com o aprendizado da operação dos parques;

- **Altura das torres eólicas (ALTURA)** - é a altura das torres de um projeto dada em metros e corresponde à média da altura das torres dos parques eólicos que compõem o referido projeto. Existe uma relação positiva entre a altura das torres e o escore de eficiência, ou seja, quanto mais alta for a torre, mais eficiente tende a ser o projeto. A explicação é bastante intuitiva. Quando a altura das torres é elevada, as máquinas conseguem captar ventos mais constantes e com maiores velocidades médias, além de haver menos turbulência, resultando em maior geração de energia. Ademais, com torres mais altas, áreas antes consideradas inadequadas para a geração de energia passaram a ter as condições mínimas exigidas para o desenvolvimento da atividade e;
- **Número de Aero geradores (AERO)** - corresponde ao somatório dos aero geradores de cada parque eólico que compõe o projeto. Espera-se uma relação positiva entre o número de aero geradores e a eficiência do projeto eólico, pois quanto mais aero geradores existir em cada parque, mais vento poderá ser captado e transformado em energia.

Além dessas três variáveis, foram inseridas variáveis *dummies* para os Estados onde os parques eólicos estão localizados. As variáveis *dummies* estaduais foram incluídas a fim de controlar características distintas não observáveis dos locais de implementação dos parques, tais como a infraestrutura do estado, a legislação diferenciada que pode complicar o processo produtivo e a qualidade da mão de obra, por exemplo.

3.5.2 Metodologia econométrica

A literatura tem apontado que em períodos de tempo relativamente curtos, como é o caso do painel de dados utilizado nesse trabalho, é pouco provável que a ineficiência técnica sofra grandes oscilações. Nesse sentido, é oportuno adotar a suposição de invariância no tempo. Ademais, quando tal suposição é levada em consideração a ineficiência técnica pode ser estimada de forma consistente sem que sejam necessárias suposições quanto ao tipo de distribuição. Diante desse contexto, o uso do modelo proposto por Schmidt e Sickles (1984) é indicado para o cálculo da eficiência. Esta subseção tem como objetivo descrever a metodologia econométrica utilizada no presente capítulo.

3.5.2.1 Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis - SFA*)

Os trabalhos de Aigner (1977) e Meeusen e Van den Broeck (1977) representam uma significativa evolução nas análises de eficiência, pois a partir desses os impactos dos choques aleatórios que não estão sob controle do produtor passaram a ser considerados. O termo de erro é composto por duas parcelas, quais sejam: i) uma parcela que capta as variações aleatórias da produção, tendo distribuição aleatória simétrica com média zero; ii) outra parcela que capta a ineficiência técnica. Representa-se o modelo estocástico da seguinte maneira:

$$Y_i = f(x_i, \beta) e^{(v_i - u_i)} \quad 7$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Onde: Y_i é o nível de produção da i -ésima firma

x_i é o vetor de insumos da i -ésima firma;

β é um vetor de parâmetros a ser estimado.

v^i é o termo de erro aleatório com média zero e representa os choques exógenos;

u_i é uma variável aleatória não negativa que tem relação com os fatores que causam a ineficiência técnica da i -ésima firma.

Por meio da divisão entre a produção observada e a produção que corresponde à fronteira de produção, obtém-se a medida de eficiência técnica na fronteira estocástica:

$$ET_i = \frac{Y_i}{Y_i^*} = \frac{f(x_i; \beta) e^{(v_i - u_i)}}{f(x_i; \beta) e^{v_i}} = e^{-u_i} \quad 8$$

Onde: v_i é simétrico ($-\infty < x < \infty$), i.i.d. e com distribuição normal [$v \sim N(0, \sigma_v^2)$].

O termo v_i é capaz de capturar os efeitos estocásticos que estão fora do controle da firma. Enquanto o termo de erro u_i tem condições de mensurar a insuficiência no produto a partir de seu máximo valor dado pela fronteira estocástica $f(x_i; \beta)e^{v_i}$.

A fronteira estocástica exige uma forma funcional para a tecnologia de produção e para a distribuição de probabilidade do resíduo. Geralmente, as distribuições de probabilidade do termo de erro associado à ineficiência técnica mais usuais são a normal truncada e meio-normal e as formas funcionais mais usuais são a Cobb-Douglas e a Translog.

A determinação da eficiência técnica das firmas individuais sob o modelo estocástico foi realizada a partir do trabalho de Jondrow e outros (1982), apesar da fronteira estocástica ter sido desenvolvida teoricamente antes. Os autores tentaram isolar os dois componentes do erro (u_i e v_i). O foco do estudo foi na distribuição condicional do termo de erro não negativo u_i , dado o resíduo aleatório $\varepsilon_i \equiv v_i - u_i$. A ideia era de que u_i fosse previsto pelo seu valor médio condicional, dado o valor observável de ε_i . Esse é o resíduo da fronteira e a partir dele o termo de erro associado à ineficiência técnica, u_i , é obtido. Os valores de u_i ficam situados entre 0 e 1, sendo que 1 significa que a firma atua com eficiência técnica máxima.

Algumas limitações encontradas em análise com dados *cross-section* podem ser contornadas quando cada unidade pode ser observada em distintos pontos do tempo, ou seja, quando dados em painel são utilizados. Técnicas capazes de avaliar a mudança na eficiência através de fronteiras estocásticas utilizando dados em painel foram desenvolvidas inicialmente por Pitt e Lee (1981), Schmidt e Sickles (1984), Cornwell e outros (1990), Kumbhakar (1990) e Battese (1992). Tais técnicas difundiram-se e passaram a ser utilizadas amplamente em distintas áreas, como saúde, educação e indústria.

Há um consenso na literatura de que o uso do método de dados em painel na estimação de fronteiras estocásticas pode ser considerado mais razoável do que o uso do método *cross-section*. Pitt e Lee (1981) e Schmidt e Sickles (1984) descrevem três principais motivos pelos quais o uso de dados em painel é superior ao uso de dados *cross-section*, quais sejam:

- Em dados em painel não há necessidade de se fazerem suposições tão fortes. Em análise com dados *cross-section*, especialmente quando o método de Máxima Verossimilhança é usado, suposições quanto à distribuição dos componentes de erro são fundamentais para separar a ineficiência técnica do ruído estatístico. Ademais, o método de Máxima Verossimilhança requer que a ineficiência técnica não dependa dos regressores.
- Com o uso de dados em painel a consistência nas estimações da ineficiência técnica de cada unidade pode ser obtida. Já quando dados *cross-section* são utilizados, não obstante ser possível estimar a ineficiência de cada unidade isoladamente, não é possível obter consistência nas estimações;
- Uma maior quantidade de informações quanto ao comportamento de cada unidade ao longo do tempo é obtida quando se utiliza dados em painel. Com o uso de dados *cross-section* algumas informações podem deixar de ser analisadas, como por exemplo, a questão da variabilidade ou invariabilidade temporal, mudanças estruturais, efeitos fixos ou aleatórios.

O componente de ineficiência em um processo gerador de dados em painel é considerado correlacionado ao longo do tempo. Por conseguinte, modela-se a eficiência como:

- Invariante no Tempo - a ineficiência técnica representada por u_i é constante, nenhuma mudança técnica é considerada ao longo do tempo. Essa abordagem é expressa por:

$$u_{i1} = u_{i2} = \dots = u_{iT} = u_i \quad 9$$

- Variante no Tempo - a ineficiência técnica representada por u_i sofre alterações ao longo do tempo. Essa abordagem é expressa por:

$$u_{i1} = u_i f(1), \dots, u_{iT} = u_i f(T) \quad \text{isto é: } u_{it} = u_i f(t) \quad 10$$

Considerando o pressuposto referente à relação entre ineficiência técnica e cada produtor, os dados em painel ainda podem ser classificados como:

- Modelo de Efeitos Fixos – Nesse modelo a ineficiência técnica de cada produtor, individualmente, independe do tempo. Existe consistência nas estimativas, contudo, os efeitos fixos, u_i , capturam não apenas a eficiência técnica, mas os fenômenos que apesar de não variarem ao longo do tempo para cada produtor sofrem variações entre os produtores.

- Modelo de Efeitos Aleatórios – Esse modelo pressupõe que a eficiência técnica possua uma distribuição aleatória, com média e variância constantes e não correlacionadas com o ruídos estatísticos e com os regressores.

Para definir qual modelo de dados em painel seria mais adequado foi realizado o teste de Hausman (1978). Testa-se a hipótese nula de que os efeitos individuais não são correlacionados com as variáveis independentes. De acordo com este teste, rejeitou-se a hipótese nula de que o modelo de efeitos aleatórios é preferível a um nível de significância de 1%. Dessa forma, o modelo mais apropriado é o modelo de efeitos fixos.

O presente trabalho assumiu que a ineficiência é específica do indivíduo e invariante no tempo. Nesse caso, a ineficiência é mensurada tendo como base os efeitos individuais não observáveis do modelo de dados em painel. O modelo pode ser escrito como:

$$y_{it} = f(x_{it}; \beta) + \varepsilon_{it} \quad 11$$

$$\varepsilon_{it} = v_{it} - u_i, \quad u_i \geq 0, i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T$$

Onde $f(x_{it}; \beta)$ é uma função linear das variáveis no vetor x_{it} , e $u_i \geq 0$ é a ineficiência técnica invariante no tempo do indivíduo i . Esse modelo usa características de dados em painel via u_i , que é específico para um indivíduo e não varia com o tempo. O modelo pode ser estimado assumindo u_i como um parâmetro fixo, ou seja, modelo de efeitos fixos, ou como uma variável aleatória, modelo de efeitos aleatórios. Essas abordagens são chamadas de livre distribuição visto que não exigem suposições distributivas sobre u_i .

Tanto os modelos de efeitos fixos como de efeitos aleatórios, livres de distribuição e com ineficiência invariante no tempo são discutidos em detalhe por Schmidt e Sickles (1984). Esta subseção restringe-se a descrever o modelo de efeitos fixos proposto pelos autores, visto que o este foi utilizado no presente estudo.

O modelo de efeitos fixos é adequado quando uma população específica é analisada e a inferência é aplicada apenas a essa população, por exemplo, estados de um país, municípios de um estado ou firmas de um determinado setor, como foi o caso deste trabalho que analisa os projetos de geração de energia eólica brasileiros em operação comercial.

A estimação de modelos de fronteira estocástica, considerando o termo de ineficiência invariante no tempo pode ser efetuada por meio de adaptações de técnicas usuais de estimação de efeitos fixos, permitindo assim que exista correlação entre a ineficiência e os regressores das fronteiras. Além disso, esses modelos permitem que pressupostos com relação a distribuição de u_i sejam evitados. O modelo de efeitos fixos desenvolvido por Schmidt e Sickles (1984) pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} y_{it} &= \beta_0 + x'_{it}\beta + v_{it} - u_i & 12 \\ y_{it} &= (\beta_0 - u_i) + x'_{it}\beta + v_{it} \end{aligned}$$

$$y_{it} = \alpha_i + x'_{it}\beta + v_{it} \quad 13$$

Onde $\alpha_i \equiv \beta_0 - u_i$.

Nesse modelo assume-se que u_i e assim α_i , $i = 1, \dots, N$, são parâmetros fixos que devem ser estimados concomitante ao vetor de parâmetros β .

Os autores destacam que o método convencional de estimação para dados em painel pode ser utilizado para estimar o modelo em que α_i são considerados como efeitos individuais fixos e não observados. Apesar do fato de que as estimativas de β produzidas por métodos de painel padrões serem consideradas consistentes, α_i é um estimador enviesado de u_i visto que $u_i > 0$ por presunção. Contudo, após a obtenção de $\hat{\alpha}_i$ uma simples transformação pode ser aplicada para recuperar $\hat{u}_i \geq 0$, o que é consistente como $T \rightarrow \infty$. O fato de permitir que u_i seja correlacionado com x_{it} de forma livre é uma implicação relevante da suposição de que u_i é fixo.

O modelo proposto por Schmidt e Sickles (1984) pode ser estimado via Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) após a inclusão de variáveis *dummies* individuais como regressores para α_i . O número de *dummies* a ser incluído é o número de produtores que compõem o painel de dados. Contudo, quando o número de produtores for elevado podem surgir problemas na estimativa, visto que haverá necessidade de realizar a inversão de uma matriz $(N + K) \times (N + K)$, onde N é o número de produtores e K é o número de regressores.

Para contornar tal dificuldade é possível realizar a transformação do modelo antes da estimação para que seja possível eliminar α_i . A transformação pode ser realizada por meio do uso de uma

transformação interna (*within*), por exemplo. A transformação interna subtrai as médias dos dados de cada unidade *cross-section*, isto é, substituindo y_{it} por $y_{it} - \bar{y}_i$ e x_{it} por $x_{it} - \bar{x}_i$, onde $\bar{y}_i = \left(\frac{1}{T}\right) \sum_t y_{it}$ assim eliminando α_i . Dessa forma, o modelo resultante pode ser estimado por MQO. Os valores de $\hat{\alpha}_i$ são recuperados da média dos resíduos para cada unidade *cross-section*. As estimativas de β para T ou $N \rightarrow \infty$ são consideradas consistentes nos modelos transformados. Contudo, a consistência de $\hat{\alpha}_i$ requer $T \rightarrow \infty$.

Estando $\hat{\alpha}_i$ disponível, a transformação utilizada para obtenção do valor estimado de \hat{u}_i é:

$$\hat{u}_i = \max_i\{\hat{\alpha}_i\} - \hat{\alpha}_i \geq, \quad i = 1, \dots, N \quad 14$$

Isso implica que a unidade mais eficiente da amostra é 100% eficiente, ou seja, no modelo de efeitos fixos a ineficiência estimada se refere a melhor unidade da amostra. A eficiência específica de uma firma pode ser obtida por:

$$\widehat{TE}_i = \exp(-\hat{u}_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad 15$$

3.5.2.2 Modelo *TOBIT*

Conforme Greene (2000) em equações onde a variável dependente se concentra em faixas de valores, ou seja, pontos iguais a um valor limite sugere-se o uso do modelo de regressão *TOBIT*. Esse modelo é capaz de contornar o problema da censura nos dados por meio de técnicas estatísticas que sejam capazes de realizar inferências para a população como um todo sem que a qualidade dos resultados seja afetada. Desenvolvido em 1958 pelo economista James Tobin, o modelo *TOBIT* pode ser representado por:

$$y^* = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + u_i, \quad u_i | x \sim \text{Normal}(0, \sigma^2) \quad 16$$

A variável latente y^* substitui o y do modelo de regressão linear, satisfazendo as suposições do modelo linear clássico apresentando distribuição homoscedástica normal com média condicional linear. Todavia, seus valores observados possuem a seguinte restrição:

$$y = \max(0, y^*) \quad 17$$

A equação 16 mostra que a variável observada y é igual a y^* quando $y^* \geq 0$, mas $y=0$ quando $y^* < 0$. Como y^* tem distribuição normal, y tem distribuição contínua sobre valores estritamente positivos. A densidade de y dado x é a mesma que a densidade de y^* dado x para valores positivos. Então, $P(y = 0|x) = P(y^* < 0|x) = P(u < -x\beta)$
 $= p\left(\frac{u}{\sigma} \leq \frac{x\beta}{\sigma}\right) = \phi\left(-\frac{x\beta}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)$

u/σ possui distribuição normal padrão e é independente de x . Se (x_i, y_i) for um sorteio aleatório da população, a densidade de y_i dado x_i é:

$$(2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp[-(y - x_i\beta)^2 / (2\sigma^2)] = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \phi\left[\frac{y - x_i\beta}{\sigma}\right], y > 0 \quad 18$$

$$P(y_i = 0|x_i) = 1 - \Phi\left(\frac{x_i\beta}{\sigma}\right) \quad 19$$

Onde ϕ é a função de densidade normal padrão.

A partir das equações 18 e 19 é possível construir a função log-verossimilhança para uma estimativa do modelo *TOBIT*, tal como:

$$l_i(\beta, \sigma) = \{I(y_i = 0) \log 1 - \Phi\left(\frac{x_i\beta}{\sigma}\right)\} + \{I(y_i > 0) \log\left\{\left(\frac{1}{\sigma}\right) \phi\left[\frac{y_i - x_i\beta}{\sigma}\right]\right\}\} \quad 20$$

Os estimadores são obtidos via estimativa de Máxima Verossimilhança. Eles são semelhantes aos estimadores MQO. Todavia, não é adequado interpretar as estimativas do modelo *TOBIT* como efeitos parciais derivados de estimação com modelos lineares.

É possível estimar $P(Y = 0|X)$ a partir da equação 20 e isso permite que $P(y > 0|x)$ seja estimado. Existem duas esperanças de interesse nos modelos *TOBIT*: A primeira que pode ser chamada de “esperança condicional”, $E(y|y > 0, x)$, pois é condicional em $y > 0$ e a segunda que pode ser chamada de “esperança incondicional”, $E(y|x)$. Contudo, vale dizer que ambas as esperanças são condicionadas às variáveis explicativas. A primeira mostra para certos valores de x , o valor esperado de y para a subpopulação onde y é positivo. A partir da primeira esperança a segunda pode ser encontrada facilmente:

$$E(y|x) = P(y > 0|x) \cdot E(y|y > 0, x) = \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \cdot E(y|y > 0, x) \quad 21$$

A “esperança condicional” pode ser obtida usando um resultado para variáveis aleatórias com distribuição normal: se $z \sim Normal(0,1)$ então $E(z|z > c) = \phi(c)/[1 - \Phi(c)]$ para qualquer constante c . Mas $E(y|y > 0, x) = x\beta + E(u|u > -x\beta) = x\beta + \sigma E\left[\left(\frac{u}{\sigma}\right) \mid \left(\frac{u}{\sigma}\right) > -\frac{x\beta}{\sigma}\right] = x\beta + \sigma\phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)/\Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)$, porque $\phi(-c) = \phi(c)$, $1 - \Phi(-c) = \Phi(c)$, e u/σ tem uma distribuição normal padrão independente de x . Isso pode ser resumido como:

$$E(y|y > 0, x) = x\beta + \sigma\lambda\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \quad 22$$

Onde $\lambda(c) = \phi(c)/\Phi(c)$ é conhecido como razão inversa de Mills. É a razão entre a função densidade de probabilidade (FDP) e a Função de distribuição cumulativa (FDC), cada uma avaliada em c .

A equação 22 mostra que o valor esperado de y condicional em $y > 0$ é igual a $x\beta$ mais um termo positivo que é σ multiplicado pela razão inversa de Mills avaliada em $x\beta/\sigma$. Ademais, mostra que β nem sempre é consistentemente estimado quando usa-se MQO apenas para observações onde $y_i > 0$. A razão inversa de Mills é uma variável omitida e geralmente correlacionada com os elementos de x .

A combinação das equações 21 e 22 resulta em:

$$E(y|x) = \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)\left[x\beta + \sigma\lambda\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)\right] = \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)x\beta + \sigma\phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \quad 23$$

Onde a segunda igualdade ocorre pois $\Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)\lambda\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) = \phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)$. Para esta equação é possível perceber que quando y segue um modelo *TOBIT*, $E(y|x)$ é uma função não linear de x e β , fato que dificulta a obtenção de efeitos parciais.

Os efeitos parciais, caso x_j seja uma variável contínua, podem ser obtidos por meio de cálculos. Primeiramente,

$$\frac{\partial E(y|y > 0, x)}{\partial x_j} = \beta_j + \beta_j \cdot d\lambda/dc\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \quad 24$$

Pressupondo que x_j não é relacionado com outros regressores. Diferenciando $\lambda(c) = \phi(c)/\Phi(c)$ e usando $\frac{d\Phi}{dc} = \phi(c)$ e $\frac{d\phi}{dc} = -c\phi(c)$, isso mostra que $\frac{d\lambda}{dc} = -\lambda(c)[c + \lambda(c)]$. Portanto,

$$\frac{\partial E(y|y > 0, x)}{\partial x_j} = \beta_j \left\{ 1 - \lambda\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \left[\frac{x\beta}{\sigma} + \lambda\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \right] \right\} \quad 25$$

Dessa forma, percebe-se que não é somente β_j que determina o efeito parcial de x_j em $E(y|y > 0, x)$. O termo entre chaves mostra o fator de ajuste que depende de uma função linear de x , $\frac{x\beta}{\sigma} = (\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)/\sigma$. Isso mostra que o fator de ajuste está entre 0 e 1. Conectando os estimadores de máxima verossimilhança do β_j e do σ é possível estimar a equação 26. A elasticidade de y em relação a x_1 , condicional em $y > 0$ é dada por:

$$\frac{\partial E(y|y > 0, x)}{\partial x_1} \cdot x_1 / E(y|y > 0, x) \quad 26$$

Caso x_1 seja uma variável binária, o efeito de interesse é obtido como a diferença entre $E(y|y > 0, x)$, com $x_1 = 1$ e $x_1 = 0$.

A equação 25 pode ser utilizada para encontrar a derivada parcial de $E(y|x)$ em relação ao x_j contínuo:

$$\frac{\partial E(y|x)}{\partial x_j} = \frac{\partial P(Y > 0|x)}{\partial x_j} \cdot E(y|y > 0, x) + P(y > 0|x) \cdot \frac{\partial E(y|y > 0, x)}{\partial x_j} \quad 27$$

Como $P(y > 0|x) = \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right)$,

$$\frac{\partial P(y > 0|x)}{\partial x_j} = \left(\frac{\beta_j}{\sigma}\right) \phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \quad 28$$

Dessa forma cada termo de 27 pode ser estimado uma vez que se utiliza os estimadores de máxima verossimilhança do β_j e do σ e valores particulares do x_j . A ligação das equações 25 e 28 em 27 e considerando o fato de que $\Phi(c)\lambda(c) = \phi(c)$ para qualquer c , obtém-se:

$$\frac{\partial E(y|x)}{\partial x_j} = \beta_j \Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) \quad 29$$

Essa equação permite comparar aproximadamente as estimativas MQO e *TOBIT*.

Os coeficientes MQO são estimativas direta de $\partial E(y|x)/\partial x_j$. Para que as estimativas *TOBIT* se tornem de fato comparáveis é preciso multiplica-las pelo fator de ajuste nos valores médios de x_j , $\Phi\left(\frac{\bar{x}\hat{\beta}}{\hat{\sigma}}\right)$. Desde que $\Phi\left(\frac{x\beta}{\sigma}\right) = P(y > 0|x)$, a equação 28 mostra que o fator de ajuste se aproxima de 1, assim como $P(y > 0|x)$ se aproxima de 1.

3.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estimações foram realizadas por meio do modelo proposto por Schmidt e Sickles (1984). Tal modelo sugere que a ineficiência é um parâmetro fixo e invariante no tempo. De acordo com os autores, é pouco provável que a ineficiência técnica sofra grandes oscilações em períodos de tempo relativamente curtos. Sendo assim, tendo em vista a amostra utilizada no presente estudo, a suposição de invariância no tempo parece ser oportuna.

Ao considerar a hipótese de efeitos fixos, o modelo conta com a vantagem de poder ser estimado em uma estrutura padrão de regressão. Não há necessidade de se fazer suposições sobre a distribuição da ineficiência técnica invariante no tempo do indivíduo i , (u_i), de maneira que tal abordagem é considerada de livre distribuição.

3.6.1 Resultados Análise de Fronteira Estocástica

A função de produção estimada nesse estudo é do tipo Cobb-Douglas e pode ser expressa como:

$$\ln geracao = \beta_0 + \beta_1 \ln potinst + \beta_2 \ln fatorcap + \beta_3 \ln ano + \varepsilon$$

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos da regressão. É possível perceber que os coeficientes que representam a potência instalada e o fator de capacidade de cada projeto são estatisticamente significativos a 1% e, além disso, possuem uma relação positiva com o coeficiente da variável geração eólica. O coeficiente da variável que representa o ano também foi positivo, porém não foi significativo nem mesmo a 10%, portanto a variável ano não afetou estatisticamente a variável de produção de energia, ou seja, não há efeito decorrente do ano na geração de energia. O valor da correlação interclasse, *rho*, sugere que 87,2% da variância total deve-se aos efeitos fixos.

Tabela 3 - Resultados da regressão da função fronteira de produção utilizando o modelo proposto por Schmidt e Sickles (1984).

Regressão Efeitos Fixos (within)						
LNGERACAO	Coef.	Desv. Pad.	t	P> t	Intervalo de Conf. 95%	
LNPOINST	0,902	0,016	55,92	0,000	0,870	0,934
LNFACTORCAP	1,018	0,007	135,58	0,000	1,004	1,034
ANO	0,022	0,003	0,78	0,435	-0,003	0,008
_cons	-8,769	5,730	-1,53	0,128	-20,107	2,567
sigma_u	0,082	R2 : Within	0,9934	Estat. F	2,53	
sigma_e	0,031	Between	0,9986	Prob. Estat. F	0,000	
rho	0,872	Overall	0,9975	Nº Obs.	198	

Fonte: dados da pesquisa.

Foi realizado o teste de Wald na averiguação dos retornos à escala da geração de energia eólica. A um nível de 1% de significância rejeita-se a hipótese nula de que o somatório dos parâmetros é igual a 1. O modelo apresenta retornos crescentes à escala, ou seja, ao aumentar o uso dos insumos em uma determinada proporção, o aumento na geração de energia eólica será mais que proporcional à elevação dos insumos.

Obtidas as estimativas apresentadas na Tabela 3, as previsões de eficiência técnica de cada um dos 66 projetos eólicos foram apresentadas no APÊNDICE G, embora os principais resultados sejam discutidos no texto. Os índices de eficiência técnica dos projetos eólicos variaram entre 64% e 100%, com um valor médio de 84% e um desvio padrão de 7%. A distribuição de frequência dos índices de eficiência técnica dos projetos eólicos pode ser vista na tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição de frequência dos níveis de eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica.

Eficiência técnica (%)	f_i	$f_{ri}(\%)$	$F_{ri}(\%)$
64 + 70	2	0,03	0,03
70 + 80	16	0,24	0,27
80 + 90	35	0,53	0,80
90 + 100	12	0,18	0,98
100	1	0,02	1
Total	66	1	-

Fonte: dados da pesquisa.

As pontuações de eficiência técnica obtidas indicam um nível de eficiência relativamente elevado. Contudo, é possível dizer que os projetos eólicos poderiam ter gerado em média 16% a mais de energia do que geraram, com os mesmos insumos utilizados, ou poderia reduzir o uso dos insumos em 16% e manter o nível atual de produção.

Apenas dois projetos não excederam 70% da eficiência, EDP Renováveis Brasil S.A e Rosa dos Ventos Wind Park, ambos possuem apenas um parque e estão localizados nos estados de Santa Catarina e Ceará, respectivamente. Doze projetos excederam a taxa de 90% de eficiência e estão apresentados na tabela 5.

Apenas um projeto atingiu o nível máximo de eficiência de 100%, Renova Energia Alto do Sertão I. O projeto está localizado no estado da Bahia e é composto por 14 parques eólicos⁹ que estão distribuídos entre os municípios de Guanambi, Caetité e Igaporã. A responsável por fornecer os recursos e suporte para o projeto é a empresa brasileira Renova Energia S.A. Ao todo existem 188 turbinas instaladas com altura média de 80 metros.

O segundo colocado no ranking, Renova Energia Alto do Sertão II, também pertence a Renova Energia S.A., apesar deste projeto não ter atingido o nível máximo teve uma pontuação bem elevada, atingindo 96% de eficiência. O projeto possui 15 parques¹⁰ distribuídos em diversos municípios. Os dois projetos mais bem posicionados no ranking de eficiência pertencem ao Complexo Eólico do Alto Sertão considerado o maior complexo dessa modalidade energética na América Latina. Juntos possuem 425 aerogeradores instalados com uma altura média de 80 metros e uma capacidade de produção de 680,5 MW.

Percebe-se que 9 dos 12 projetos com maior nível de eficiência estão na região Nordeste do país, concentrados nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí, Ceará e Pernambuco. O que parece razoável, visto que a região possui o clima e os ventos mais adequados do país para a geração de energia eólica.

O décimo colocado opera há mais de 11 anos e é considerado um dos projetos mais antigos instalados no país. Faz parte do Complexo eólico de Osório situado no estado do Rio Grande do Sul. A obra é um empreendimento da Ventos do Sul Energia que pertence à espanhola Enerfin/Enervento do grupo Elecnor com 91% e à alemã Wobben Windpower, subsidiária da Enercon GmbH, com 9%.

⁹ Pajeú do Vento, Planaltina, Porto Seguro, Nossa Senhora da Conceição, Guirapá, Serra do Salto, Guanambi, Alvorada, Rio Verde, Candiba, Ilhéus, Igaporã, Licínio de Almeida e Pindaí.

¹⁰ Caetité, Espigão, Serra do Espinhaço, Da Prata, Dos Aracas, Maron, Piloões, Tanque, Ventos do Nordeste, Ametista, Dourados, Morrao, Seraima, Borgo, Pelourinho.

Tabela 5 - Ranking dos projetos de energia eólica mais eficientes.

Posição	Cód.	Projeto	Eficiência	Sponsors	UF
1	47	Renova Energia Alto do Sertão I	1	Renova Energia S.A.	BA
2	48	Renova Energia Alto do Sertão II	0,962	Renova Energia S.A.	BA
3	34	Geribatu	0,954	Rio Bravo Energia	RS
4	22	Desa Rio Grande do Norte	0,943	CPFL Energia	RN
5	53	Santa Clara	0,933	Ersa	RN
6	10	Chapada do Piauí I	0,921	Salus Fundo de Investimento em Participacoes S.A	PI
7	52	Santa Brígida	0,919	Salus Fundo de Investimento em Participacoes S.A	PE
8	27	Energimp Ceará II Acarau	0,905	Impsa	CE
9	15	Contour Global Asa Branca	0,904	Contour Global	RN
10	64	Ventos do Sul	0,904	Enercon GmbH	RS
11	14	Chui Wind Farm	0,903	Rio Bravo Energia	RS
12	60	Serveng Civilsan Rio Grande do Norte Wind Farms	0,904	Serveng Civilsan S.A.	RN

Fonte: dados da pesquisa.

3.6.2 Resultados modelo *TOBIT*

A segunda etapa do trabalho consistiu em identificar quais fatores podem explicar os escores de eficiência dos projetos de geração eólica. Para tanto, o modelo de regressão *TOBIT* foi empregado. O modelo é apropriado, visto que os escores de eficiência são censurados, não podendo ser inferior a 0 e nem superior a 1. As variáveis incluídas na regressão foram: idade das instalações (**IDADE**), altura média das torres eólicas (**ALTURA**), número de aerogeradores existente em cada projeto (**AERO**) e variáveis *dummies*¹¹ representando os Estados onde os parques eólicos de cada projeto estão instalados. Essas *dummies* têm o intuito de controlar características distintas, não observáveis, dos locais de implantação do projeto. Os resultados da estimativa do modelo *TOBIT* podem ser vistos na Tabela 6.

¹¹ Para evitar singularidade, exclui-se a variável *dummy* representando projetos instalados no Estado de Santa Catarina.

Tabela 6 - Resultados da análise de regressão de TOBIT para os projetos eólicos.

Eficiência	Coef.	Desv. Pad	p > t
IDADE	-0,005	0,001	0,000***
ALTURA	0,001	0,000	0,000***
AERO	0,001	0,000	0,000***
d_BA	0,055	0,020	0,008***
d_CE	0,049	0,019	0,010***
d_PB	0,042	0,028	0,132
d_PE	0,062	0,021	0,004***
d_PI	0,052	0,021	0,015***
d_RJ	0,057	0,028	0,044***
d_RN	0,050	0,019	0,009***
d_RS	0,051	0,019	0,010***
d_SE	0,027	0,028	0,345
_cons	0,653	0,029	0,000***
/sigma	0,038	0,002	
Log likelihood =	353,946	LR chi2(12) =	223,17
Number of obs =	198	Prob > chi2 =	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: *, ** e *** indicam significância estatística de 10%, 5% e 1%, respectivamente.

As variáveis consideradas na análise foram estatisticamente significantes a 1% e apresentaram os sinais esperados. A idade das instalações, representada pela variável **IDADE**, apresentou um coeficiente com sinal negativo, ou seja, quanto mais antigo é o projeto menor é o nível de eficiência. A variável **ALTURA** que representa a altura das torres eólicas apresentou um coeficiente com sinal positivo, assim como a variável **AERO** que representa o número de aerogeradores instalados, ou seja, quanto mais altas forem as torres e quanto mais aerogeradores forem instalados, mais eficiente tende a ser o projeto.

Tal resultado parece razoável devido à própria evolução tecnológica da geração de energia eólica, ou seja, as características das estruturas têm sido gradualmente aperfeiçoadas, isso inclui o aumento na altura dos aerogeradores, aumento do número de turbinas instaladas, o aumento no diâmetro das pás e dos rotores, entre outros.

Para analisar a importância econômica dos resultados obtidos considere o projeto Fontes dos Ventos Wind Farm, que está mais próximo da eficiência mediana de toda amostra, o qual iniciou suas operações em 2015, é composto por três parques e possui 34 aerogeradores com altura média de 80 metros. Se o projeto fosse aproximadamente um mês mais antigo, a

eficiência do projeto seria 0,1% menor. Em contrapartida, se a altura e o número de aerogeradores fosse 10% maior naquele ano, o nível de eficiência aumentaria 18% e 7%, respectivamente. Apesar de todos os indicadores se mostrarem relevantes, a altura do aerogerador é o indicador que apresenta maior impacto na eficiência dos projetos eólicos brasileiros.

3.7 CONCLUSÃO

A geração de energia eólica no Brasil tem se expandido em um ritmo acelerado nos últimos anos. O país entendeu que diversificar a matriz energética, implementando um sistema sustentável que tenha como base, principalmente, a geração de energia limpa, como a solar e a eólica, é fundamental para o fortalecimento e a estabilidade do sistema nacional. Além de ser uma maneira de reduzir conflitos devido ao uso dos recursos hídricos e a dependência do setor elétrico.

Diante dessa expansão acelerada questiona-se se os parques eólicos estão operando de forma eficiente. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica brasileiros para o período entre 2015 e 2017. Foi utilizado um modelo *SFA* para obter os escores de eficiência dos projetos e posteriormente, um modelo *TOBIT* para identificar quais variáveis tinham maior potencial de afetar os escores obtidos.

Os dois projetos com maiores níveis de eficiência, Renova Energia Alto do Sertão I e Renova Energia Alto do Sertão II, pertencem ao Complexo Eólico do Alto Sertão localizado no estado da Bahia. O mesmo é considerado o maior complexo dessa modalidade energética na América Latina. Dos doze projetos com nível de eficiência acima de 90%, nove, incluindo os dois citados anteriormente, estão localizados na região Nordeste do país. Esses resultados ratificam as características singulares dos ventos da região. Diversos especialistas têm destacado que os ventos do Nordeste apresentam níveis de velocidade superior ao mínimo necessário para a geração de energia, além de serem estáveis e unidirecionais, inclusive sem rajadas. Dessa forma, o elevado potencial dos ventos tem direcionado cada vez mais investimentos e, por conseguinte, estimulado o desenvolvimento tecnológico dos projetos situados na região Nordeste.

Não obstante o nível médio de eficiência dos projetos ser considerado elevado é possível dizer que os mesmos poderiam ter gerado em média 16% a mais de energia do que geraram com os mesmos insumos utilizados, ou poderiam reduzir o uso dos insumos em 16% e manter o nível atual de produção.

O modelo *TOBIT* que teve como objetivo identificar quais fatores são capazes de explicar os escores de eficiência dos projetos de geração eólica mostra que as variáveis consideradas na análise, quais sejam: idade das instalações, altura dos aerogeradores e número de aerogeradores têm influência sobre a eficiência dos projetos. A altura dos aerogeradores é a variável que afeta a eficiência em maior magnitude.

Conforme destaca Iglesias e outros (2010), a despeito dos fatores externos que não podem ser controlados pelos gestores, a eficiência dos projetos eólicos está bastante relacionada com as decisões sobre o processo produtivo. Sendo assim, os níveis de eficiência podem ser elevados quando uma avaliação mais criteriosa a respeito dos recursos existentes é realizada. Essa avaliação tem o intuito de identificar a qualidade e a quantidade do vento no local de implementação dos parques.

Finalmente, é possível dizer que a escolha de equipamentos adequados, com base na análise das características técnicas dos mesmos, pode impactar de forma positiva nos níveis de eficiência. Ademais, a avaliação para identificar o melhor posicionamento das turbinas, o terreno mais adequado para instalação e a menor distância até o ponto de conexão na rede elétrica também podem influenciar a eficiência dos projetos.

É importante destacar que os resultados dos testes devem ser analisados com prudência dada as restrições da amostra utilizada, tanto com relação ao período abordado como com as variáveis utilizadas. Os resultados não representam medidas exatas dos fatores determinantes da eficiência. São apenas indicações de variáveis que podem afetar o desempenho dos parques eólicos.

Como agenda para pesquisas futuras sugere-se analisar a eficiência das demais fontes renováveis de energia, a fim de obter um comparativo entre elas e indicar para governantes e gestores possíveis gargalos no sistema produtivo que estejam impedindo que as DMU's não atinjam o melhor desempenho possível. Ademais, é interessante analisar a eficiência com

relação aos custos de operação e manutenção de parques eólicos ou usinas de outras fontes renováveis.

4 OS IMPACTOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NÃO CONVENCIONAL SOBRE OS PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

4.1 INTRODUÇÃO

Elementos chave no combate às alterações climáticas, as fontes renováveis também são capazes de reduzir a dependência energética e desenvolver setores e atividades econômicas em distintos países. Entretanto, o custo de implementação dessas fontes geralmente é superior à maioria das tecnologias convencionais não renováveis. Conforme destaca Würzburg e outros (2013), muitos dos países que conseguiram elevar sua capacidade renovável de maneira considerável fizeram por meio da implementação de políticas de apoio efetivas.

De maneira análoga a outros países, o Brasil passou por algumas experiências empregando distintos mecanismos de apoio às fontes renováveis. A experiência mais relevante foi o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas - PROINFA. Não obstante o PROINFA ter sido um plano estratégico para o setor com metas e objetivos definidos para longo prazo, além de ser uma experiência de aplicação de tarifas especiais (*feed-in*) semelhante a países europeus, o programa foi desenvolvido para contemplar apenas as fontes eólica, biomassa e PCH's. Não fez parte do programa a energia solar, por exemplo, a qual passou a contar com iniciativas e incentivos anos mais tarde (AQUILA *et al.*, 2016).

Após o advento do novo modelo regulatório do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), ocorrido em 2004, foram desenvolvidos os leilões no Ambiente de Contratação Regulado (ACR). Os leilões sucederam o PROINFA e passaram a ser o principal mecanismo de comercialização de energia entre geradores e distribuidores de eletricidade.

As políticas de incentivo desenvolvidas, antes e depois da implementação do novo modelo energético brasileiro, contribuíram para o aumento da capacidade instalada com base em fontes renováveis e para a redução dos custos de tais fontes ao longo dos anos. Todavia, as tarifas pagas pelos consumidores ainda são bastante elevadas. O impacto da fatura de energia elétrica nos custos das grandes indústrias, que são consideradas as maiores consumidoras de eletricidade, afeta a produtividade e a competitividade das mesmas, podendo refletir no desenvolvimento e crescimento do país como um todo.

Na tentativa de driblar os elevados preços cobrados pelas distribuidoras de energia elétrica, muitos consumidores têm entrado para o mercado livre de energia. Nesse segmento, os preços são negociados bilateralmente entre vendedor e comprador, tendo como parâmetro o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). O Ambiente de Contratação Livre (ACL) brasileiro vem se ampliando ano após ano e tem sido uma relevante vertente do crescimento das fontes renováveis de energia.

Existe uma crescente discussão na literatura que se refere à relação entre o uso de fontes alternativas e o preço da energia elétrica em diversos países. Alguns autores têm utilizado abordagens baseadas em simulação para identificar o impacto de um aumento na participação de fontes de energia renováveis na matriz energética sobre o preço da eletricidade, como é o caso de Sensfuß e outros (2008), Linares e outros (2008) e Sensfuß (2011). Outros têm aproveitado a disponibilidade de dados *ex post* sobre os preços da eletricidade para analisar essa relação, como, por exemplo, Gelabert e outros (2011), Woo e outros (2011), Gil e outros (2012), Wurzburg e outros (2013), Huismann e outros (2013), Mulder e Scholtens (2013), Rintamäki, Siddiqui e Salo (2014), Ketterer (2014), Ballester e Furió (2015) e Benhmad e Percebois (2016).

De acordo com Gelabert e outros (2011), enquanto inúmeros países adotaram metas pouco audaciosas, os impactos das políticas direcionadas ao uso de energias renováveis no orçamento ou mesmo no preço da eletricidade não foram significativos. Todavia, o crescente aumento no uso de fontes alternativas de energia tem suscitado preocupações quanto à forma com que esses investimentos podem afetar os preços da eletricidade gerada.

É importante verificar o impacto de uma maior inserção dessas fontes nos preços finais da energia elétrica e projetar o desenvolvimento de políticas governamentais que promovam iniciativas de energias renováveis não convencionais ao menor custo. Sendo assim, este ensaio tem como objetivo analisar o impacto da geração não convencional de energia renovável sobre os preços finais da energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre (ACL) brasileiro. Para tanto foram utilizadas séries de tempo mensais e a metodologia econométrica baseia-se no uso de variáveis instrumentais.

É particularmente interessante realizar este estudo empírico para o Brasil, visto que não obstante os estímulos às energias renováveis terem aumentado significativamente ao longo dos anos, tornando-o um dos maiores investidores mundiais, o país está entre os que produzem a energia

mais cara do mundo, fato que frequentemente é colocado no centro de um intenso debate econômico e social.

Destaca-se a singularidade do presente trabalho, visto que não foi encontrado na literatura trabalho semelhante realizado para o Brasil. A maioria dos trabalhos analisam países desenvolvidos da Europa e consideram apenas uma fonte renovável, em geral a eólica. Um estudo como este, direcionado a um país em desenvolvimento como é o caso do Brasil, é importante para que as políticas de incentivo e os investimentos sejam avaliados a fim de que o enorme potencial renovável do país seja aproveitado e a modicidade de preços seja atingida.

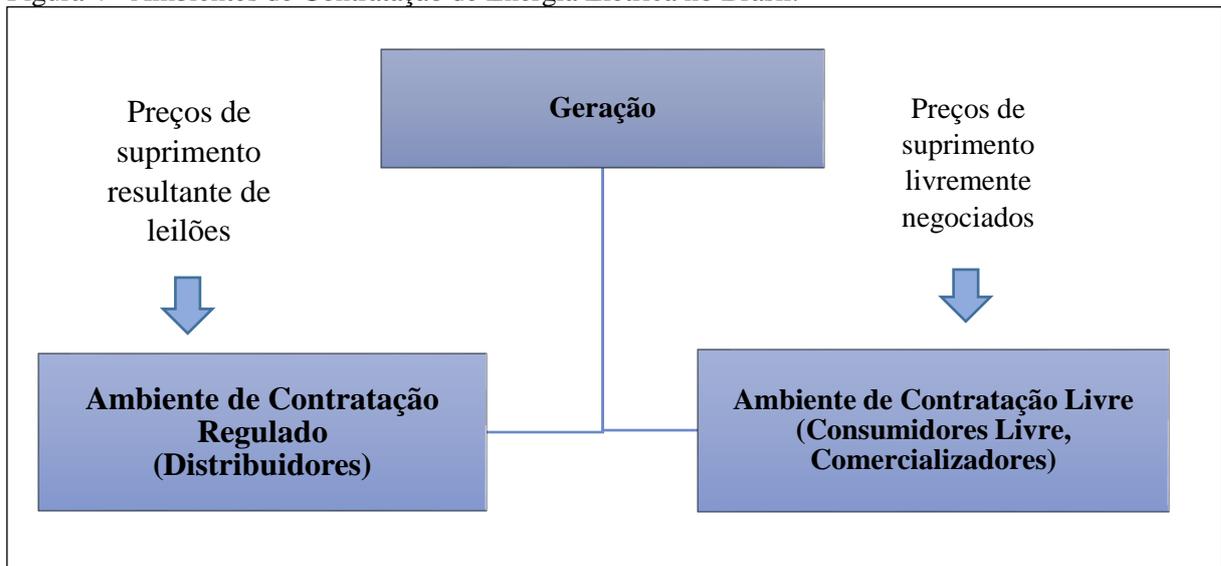
O presente ensaio está dividido em outras cinco subseções, além desta introdução. A segunda subseção apresenta a estrutura do ambiente de contratação de energia do SEB. A terceira faz uma revisão da literatura, cujo foco é a relação entre fontes de energia renováveis e o preço da eletricidade. Na quarta subseção são descritas as variáveis utilizadas, bem como a metodologia econométrica adotada na análise. Os resultados são apresentados na quinta subseção e por fim, na sexta subseção a conclusão do ensaio é realizada.

4.2 AMBIENTES DE CONTRATAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)

Com a implementação no novo modelo do SEB em 2004, a comercialização de energia elétrica passou a ser executada de forma distinta. A negociação e contratação de energia elétrica passaram a ser feitas em dois ambientes, quais sejam: Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). As concessionárias passaram a ter a obrigação de comprar energia no mercado regulado através de leilões públicos, enquanto os demais agentes passaram a poder negociar sua demanda livremente no chamado mercado livre (SILVA, 2011). A interação entre os agentes durante a comercialização ocorre conforme apresentado na figura 4.

Com a obrigatoriedade de compra de energia através dos leilões busca-se o menor preço. Assim, os consumidores ficam protegidos do risco de contratação de energia por valores elevados. Os leilões são promovidos pela CCEE e têm como objetivo atender toda a demanda de eletricidade das distribuidoras, proporcionando maior segurança à operação do sistema e ao mesmo tempo buscando a modicidade tarifária.

Figura 4 - Ambientes de Contratação de Energia Elétrica no Brasil.



Fonte: Santos, (2015). Adaptado pela autora.

As negociações no ACR são formalizadas por meio de contratos bilaterais entre os geradores de energia e o pool de distribuidores¹² que participam do leilão. Esses contratos são conhecidos como Contratos de Compra e Venda de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR's). Existem duas modalidades de fornecimento de energia em que são divididos os contratos no ACR. Uma contém contratos de quantidade de energia e a outra, contratos de disponibilidade de energia. Nos primeiros, os vendedores assumem os custos associados a riscos hidrológicos. Já nos segundos, os agentes compradores assumem os custos, podendo os repassar ao consumidor final (LEITE; CASTRO; TIMPONI, 2013).

Por outro lado, o ACL é direcionado exclusivamente para empresas com consumo e necessidades estratégicas de maior volume de energia em um curto prazo. O ACL tem objetivo de assegurar a concorrência e a liberdade de seus participantes. Os agentes conseguem celebrar contratos bilaterais livremente, definindo preço, quantidade e prazo com intervenção mínima do Governo. No entanto, assim como ocorre no ACR, todos os contratos devem ser registrados na CCEE (LEITE; CASTRO; TIMPONI, 2013).

Fazem parte do ACL os geradores, comercializadores, consumidores especiais e consumidores livres. O consumidor especial pode contratar apenas energia incentivada, ou seja, energia gerada de fonte solar, eólica, PCH's e biomassa, cuja potência injetada na rede seja maior ou

¹² Grupo de agentes de distribuição de energia elétrica que declaram necessidade de contratação em um leilão de venda de energia. Esse grupo participa do leilão como cooperativa e a soma das necessidades declaradas por cada agente é adquirida conjuntamente buscando preços menores na contratação.

igual a 500KW. Já os consumidores livres podem contratar tanto energia convencional - usinas térmicas a gás ou grandes hidrelétricas -, como incentivada e devem ter demanda igual ou superior a 3MW (CCEE, 2016).

Assim como no ACR, apenas agentes de geração e comercialização são responsáveis pela venda de energia no ACL. Contudo, todos os seus participantes podem efetuar compras de energia. Os comercializadores no ambiente livre têm a função de adquirir energia elétrica dos geradores e vender para os consumidores especiais, livres, distribuidores e geradores. A compra de energia por parte de agentes geradores ocorre quando os mesmos não conseguem gerar a quantidade de energia estipulada no contrato e então recorrem ao mercado livre para cobrir essa diferença (CUBEROS, 2008).

Participam do ACL consumidores com elevada demanda de energia como montadoras de automóveis, siderúrgicas e outras indústrias, além de empresas de médio e grande porte como shoppings, supermercados e hotéis. O quadro 2 mostra as principais diferenças entre os dois ambientes de contratação, ACR e ACL.

Quadro 2- Diferença entre ACR e ACL

	Ambiente Livre (ACL)	Ambiente Regulado (ACR)
Participantes	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente – (Ajuste e A-1)
Contratação	Livre negociação entre os compradores e vendedores	Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela CCEE, sob delegação da Aneel
Tipo de contrato	Acordo livremente estabelecido entre as partes	Regulado pela Aneel, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR)
Preço	Acordado entre comprador e vendedor	Estabelecido no leilão

Fonte: CCEE, (2018b)

A tendência é de que esse ambiente de contratação continue crescendo no Brasil e aos poucos chegue até o consumidor residencial como acontece em países da Europa. Atualmente tramita no Congresso Nacional o projeto de lei do Senado nº 232, de 2016 que propõe a redução

gradativa do limite de demanda contratada para ingressar no mercado livre de energia. Tal projeto sugere a eliminação de qualquer imposição para entrada no mercado livre até 2028 (BRASIL,2016a).

4.2.1 Mercado de Curto Prazo (MCP) e o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD)

Com as reformas pelas quais passou o setor elétrico brasileiro e com a introdução de novos mecanismos de comercialização no setor foi criado o chamado Mercado de Curto Prazo (MCP) ou também “Mercado *Spot*”. Esse mercado tem algumas funções relevantes no setor, tais como: tornar as transações mais flexíveis, ajustar a relação entre energia contratada e energia gerada e atuar como referência em contratos de longo prazo. De maneira Geral, Newbery (1998) destaca que um MCP é um mecanismo crucial para o ajuste entre oferta e demanda de energia.

A CCEE é responsável por essa contabilização, assim como pela comparação destes valores com os contratos bilaterais que são firmados entre compradores e vendedores. As diferenças identificadas nesse processo, tanto de débito como de crédito, são financeiramente liquidadas tendo como base o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) (CCEE, 2016). Os contratos de compra e venda de eletricidade controlam as relações comerciais entre os agentes. Todos os contratos devem ser registrados na CCEE e esse registro faz com que as contratações de médio e longo prazo tenham vínculo com o MCP, visto que todo tipo de transação de energia não registrada por meio de contrato está sujeita à contabilização e a liquidação compulsória no MCP da CCEE (TOLMASQUIM, 2011).

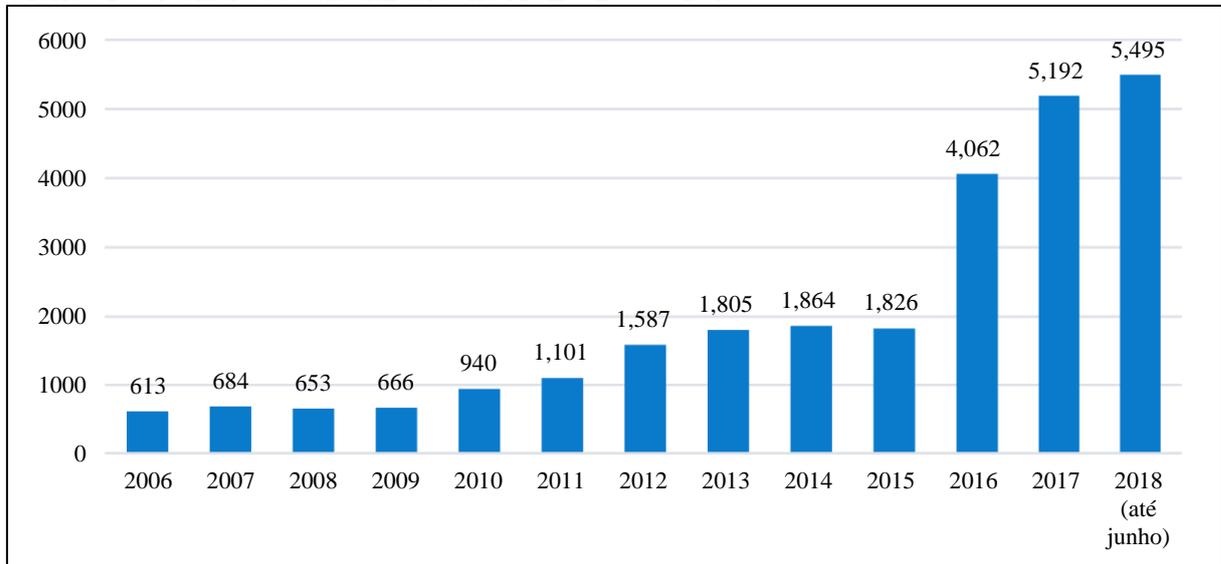
O PLD tem a função de valorar a energia comercializada no MCP e isso ocorre por meio de dados considerados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para otimização da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) mostrando o Custo Marginal de Operação (CMO). O CMO é utilizado como uma aproximação do preço de equilíbrio do mercado distinguindo-se desse por possuir um valor máximo e um valor mínimo (CCEE, 2016). Nesse processo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem a função de autorizar o uso de modelos computacionais que são adotados no planejamento e operação pelo SIN e pelo ONS no cálculo do PLD, que é determinado semanalmente para cada patamar de carga e cada submercado.

Segundo Maia e outros (2016), levando em conta que a matriz energética brasileira é bastante dependente da hidroeletricidade, a principal função do PLD é tornar o benefício presente do

uso da água e de sua armazenagem o mais eficiente possível. Quando o quadro hidrológico é extremamente desfavorável, a alternativa geralmente é o acionamento das termelétricas que possuem custos maiores e, além disso, emitem mais poluentes na atmosfera devido ao uso de combustíveis fósseis. Dessa forma, o que se tenta fazer é alcançar um certo equilíbrio para que seja possível minimizar os riscos de déficits futuros e os custos presente na geração de energia elétrica.

O número de consumidores de energia no mercado livre de energia no Brasil tem crescido ano a ano (ver Gráfico 10). Em 2018, o consumo no ACL atingiu 18,406 MW, valor que representa cerca de 30% do total de usado em todo SEB.

Gráfico 10 - Número de consumidores no ACL – 2006 a 2018.

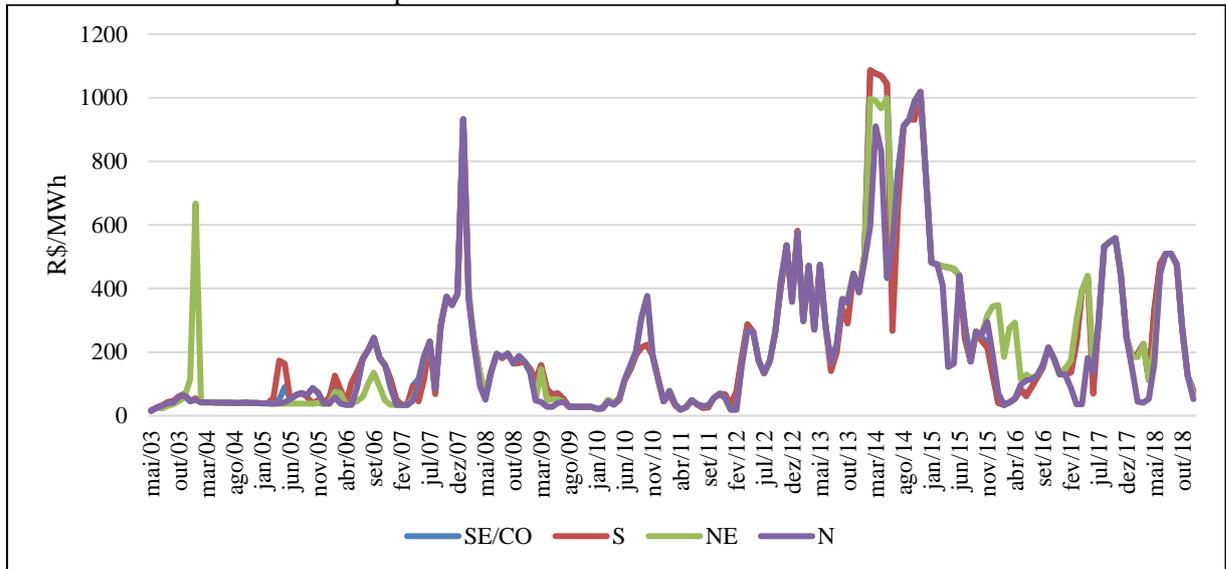


Fonte: CCEE (2019).

O PLD entre 2003 e 2005 foi relativamente baixo e estável conforme gráfico 11. Houve um comportamento semelhante na maioria dos submercados, exceto no submercado Nordeste que entre dezembro de 2003 e janeiro de 2004 apresentou valores mais elevados.

Essa tendência de preços baixos na maioria dos submercados reflete a situação após o período de racionamento de energia vivenciada entre os anos de 2001 e 2002, os consumidores reduziram a demanda por energia nesse período o que causou um excesso de oferta no mercado.

Gráfico 11 - PLD médio mensal por submercado - 2003 a 2018.



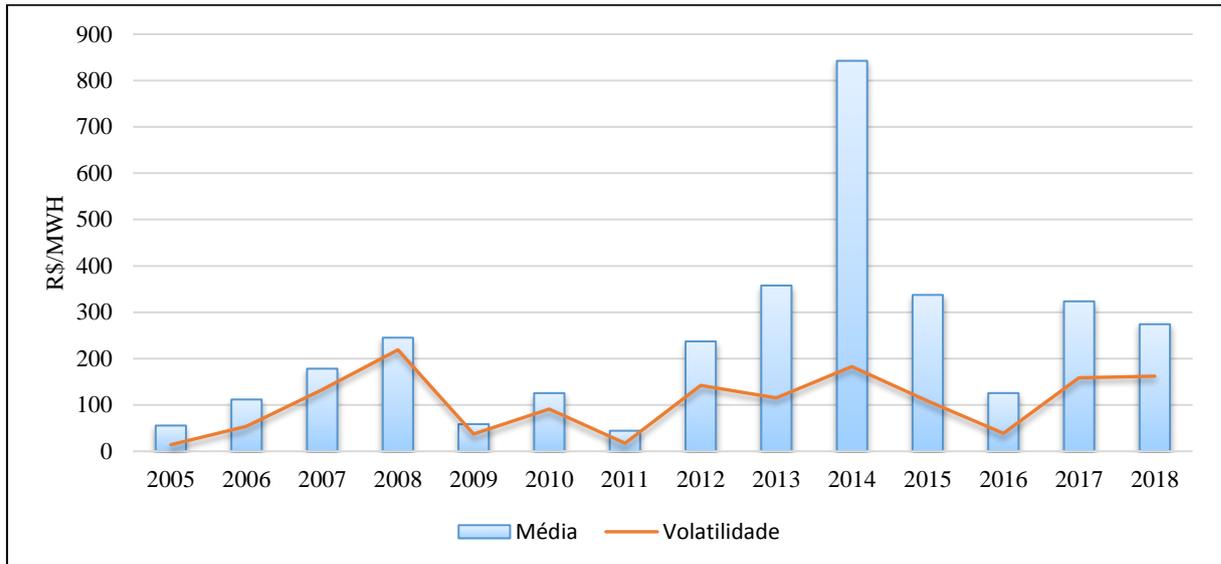
Fonte: CCEE (2019).

Nota: Preço médio atualizado para dezembro de 2018 através do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

A partir de 2005, a redução dos investimentos em capacidade instalada e o crescimento acelerado da economia foram importantes para gerar equilíbrio entre oferta e demanda. O PLD passou a ter significativas variações e imprevisibilidade (ver gráfico 12), fazendo com que o MCP de energia elétrica do país se tornasse, cada vez mais, um ambiente com grau de incerteza elevado.

A partir de então, vários foram os fatores que contribuíram para elevar o valor do PLD e sua volatilidade. Em 2007, a baixa afluência contribuiu para o aumento do PLD em todos os submercados. Além disso, o quadro hidrológico extremamente hostil na região Nordeste, aliada a baixa afluência na região Sudeste submeteu o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) a autorizar o uso de usinas térmicas, com custos marginais significativamente maiores. Por isso, o PLD entre meados de 2007 e meados de 2008 teve aumentos significativos. Entre o final de 2012 e o início de 2013, o PLD voltou a patamares elevados e se manteve assim em 2014 devido, principalmente, à hidrologia desfavorável.

Gráfico 12 – Volatilidade e média do PLD – 2005 a 2018.



Fonte: CCEE (2019).

Nota: Preço médio atualizado para dezembro de 2018 através do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA).

De 2015 em diante, o PLD apresentou tendência de queda. Nesse ano, o governo retirou os subsídios ao setor elétrico que tinham sido implementados dois anos antes. Tal fato provocou um aumento na conta de energia elétrica no ambiente regulado e estimulou o desenvolvimento do ambiente livre. Ademais, nessa época os reservatórios estavam com níveis suficientes e não houve problemas na geração de energia.

Nota-se que a disponibilidade de água nos reservatórios e o nível de precipitação pluviométrica são os principais fatores que afetam o preço da energia elétrica. Conforme destaca Leite, Castro e Timponi (2013) em sistemas predominantemente baseados em hidroeletricidade, como é o caso do Brasil, o preço da energia é mais volátil no médio do que no curto prazo. Isso se deve ao fato de que no curto prazo os reservatórios transferem energia de horas de carga baixa para as horas de carga alta, alterando a oferta e suavizando as variações dos preços. Por outro lado, no médio prazo o preço varia de forma mais intensa, visto que os sistemas hidráulicos são desenvolvidos com vistas a garantir a oferta de carga em condições hidrológicas desfavoráveis.

Dessa forma, é possível dizer que é comum que o preço no MCP de eletricidade seja um ativo mais volátil. O que implica dizer que existe grande dificuldade em prever o comportamento do PLD, fato que expõe os agentes geradores, distribuidores e consumidores livres a riscos de mercado significativos. Ainda segundo Leite, Castro e Timponi (2013), a volatilidade do PLD

no Brasil é causada, principalmente, pelo fato de que houve uma redução expressiva nos investimentos de expansão do sistema elétrico do país logo após o período de racionamento de energia vivenciado no início da década de 2000.

As preocupações ambientais têm aumentado significativamente nos últimos anos. Essas questões abordam, dentre outros fatores, as consequências de alagamentos que são causados pelas construções de grandes usinas hidrelétricas. Isso tem sido um entrave na construção de novos empreendimentos hidrelétricos com reservatórios. Os grandes reservatórios, que tinham como função garantir a segurança do sistema e proporcionar melhor controle da geração de eletricidade em períodos de estiagem, têm sido substituídos por usinas a fio d'água¹³. Com a redução da quantidade de água armazenada em relação à demanda o volume de energia elétrica gerada a partir de fonte hidráulica se tornou mais volátil, visto que o sistema se torna mais dependente das chuvas. Isso fez com que um maior número de empresas de fonte térmica passasse a ser incorporado no sistema.

Apesar da volatilidade do preço da energia no mercado livre, o número de consumidores e o consumo em si nesse ambiente de contratação tem aumentado no decorrer dos anos. Em 2018, o ACL completou 20 anos de existência no Brasil e desde então, segundo dados da ABRACEEL (2018), as empresas participantes desse ambiente de contratação conseguiram economizar cerca de 23% nas tarifas de energia elétrica e, entre 2003 e 2016, houve uma economia de aproximadamente R\$ 83 bilhões nas contas de eletricidade.

As elevadas tarifas de energia elétrica têm um peso representativo na planilha de custos de grandes indústrias e empresas de médio e grande porte, o que afeta sua produtividade e competitividade, além de refletir sobre o desenvolvimento e crescimento do país. Nesse sentido, o ACL surge como uma alternativa que estimula por meio da concorrência a redução da tarifa de energia elétrica.

Ademais, conforme dados da ABRACEEL (2018), o ACL tem se mostrado um importante propulsor no desenvolvimento de fontes renováveis não convencionais. Em 2017, cerca de 30% de toda energia consumida pelo mercado livre foi proveniente das fontes eólica, biomassa,

¹³ Usinas hidrelétricas a “ fio d'água” são aquelas que não dispõem de reservatório de água, ou o têm em dimensões menores do que poderiam ter. Optar pela construção de uma usina “a fio d'água” significa optar por não manter um estoque de água que poderia ser acumulado em uma barragem.

PCH's e solar. Além disso, cerca de 70% de toda energia gerada por usinas a biomassa e PCH's foi comercializada no ACL em 2017. Esses dados demonstram a relevância do mercado livre de energia. A abertura do setor pode proporcionar mais produtividade para a economia brasileira, um dos grandes desafios para o crescimento do país, além de ajudar na promoção do desenvolvimento sustentável.

4.3 REVISÃO DA LITERATURA EMPÍRICA

A grande maioria dos países que conseguiram elevar a participação de fontes renováveis em suas matrizes energéticas fizeram por meio da implementação de intensas políticas de apoio. Não obstante tais mecanismos de incentivo terem sido bem sucedidos na maioria das vezes apresentam altos custos, o que acaba por gerar dúvidas sobre a sua viabilidade econômica futura. Nesse sentido, tem aumentado o interesse em identificar e quantificar os custos e benefícios do aumento da capacidade renovável e os efeitos da inserção das fontes renováveis sobre o preço da energia elétrica.

Diversos estudos têm utilizado abordagens baseadas em simulação para identificar o impacto de um aumento da energia renovável no preço da eletricidade. Esses estudos têm como base modelos de simulação que podem utilizar tanto dados reais passados como dados hipotéticos para vários países e regiões. A maioria dos trabalhos desenvolvidos sugerem que a produção de eletricidade renovável resulta em menores preços da eletricidade. Sensfuß e outros (2008), por exemplo, analisaram o impacto da geração de eletricidade renovável no mercado de eletricidade na Alemanha durante o período de 2001 a 2006. Por meio de diversas simulações¹⁴, os resultados apontam que há uma redução considerável no preço com a geração via fontes renováveis. No curto prazo, origina-se um efeito distributivo que gera economia para o lado da demanda, diminuindo os lucros do gerador.

O trabalho de Linares e outros (2008) foi realizado para a Espanha e mostra que os preços podem cair com a ampliação da capacidade de fontes renováveis. De Miera e outros (2008), também realizaram estudo para a Espanha, porém analisando apenas a fonte eólica. Encontraram evidências de que o consumo de energia eólica reduziu significativamente os preços da eletricidade espanhola entre 2005 e 2007. Em uma aplicação posterior, Sensfuß

¹⁴Os preços do mercado de eletricidade são simulados por meio do modelo PowerACE calibrado. Para descrição detalhada do modelo PowerACE ver Sensfuß (2008).

(2011) realizou uma análise para o período entre 2007 e 2010 e os resultados apontam para uma relação negativa entre geração renovável e preços.

Em contraste com os trabalhos citados até então, o presente ensaio aproveita a disponibilidade de dados *ex post* sobre os preços da eletricidade e a capacidade renovável e realiza uma análise empírica com base em dados reais passados por meio de um modelo econométrico, para calcular o efeito da expansão das energias renováveis sobre preços da energia no ACL brasileiro. Apesar da relevância da questão e a crescente disponibilidade de dados reais, a literatura com pesquisas realizadas através de análise *ex post* empírica não é extensa. Entretanto, alguns trabalhos que partem dessa abordagem podem ser destacados.

O trabalho de Gelabert e outros (2011), por exemplo, analisou o efeito da introdução de fontes renováveis e cogeração¹⁵ nos preços da eletricidade na Espanha entre 2005 e 2009. Os resultados apontam que um aumento marginal de 1GWh de produção de eletricidade por meio de fontes renováveis e cogeração está associado a uma redução de quase 4% no preço médio da eletricidade. De maneira semelhante, Wurzburg e outros (2013) analisaram a Alemanha e a Áustria durante o período de 2000 a 2010. Uma das principais conclusões deste trabalho é que o preço da eletricidade caiu cerca de 2% para cada GWh de geração de eletricidade renovável.

Woo e outros (2011) analisaram o mercado de eletricidade do Texas entre 2008 e 2010. Os resultados mostraram um forte efeito negativo da geração eólica sobre o preço da eletricidade. Foi possível identificar que um aumento de 1GWh na produção de energia eólica é capaz de reduzir os preços da eletricidade em cerca de US\$ 3,00 a US\$ 15,00 / MWh dependendo da região. Os autores afirmam que a variação do preço aumenta em cerca de 5% no Oeste, onde está situada a maior parte da capacidade de energia eólica, e menos de 1% em outras zonas.

Gil e outros (2012) realizaram uma análise para a Espanha para o período entre 2007 e 2010. Concluíram que a redução dos preços da eletricidade torna-se cada vez mais provável quando a introdução da energia eólica é em maior escala. Em média, os resultados da análise mostram que o preço da eletricidade é cerca de 18% maior quando não há produção de energia eólica. Huisman e outros (2013) investigaram os efeitos indiretos de fontes de energias renováveis

¹⁵ Cogeração é a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível. O processo mais comum é a produção de eletricidade e energia térmica (calor ou frio) a partir do uso de gás natural e/ou de biomassa, entre outros.

nos preços da eletricidade por meio do estudo da energia gerada a partir de hidrelétricas no mercado *Nord Pool*¹⁶. Os resultados apontam que níveis de reservatórios mais elevados, ou seja, onde há mais capacidade hídrica, levam a preços significativamente mais baixos de energia. Um aumento no uso de fontes renováveis com baixos custos marginais como eólica e solar tem condições de reduzir o preço da eletricidade.

Mulder e Scholtens (2013) fizeram uma análise para o mercado holandês de eletricidade no período de 2006 a 2011. Os resultados mostram que apesar da participação de fontes renováveis na matriz energética da Holanda estarem aumentando nos últimos anos, ela ainda é considerada pequena, não afetando significativamente os preços da eletricidade. Entretanto, os autores destacam que há um impacto negativo, apesar de fraco, da velocidade do vento sobre os preços da eletricidade.

Rintamäki, Siddiqui e Salo (2014) avaliaram empiricamente o impacto da energia renovável na Dinamarca e na Alemanha sobre a volatilidade dos preços da eletricidade. O conjunto de dados para a Dinamarca se estende de janeiro de 2007 a dezembro de 2013 e para a Alemanha, de outubro de 2009 a dezembro de 2013. Os resultados apontam que a energia eólica diminui a volatilidade diária dos preços na Dinamarca, mas aumenta na Alemanha. Por outro lado, a energia solar diminui a volatilidade dos preços na Alemanha. A volatilidade semanal dos preços aumenta em ambas as áreas devido à intermitência dessas fontes.

Ketterer (2014), por sua vez, investigou a relação entre a geração de energia eólica e o comportamento dos preços da eletricidade na Alemanha no período de 2006 a 2012. Os resultados mostraram que a energia eólica reduz os preços, mas aumentou sua volatilidade. Os resultados também indicam que a mudança na regulamentação estabilizou o preço de atacado da eletricidade. Após uma alteração no mecanismo de marketing da eletricidade renovável, a volatilidade dos preços reduziu. Isso sugere que novas adaptações na regulamentação e política pode promover melhor integração das energias renováveis no sistema energético alemão.

Incluindo 24 países da União Européia, no horizonte temporal 1999-2011, Ladeira (2014) analisou o impacto das fontes de energia renováveis na evolução do preço final da eletricidade para consumidores domésticos. Os resultados obtidos apontaram que, do lado da demanda, a

¹⁶ Mercado da Califórnia e dos Países Nórdicos

atividade econômica mensurada pelo PIB *per capita* tem influência sobre os preços da energia. Considerando os fatores de oferta, foi possível identificar que o preço do petróleo impactou significativamente sobre os preços. Entretanto, a geração de energia por meio das fontes renováveis não apresentou efeito significativo no preço da eletricidade.

Ballester e Furió (2015) analisaram um conjunto de dados do mercado espanhol de eletricidade que consiste nos preços marginais do mercado diário, no período de 2001 a 2013. O intuito foi identificar se a geração de energia por meio de fontes renováveis foi capaz de gerar alterações nos preços da eletricidade. Os resultados encontrados pelos autores apontam que existe uma relação estatisticamente negativa entre a geração de energia renovável e os preços marginais diários. A volatilidade da geração de energias renováveis é transferida para a volatilidade dos preços. Contudo, em contraste com a maioria dos trabalhos que indicam que a introdução de energias renováveis alteraria significativamente os preços, o trabalho mostrou que o aumento da cota de geração de energias renováveis apenas reduz a probabilidade de aumento nos preços.

Em mais um trabalho com foco na energia eólica direcionado à Alemanha, Benhmad e Percebois (2016) compartilham da conclusão da maioria dos estudos, a geração de energia eólica reduz o preço da eletricidade. Além disso, este trabalho também aponta que apesar da redução do preço há um aumento na volatilidade do preço da eletricidade.

Silva e Cerqueira (2017) avaliaram os principais fatores capazes de determinar os preços domésticos da energia na União Européia entre 2000 e 2014. Os resultados apontam que, para alguns Estados-Membros da União Europeia, um aumento de 1% na cota de demanda de fontes renováveis aumentaria entre 1 e 1,8% o preço da eletricidade dos consumidores finais.

Diferentemente da maioria dos trabalhos citados que consideram na análise apenas um tipo de fonte renovável, em geral a fonte eólica, o presente capítulo analisa o efeito da inserção de várias fontes renováveis na matriz energética brasileira, o que torna o trabalho mais amplo. Ademais, não foi encontrado na literatura nacional e internacional nenhum trabalho referindo-se ao Brasil que analise o impacto de fontes renováveis sobre o preço da energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL), fator que torna o presente estudo inédito.

4.4 METODOLOGIA

A análise econométrica envolveu séries de dados mensais para o horizonte temporal 2013 - 2018. Os dados utilizados neste ensaio foram obtidos por meio do site da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a partir das publicações mensais conhecidas como InfoMercados que são relatórios que contam com dados prévios da medição de determinado mês e os principais resultados da contabilização das operações do mercado de energia elétrica naquele mês (CCEE, 2019). Os dados de renda foram levantados no Sistema Gerenciador de Séries Temporais (SGS) do Banco Central do Brasil (BACEN, 2019), enquanto que a série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis foram obtidos na Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2019) e nos relatórios de preços e custos da Petrobrás (PETROBRÁS, 2019).

A seguinte equação foi estimada:

$$\ln PLD_t = \alpha + \delta \ln PLD_{t-1} + \beta X_t + D_m + \varepsilon_t$$

Onde X_{it} representa a matriz de variáveis explicativas, D_m é matriz de variáveis *dummies* representando os meses, a fim de controlar a sazonalidade.

4.4.1 Descrição das variáveis

O presente trabalho pretende analisar os determinantes do preço de equilíbrio entre oferta e demanda no ACL. O intuito é analisar se é possível reduzir esse preço de equilíbrio a medida que mais geração de energia via fontes renováveis vai sendo usada para atender a demanda. Evitou-se tentar estimar diretamente um modelo de demanda ou oferta dada a quantidade reduzida de observações e por isso adotou-se estratégia semelhante a utilizada por Silva e Cerqueira (2017) e Ladeira (2014).

É importante ressaltar que os testes econométricos desenvolvidos neste trabalho devem ser considerados apenas como indicações do efeito do uso de fontes renováveis sobre os preços da energia elétrica distribuída. Os resultados obtidos devem ser vistos com cautela, tendo em vista o número reduzido de observações. Outros trabalhos desenvolvidos na área trabalham com

dados diários, por isso contam com uma amostra mais representativa, o que não acontece no presente ensaio que trabalha com dados mensais.

Como o interesse é identificar o impacto da inserção de fontes renováveis sobre o preço da eletricidade no ACL foi utilizada como variável dependente o logaritmo natural da média mensal do Preço de Liquidação das Diferenças (**PLD**). Seus valores são expressos em R\$/MWh e ajustados com base no IPCA de dezembro de 2018. Adicionalmente, também foram incluídas as variáveis adicionais de controle, que estão descritas na sequência.

A variável dependente defasada, PLD_{t-1} foi utilizada como variável independente. O uso da variável dependente defasada como regressor é frequente em séries de tempo. Geralmente isso é feito no intuito de modelar a persistência e essa é considerada uma estratégia robusta para resolver o problema de autocorrelação dos resíduos. Acredita-se que o PLD defasado tem uma relação direta com o PLD atual, ou seja, o preço da energia em períodos passados tem impactos sobre o preço atual. Isso ocorre devido a existência de persistência parcial do valor de uma variável ao longo do tempo, isto é, seu valor em um determinado período tem relação com os valores assumidos em períodos passados.

O logaritmo natural do PIB mensal, (**PIB**) também foi utilizado como variável independente. Seus valores foram atualizados para dezembro de 2018 pelo IPCA. A inclusão dessa variável pretende mensurar a influência do desempenho econômico na evolução dos preços da energia. Ademais, o logaritmo natural do consumo de energia elétrica no ACL, (**CONS**) também foi considerado regressor. Seus valores são expressos em MWh. Acredita-se que exista uma relação direta entre essas variáveis e o preço da energia. O aumento do consumo proporcionado pelo aumento do poder aquisitivo dos indivíduos pressiona o sistema elétrico que, sem alternativas emergenciais, precisa ativar as usinas térmicas que possuem custos operacionais mais elevados, refletindo no aumento da tarifa paga pelo consumidor.

O logaritmo natural da geração de energia via fontes renováveis não convencionais no ACL, quais sejam: eólica, biomassa e PCH's, (**EOL**), (**BIO**), (**PCH**), respectivamente também foram incluídas no modelo como variáveis explicativas. Seus valores são expressos em MWh. Acredita-se que exista uma relação inversa entre a geração de fontes renováveis e o preço da energia distribuída. Isto porque, não obstante o custo de implantação da maioria das fontes renováveis serem significativamente maiores do que das fontes convencionais, os custos

marginais de despacho são muito baixos. Com relação à fonte eólica, por exemplo, quando a quantidade de vento é maior, a usina consegue gerar mais energia sem praticamente incorrer em custos adicionais.

Outra variável explicativa foi o logaritmo natural da geração de energia via usinas hidrelétricas no ACL, (**HIDRO**). Seus valores são expressos em MWh. A literatura tem apontado que a disponibilidade de água nos reservatórios e o nível de precipitação pluviométrica são os principais fatores que impactam sobre o preço da energia brasileira. Sendo assim, entende-se que quanto maior é a oferta de energia via fonte hidráulica menor tende a ser o PLD.

Por fim, o logaritmo natural do preço do óleo diesel, (**OLEO**), com valores expressos em R\$/litro e ajustados para dezembro de 2018 pelo IPCA e o logaritmo natural do preço do gás natural vendido para as termelétricas, (**GNV**), com valores expressos em US\$/MMBTU (dólares norte-americanos por milhão de *British Thermal Unit*), convertidos para R\$(reais) e atualizados para dezembro de 2018 pelo IPCA também foram considerados como regressores. Foram utilizados os preços do óleo diesel e o do GNV ao invés das quantidades de energia gerada via essas fontes, pois os dados para tal não estão disponíveis para o ACL. Contudo, isso não é um problema, já que o preço desses insumos sinaliza muito bem a viabilidade econômica de se acionar essas usinas.

Quando o quadro hidrológico é desfavorável, a alternativa é o acionamento das termelétricas que utilizam fontes de energia não renováveis, sendo a maioria de origem fóssil, como é o caso do óleo diesel e do gás natural. Essas usinas possuem maiores custos e causam maior impacto ambiental. Esses custos, via de regra, são repassados para o preço da energia distribuída. Sendo assim, pode-se dizer que há uma relação direta entre o uso de fontes convencionais não renováveis, representadas pelo preço dos combustíveis, e o PLD.

Além das variáveis apresentadas, foram incluídas variáveis *dummies* mensais com o intuito de levar em consideração a sazonalidade das séries.

4.4.2 Metodologia econométrica

Quando se supõe a existência de endogeneidade, isto é, quando a variável de interesse tem correlação com o termo de erro, o uso de variáveis instrumentais é uma alternativa para que se

obtenha um estimador consistente. Esta subseção tem como objetivo descrever a metodologia econométrica baseada em variáveis instrumentais utilizada no presente capítulo. Vale destacar que esta subseção fundamenta-se, principalmente, nas contribuições de Baum, Schaffer e Stillman (2003, 2007) e Andrade e Tiriyaki (2017).

4.4.2.1 Variáveis Instrumentais e método MQ2E

Quando o intuito é estudar a relação entre duas variáveis, geralmente utiliza-se o modelo de regressão linear clássico, no qual os parâmetros de interesse são estimados por meio dos estimadores de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Para tanto, os dados precisam ter algumas características que são descritas pelas chamadas hipóteses clássicas. Tais hipóteses têm a relevante função de permitir que, ao utilizar uma amostra aleatória, a interpretação dos resultados seja extrapolada de forma ampla e generalizada e de garantir que as propriedades dos estimadores MQO sejam mantidas.

Quando há respeito a essas hipóteses, os estimadores MQO são considerados os melhores estimadores lineares não viesados, ou seja, MQO é não viesado, consistente e eficiente. Entretanto, quando as hipóteses são violadas surgem alguns problemas. Essa violação pode ocorrer por distintas razões, tais como: problemas com regressores, com o termo de erro ou com coeficientes de inclinação.

Um dos problemas com regressores refere-se à correlação entre as variáveis explicativas e o termo de erro. Quando se estima a equação via MQO se supõe que a média condicional é zero, tal como: $E[u|x] = 0$

Considerando um modelo de regressão linear simples, tal como a equação 30:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + u \quad 30$$

Onde o parâmetro β_1 mostra como a variável y responde a variações em x , mantendo tudo mais constante. Essa interpretação só fará sentido se for considerado que as demais variáveis que afetam y e que estão implícitas no termo de erro, u , não apresentem correlação com x . No caso de haver suspeição de que a variável causal de interesse tem correlação com o termo de erro,

ou seja, que a hipótese de média condicional zero foi violada e, assim sendo, o estimador MQO é enviesado, tem-se presente o problema conhecido como endogeneidade. Observe que:

$$\hat{\beta}_{MQO} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta y_x + \Delta y_u}{\Delta x} = \beta_1 + \frac{\Delta y_u}{\Delta x} \quad 31$$

Se $E[u|x] = 0$, então $\frac{\Delta y_u}{\Delta x} = 0$

O problema de endogeneidade pode surgir devido: à presença de simultaneidade, ou seja, quando as variáveis explicativas e a dependente são determinadas de maneira conjunta; à presença de erros de medidas nas variáveis explicativas; à omissão de variáveis importantes na análise de regressão; quando se utiliza a variável dependente defasada como regressor; e quando se trabalha com sistemas de equações simultâneas, ou seja, quando duas ou mais relações são determinadas conjuntamente.

No presente trabalho, o problema de endogeneidade surge porque acredita-se que o problema de variáveis omitidas esteja presente, ou seja, pode haver um choque aleatórios que esteja afetando o PIB e o PLD ao mesmo tempo. Por exemplo, um choque negativo que contrai o PIB, reduz a demanda por energia e, automaticamente, afeta o preço da mesma. Ademais, percebe-se a existência de um viés de simultaneidade. Em modelos que se analisa preço e demanda é comum que exista dificuldade em definir a causalidade entre as variáveis, ou seja, quem causa quem.

Utilizar estratégias de identificação pode ser uma boa opção para solucionar o problema de endogeneidade. O uso de variáveis instrumentais, que é uma estratégia de identificação, permite que um estimador consistente seja obtido. Essas variáveis instrumentais são correlacionadas com a variável de interesse, contudo, não afetam diretamente a variável dependente. Logo, a variável instrumental só consegue afetar a variável dependente por meio de sua influência sobre a variável explicativa de interesse. A ideia básica da estratégia é substituir os valores atuais de x por valores preditos.

Esses valores preditos para x , ou seja, os instrumentos, devem possuir as seguintes características:

- Ser relacionados à x , ou seja, ser informativos e;

- Não ter correlação com y , logo, não possuir correlação com o termo de erro, ou seja, serem válidos.

Possuindo as características citadas, um estimador consistente para β é obtido. Algebricamente o estimador de variáveis instrumentais é obtido a partir da estimativa de duas equações simultaneamente, tal como:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 Z + \alpha_2 W + u_1 \quad 32$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 Z + \beta_2 W + u_2 \quad 33$$

Onde Z é a matriz de instrumentos e W é um conjunto de variáveis de controle exógenas. Logo, o estimador de variáveis instrumentais é dado pela seguinte razão:

$$\rho = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad 34$$

Quando a equação básica é estimada, é possível dividir a matriz de regressores, X , em: $X = [X_1 \ X_2]$, onde X_1 representa as variáveis exógenas e X_2 representa as variáveis endógenas. Além disso, a matriz de variáveis instrumentais também pode ser dividida, tal como: $Z = [Z_1 \ Z_2]$, ou seja, os instrumentos dos regressores exógenos são as próprias variáveis.

Observe que:

- X é uma matriz de dimensões " $n \times k$ ", ou seja, contém " n " observações de " k " variáveis;
- X_1 é uma matriz " $n \times r$ ", com $r < k$;
- X_2 é uma matriz " $n \times (k - r)$ ";
- Z_1 é uma matriz " $n \times (1 - r)$ ";

Se $1 = k$, as matrizes X_2 e Z_1 possuirão o mesmo número de colunas e assim, pode-se dizer que o sistema é exatamente identificado. Todavia, ao passo que o número de variáveis instrumentais aumenta, $1 > k$, o modelo passa a ser sobreidentificado. Nesse caso, o uso do método de Mínimos Quadrados em dois Estágios (MQ2E) pode ser uma boa opção.

O MQ2E é obtido pela dupla aplicação do método MQO. No primeiro estágio faz-se a regressão de cada variável da matriz X como função das variáveis em Z , no intuito de obter os valores

ajustados, \hat{X} . No segundo estágio, faz-se a regressão da variável dependente, Y , como função de \hat{X} a fim de obter o vetor ρ .

O estimador MQ2E identifica de que forma o componente da variável de interesse, que é determinado pelo instrumento, impacta a variável dependente. Algebricamente, o estimador MQ2E é definido por:

$$\hat{\beta}_{MQ2E} = [X'Z(Z'Z)^{-1}Z'X]^{-1}[X'Z(Z'Z)^{-1}Z'y] \quad 35$$

Ou

$$\hat{\beta}_{MQ2E} = [X'P_ZX]^{-1}[X'Z(Z'Z)^{-1}Z'y] \quad 36$$

Onde: $P_Z = (Z'Z)^{-1}Z'$

Alguns testes de especificação devem ser realizados quando se utiliza o método de estimação MQ2E a fim de verificar a robustez dos instrumentos utilizados. Primeiramente, faz-se um questionamento quando a endogeneidade da variável de interesse. O teste que deve ser aplicado é o teste de Durbin-Wu-Hausman (HAUSMAN, 1978). A hipótese nula desse teste é que a variável de interesse pode ser tratada como exógena. Caso a hipótese nula seja aceita, o estimador via MQ2E ainda pode ser considerado consistente. Contudo, será menos eficiente que o MQO.

A validade dos instrumentos utilizados pode ser verificada por meio da estatística J de Sargan-Hansen (SARGAN, 1958; HANSEN, 1982) e do teste C de ortogonalidade (EICHENBAUM *et al.*, 1988). O primeiro tem como hipótese nula que o conjunto de instrumentos adicionados é informativo e o segundo identifica se os subconjuntos das variáveis utilizadas como instrumentos independem do termo de erro, ou seja, se os instrumentos são válidos.

Mesmo comprovando a validade dos instrumentos, os mesmos ainda podem ser considerados fracos. Para tanto, aplica-se o teste de instrumentos fracos proposto por Stock e Yogo (2005), baseado na estatística de Cragg Donald. A hipótese nula deste teste é de que os instrumentos são fracos. Dessa forma, se a estatística obtida for menor do que os valores críticos do teste há indicativo de que os instrumentos são considerados fracos.

O Método dos Momentos Generalizados (GMM) é um estimador considerado assintoticamente mais eficiente do que o MQ2E na presença de heterocedasticidade. Contudo, no presente trabalho indica-se a adoção de estimadores de variáveis instrumentais no contexto do método MQ2E, visto que os erros são considerados homocedásticos. Ademais, cabe destacar que devido ao tamanho reduzido da amostra, o método GMM pode ter propriedades fracas, sendo mais adequado o método MQ2E.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De maneira semelhante ao que fizeram Ladeira (2014) e Silva e Cerqueira (2017) pressupôs-se que as variáveis representando a renda, o consumo de energia no ACL e a variável dependente defasada em um período, **PIB**, **CONS** e **PLD_{t-1}**, respectivamente, são endógenas.

Ao considerar o PIB como variável endógena acredita-se que o problema de variáveis omitidas esteja presente, ou seja, pode haver um choque aleatório que esteja afetando a renda e o PLD ao mesmo tempo. Por exemplo, um choque negativo que contrai o PIB reduz a demanda por energia que automaticamente afeta o preço da mesma. Com relação ao consumo, supôs-se que o mesmo fosse endógeno devido a existência de simultaneidade. Existe uma dificuldade em definir se é o consumo que causa o preço ou é o preço que causa o consumo.

Ademais, foi incluída também como regressor endógeno a variável dependente defasada, **PLD_{t-1}**. O uso da variável dependente defasada como regressor é frequente em séries de tempo. Geralmente utiliza-se no intuito de modelar a persistência e é considerada uma estratégia robusta para resolver o problema de autocorrelação dos resíduos. Acredita-se que o PLD defasado tem uma relação direta com o PLD atual, ou seja, o preço da energia em períodos passados tem impactos sobre o preço atual. Isso ocorre devido a existência de persistência parcial do valor de uma variável ao longo do tempo, isto é, seu valor em um determinado período tem relação com os valores assumidos em períodos passados.

As variáveis representando a geração de energia por fonte no **ACL**, **BIO**, **EOL**, **PCH** e **HIDRO**, foram consideradas com um perfil mais exógeno. Isso justifica-se pelo fato de que a oferta da maior parte dessas usinas não atende o ACL exclusivamente. Muitas delas se viabilizam via mercado regulado, ou seja, dependem da existência de contratos de longo prazo estabelecidos no ACR, estes é que vão determinar quanto de energia estará disponível para ser

negociada no ACL. Já o preço dos insumos óleo diesel e gás natural, **POLEO** e **PGNV**, podem ser considerados exógenos porque dependem significativamente de choques internacionais. Quando os preços estão elevados, produzir energia via essas fontes se torna bastante oneroso.

Na busca por um estimador consistente, devido a presença de endogeneidade no modelo, optou-se pelo uso do método chamado Mínimos Quadrados em dois estágios (MQ2E) que é baseado no uso de variáveis instrumentais. Os instrumentos utilizados nas estimações devem ser não correlacionados com o termo de erro e as variáveis explicativas defasadas contam com essa propriedade.

Portanto, os instrumentos para as variáveis **PIB**, **CONS** e **PLD_{t-1}** foram os seus valores defasados em 6 períodos, **L.PIB**, **L2.PIB**, **L3.PIB**, **L4.PIB**, **L5.PIB**, **L6.PIB**; **L.CONS**, **L2.CONS**, **L3.CONS**, **L4.CONS**, **L5.CONS**, **L6.CONS** e; **L2.PLD**, **L3.PLD**, **L4.PLD**, **L5.PLD**, **L6.PLD**, **L7.PLD**, respectivamente¹⁷. Essa estratégia de utilizar as defasagens como instrumentos foi utilizada por Silva e Cerqueira (2017) e Ladeira (2014) em trabalhos semelhantes ao presente. Além desses, outros trabalhos na área de macroeconomia também se valem da mesma estratégia, como é o caso de Clarida, Gali e Gertler (1998, 2000), por exemplo.

Alguns testes de especificação foram efetuados antes de dar prosseguimento à estimativa via MQ2E. O primeiro, é o teste de erro de especificação da regressão de Ramsey (*RESET*). O mesmo é um teste geral e bem conhecido que se mostra eficaz na detecção de não linearidades (KENNEDY,2013).

Parte do pressuposto de que se existirem erros de especificação, decorrentes de variáveis omitidas, incorreção na forma funcional ou correlação entre as variáveis explicativas e o erro, a hipótese de média condicional zero do termo de erro não é satisfeita. Caso isso ocorra, nenhuma função não linear das variáveis explicativas será significativa quando acrescentada ao modelo inicial. A hipótese nula do referido teste é de que inexistem não linearidades negligenciadas. Conforme pode ser visto na tabela 7, a hipótese nula do teste foi aceita, podendo assim inferir-se que a equação está adequadamente especificada.

¹⁷ Como o presente ensaio utilizar dados mensais, o ideal seria trabalhar com mais defasagens, até 12 defasagens, mas o número reduzido de observações inviabiliza isso.

Tabela 7- Testes de erro de especificação da regressão, teste de heterocedasticidade e teste de autocorrelação.

Ramsey/Pesaran-Taylor RESET test	
Test uses square of fitted value of y ($\hat{X} \cdot \hat{\beta}$) Ho: $E(y X)$ is linear in X	
Wald test statistic: Chi-sq	0,10
P-value:	0,753
Teste para presença de Heterocedasticidade - Ho: Erros são homocedásticos	
Pagan-Hall general test statistic: Chi-sq	23,479
P-value:	0,216
White/Koenker nR2 test statistic	22,56
P-value	0,207
Teste para presença de Autocorrelação - H0: ausência de autocorrelação de 1º ordem	
Breusch-Godfrey LM test: Chi-sq	0,073
P-value:	0,073
Cumby-Huizinga test	12,56
P-value	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda na tabela 7 verifica-se, por meio da estatística dos testes de Pagan-Hall e White/Koenker, que não há presença de heterocedasticidade no termo de erro. Tal fato, indica que o uso do método MQ2E é adequado. Além disso, o teste Breusch-Godfrey e Cumby-Huizinga mostram a presença de autocorrelação de erros de 1ª ordem. Sendo assim, o modelo robusto deve ser utilizado para corrigir a autocorrelação identificada.

Os principais resultados das estimações econométricas são mostrados na Tabela 8. Como trata-se de um modelo sobreidentificado, ou seja, existe mais de um instrumento para cada variável endógena, é possível testar a validade dos instrumentos utilizados. Para tanto, dois testes podem ser conduzidos: teste de Sargan-Hansen (SARGAN, 1958; HANSEN, 1982) e o teste de ortogonalidade (EICHENBAUM *et al.*, 1988). O primeiro, é utilizado no intuito de identificar se os instrumentos utilizados, além daqueles já identificam exatamente os coeficientes, são informativos. Como pode ser verificado, o teste apresentou um p-valor de 0,997, ou seja, a hipótese nula foi aceita, o que demonstra que os instrumentos são de fato informativos, ou seja, correlacionados com as variáveis endógenas.

Para verificar se os instrumentos utilizados são válidos, ou seja, independentes do termo de erro, foi implementado o Teste C de ortogonalidade (EICHENBAUM *et al.*, 1988). No presente trabalho, é possível verificar se as defasagens das variáveis endógenas, **PIB**, **CONS**, e **PLD_{t-1}** são de fato independentes. A hipótese nula do teste sugere que os instrumentos são

válidos e os resultados para os dados da análise, apresentados na tabela 8, mostram que os instrumentos são independentes do termo de erro.

Tabela 8 - Resultados das regressões estimadas por meio do método MQ2E.

PLD	Coef.	Des. Pad.	z	P> z
PLD _{t-1}	0,611	0,068	8,980	0,000***
CONS	0,695	0,525	1,320	0,186
PIB	1,925	2,225	0,870	0,387
EOL	-0,309	0,105	-2,950	0,003***
BIO	0,754	0,084	8,940	0,000***
PCH	-1,881	0,250	-7,510	0,000***
HIDRO	0,023	0,017	1,370	0,170
POLEO	-1,727	1,328	-1,300	0,194
PGNV	0,671	0,353	1,900	0,057**
d_jan	0,848	0,131	6,470	0,000***
d_fev	0,848	0,175	4,840	0,000***
d_mar	0,763	0,185	4,130	0,000***
d_abr	0,031	0,181	0,170	0,866
d_mai	-0,030	0,191	-0,160	0,876
d_jun	-0,508	0,151	-3,360	0,001***
d_jul	-0,383	0,167	-2,290	0,022***
d_ago	-0,592	0,198	-2,990	0,003***
d_set	-0,433	0,169	-2,570	0,010***
d_out	-0,403	0,119	-3,400	0,001***
d_nov	-0,248	0,068	-3,670	0,000***
_cons	-15,187	31,897	-0,480	0,634
Crag- Donald Estatística F:				46,810
Valores críticos de Stock- Yogo (viés relativo):				
5%				19,29
10%				10,52
20%				5,94
30%				4,32
Estatística J de Sargan- Hansen:				4,033
p-valor:				0,997
Teste C de ortogonalidade dos instrumentos:				1,624
p-valor:				0,999
Instrumentos testados: L.PIB, L2.PIB, L3.PIB, L4.PIB, L5.PIB, L6.PIB, L.CONS, L2.CONS, L3.CONS, L4.CONS, L5.CONS, L6.CONS, L2.PLD, L3.PLD, L4.PLD, L5.PLD, L6.PLD, L7.PLD				
Total (centralizado) SS: 35,484		Obs: 65	R2 centralizado: 0,880	
Total (não centralizado) SS:2130,06		Prob > F: 0,000	R2 não centralizado: 0,998	
Resíduo SS: 4,238		F(20, 44): 384,10	Root MSE: 0,264	

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: *, ** e *** indicam significância estatística de 10%, 5% e 1%, respectivamente.

Não obstante os instrumentos serem considerados válidos, eles podem ser fracos e caso isso ocorra os resultados serão enviesados (STAIGER; STOCK, 1997). Para realizar o diagnóstico de robustez dos instrumentos, foi utilizado o teste proposto por Stock e Yogo (2005), que baseia-se na estatística de Cragg-Donald (1993). A hipótese nula é de que os instrumentos são fracos. Como é possível perceber por meio dos resultados apresentados na tabela 8, a estatística do teste foi superior aos valores críticos, o que demonstra que os instrumentos não podem ser considerados fracos.

Os resultados do modelo mostram que os coeficientes das variáveis representando a geração de energia por meio das fontes eólica, biomassa e PCH's, **EOL**, **BIO**, **PCH's**, possuem representatividade estatística a 1% de significância. Com relação a biomassa, o sinal do coeficiente foi positivo. Os resultados apontam que um aumento de 10% na quantidade de energia gerada dessa fonte tende a elevar o PLD em aproximadamente 7,5%.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a maior parte da energia gerada por meio de biomassa advém do bagaço da cana de açúcar. Sendo assim, uma possível quebra na safra desta pode afetar a geração de energia, pode haver um aumento nos preços caso a demanda pelo produto aumente muito, refletindo no preço da energia distribuída.

Em contrapartida, o sinal do coeficiente das variáveis **EOL** e **PCH's** foi negativo. Nesse caso, um aumento de 10% na geração via usinas eólicas e PCH's tende a reduzir o PLD em 3,1% e 18,8%, respectivamente. Esse resultado é o esperado, visto que o aumento da participação dessas fontes na matriz energética implica aumento da competitividade e possíveis ganhos de escala, refletindo no preço final da energia.

A variável representando o preço do gás natural, **PGNV**, também teve representatividade estatística e apresentou sinal positivo, conforme o esperado. Isso demonstra que um aumento no preço do insumo gás natural tem efeitos sobre os custos operacionais que refletem nos preços finais para o consumidor. Em contrapartida, a variável representando o preço do óleo diesel, **POLEO**, não teve representatividade estatística, assim como a variável representando a renda, **PIB**, o consumo, **CONS** e a variável representando a geração de hidrelétricas de grande porte, **HIDRO**.

A variável representando o PLD defasado, PLD_{t-1} , se mostrou estatisticamente significativa a 1% e obteve um sinal positivo. Isso demonstra que um aumento em 10% no valor do PLD no mês anterior tende a elevar o PLD no mês atual em 6,1%.

4.6 CONCLUSÃO

O elevado valor das tarifas de energia elétrica tem afetado boa parte dos consumidores brasileiros, principalmente as grandes indústrias que estão entre os maiores. A energia é um insumo crucial para todas as cadeias produtivas e possui peso considerável nos custos das empresas. A indústria brasileira paga uma das tarifas de energia mais caras do mundo. Com um insumo tão caro, além dos impactos financeiros para o consumidor, a produtividade e a competitividade das indústrias reduzem, afetando o desenvolvimento e crescimento do país. Na tentativa de driblar os elevados preços cobrados pelas distribuidoras de energia elétrica, muitos consumidores têm migrado para ACL.

Considerando o papel relevante do ACL brasileiro como propulsor no desenvolvimento sustentável, visto que fomenta a produção de energia limpa e renovável, e do PLD como sinalizador econômico para o comportamento dos agentes, o presente ensaio analisou se a geração de energia a partir de fontes renováveis não convencionais impacta sobre o preço de final da energia elétrica. Considerou-se a hipótese de que uma maior inserção de fontes renováveis não convencionais na matriz energética brasileira pode auxiliar na redução da dependência das hidrelétricas e das termelétricas, trazendo maior estabilidade para o sistema e reduzindo custos que conseqüentemente impactam no valor final do PLD.

Por meio de uma análise de séries temporais para o horizonte temporal 2013-2018, estimou-se um modelo MQ2E para analisar o impacto das fontes de energia renováveis sobre o preço da energia no ACL. De modo geral, foi possível concluir que a geração via usinas eólicas, a biomassa e PCH's aparentam ter influência sobre os preços da energia elétrica mensurados pelo PLD.

A variável representando as usinas eólicas e PCH's tiveram representatividade estatística e apresentaram sinal negativo. Isso quer dizer que um aumento no uso dessas fontes tende a reduzir o PLD. Essas usinas têm grande relevância na matriz energética brasileira, visto que possuem características que atendem as exigências do desenvolvimento do atual século, ou seja,

possuem impactos ambientais bastante reduzidos, principalmente com relação as fontes convencionais de energia, possuem viabilidade econômica e são capazes de contribuir para o desenvolvimento social.

O coeficiente positivo da variável representando a geração via usinas a biomassa indica que um aumento na geração desta reflete em um aumento do PLD. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a maior parte da energia advinda desta fonte no Brasil ocorre por meio do uso do bagaço da cana. Sendo assim, uma possível quebra na safra da cana-de-açúcar pode afetar a geração de energia nessas usinas e conseqüentemente causar um impacto nos preços da energia comercializada.

A variável representando o preço do insumo gás natural também teve representatividade estatística. O sinal positivo é um indicativo de que quando o preço desse insumo se eleva, o PLD também tende a aumentar, o que faz sentido visto que os custos operacionais são aumentados e conseqüentemente repassados para os preços finais. As variáveis representando a renda, o consumo e o preço do insumo óleo diesel não obtiveram representatividade estatística.

É preciso considerar que os testes econométricos são apenas indicações de que a inserção de fontes renováveis não convencionais, em particular a eólica e PCH's, têm efeitos sobre os preços da energia elétrica distribuída. Os resultados obtidos nesse ensaio devem ser vistos com cautela, tendo em vista que a amostra utilizada é bastante restrita. Outros estudos realizados na área lidam com um número maior de observações, pois geralmente contam com dados diários, o que não acontece no caso do presente ensaio que trabalha com dados mensais.

Em que pese as limitações na realização deste trabalho, acredita-se que investir cada vez mais em fontes alternativas de energia traz inúmeras vantagens relacionadas tanto a questões ambientais, como também à redução das incertezas do consumidor em relação aos preços. A energia elétrica a um preço justo promove o desenvolvimento do país. A indústria se torna mais competitiva, conseqüentemente a produção aumenta, há mais geração de empregos e aumento do consumo, proporcionando benefícios para toda a sociedade.

A inserção dessas fontes em grande escala aumenta a segurança no suprimento de energia e reduz a necessidade de ativar as usinas termelétricas. Apesar do custo de implementação de

usinas com base em fontes renováveis ainda ser elevado em relação as demais, os custos de operação são muito mais baixos o que indica que o consumidor tem possibilidades de adquirir energia a preços módicos. Os resultados do presente trabalho indicam a necessidade de os governos estimularem cada vez mais as fontes renováveis não convencionais, principalmente a eólica, tendo em vista que o aumento na demanda dessa fonte tende a reduzir o preço da energia distribuída.

Para trabalhos futuros sugere-se ampliar o tamanho da amostra. Os dados referentes ao PLD estão disponíveis semanalmente. O mesmo não ocorre para os dados sobre a geração via fontes renováveis e consumo no ACL. Entretanto, cabe ressaltar que esses dados existem e estão sob responsabilidade da CCEE. Infelizmente, por questões institucionais, eles não foram disponibilizados para a realização do presente estudo. À medida em que mais dados tornem-se disponíveis, testes mais robustos poderão ser realizados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade de reduzir a dependência energética, alcançar a autossuficiência na geração, bem como garantir acesso a energia à população e mitigar os impactos ambientais ocasionados por fontes de origem fóssil têm fortalecido as iniciativas de uso de fontes renováveis não convencionais. Em que pese todos os esforços dispendidos para fomentar e ampliar a participação dessas fontes na matriz energética, as mesmas ainda enfrentam algumas dificuldades para se estabelecerem no mercado mundial, inclusive no Brasil. A presente tese tem como objetivo geral analisar algumas dessas dificuldades. Para tanto, está dividida em três ensaios, sendo que cada um deles representa um desafio específico para a consolidação das fontes renováveis não convencionais na matriz energética mundial.

O primeiro ensaio analisou o impacto da qualidade institucional sobre os custos dos investimentos privados em fontes renováveis não convencionais. Faz uma análise com dados *cross-section* para projetos de geração de energia em países em desenvolvimento. Os resultados obtidos indicam que um arcabouço institucional robusto tem papel relevante no aumento da competitividade dessas fontes de energia, conferindo vantagens de custos significativas para os países com indicadores mais elevados de governança e de ambiente de negócios.

O resultado constitui argumento favorável ao fortalecimento das instituições e a redução das limitações no ambiente de negócios, a fim de reduzir o custo dos investimentos e consolidar as fontes renováveis de energia na matriz energética de países em desenvolvimento. O fortalecimento do arcabouço institucional viabiliza a participação dos indivíduos na seleção e nas decisões dos governos. Tal fato abre espaço para que assuntos relacionados a questões ambientais e energéticas sejam discutidos com maior frequência e com a devida atenção. Governos mais eficazes são fundamentais para que o compromisso com políticas energéticas seja demonstrado. Regulamentações sólidas permitem e promovem o desenvolvimento do setor privado, estimulando os investimentos em fontes de energia renováveis.

O segundo ensaio avaliou a eficiência técnica de projetos de energia eólica brasileiros em operação comercial. Inicialmente, identificou-se quais projetos estão sobre a fronteira de eficiência e posteriormente aponta alguns fatores como determinantes da eficiência dos referidos projetos. Verificou-se que as pontuações de eficiência técnica obtidas indicam um nível de eficiência relativamente elevado. Contudo, os projetos eólicos poderiam ter gerado em média 16% a mais de energia do que de fato geraram, usando os mesmos insumos. Ou ainda, poderiam ter reduzidos o uso dos insumos em aproximadamente 16% mantendo o mesmo nível de geração de energia. A maioria dos projetos com níveis de eficiência superiores a 90% estão localizados no nordeste do Brasil, o que destaca a singularidade dos ventos dessa região, responsável por atrair cada vez mais investimentos e, por conseguinte, estimular o desenvolvimento tecnológico do setor eólico.

A idade dos parques, o número de aerogeradores e a altura dos aerogeradores são variáveis capazes de afetar os escores de eficiência dos projetos, sendo que esta última é a variável que afeta os escores de eficiência dos projetos em maior magnitude. Quando a altura do aerogeradores é aumentada é possível captar ventos constantes, menos turbulentos e com velocidades mais elevadas, fatos que contribuem para elevar a geração de energia. Além disso, áreas que antes não ofereciam condições ideais para geração de energia podem ser tornar adequadas com o aumento da altura dos aerogeradores. Nesse sentido, o processo de substituir as turbinas existentes por novas pode ser uma solução para que os projetos tenham sua vida útil ampliada e melhorem seu desempenho.

O processo de substituição dos aerogeradores também tem a vantagem de causar menor impacto ambiental quando comparado com a implementação de um novo projeto iniciado do

zero, isso porque boa parte da infraestrutura, conexões à rede e dados de operação podem ser reutilizados. Entretanto, esse procedimento não pode deixar de considerar o custo de implementação das novas torres, o período de duração do processo, o tipo de financiamento escolhido, entre outros fatores que podem tornar o investimento inviável.

O terceiro ensaio, por meio de séries de tempo e um modelo baseado em variáveis instrumentais, analisou se a introdução de fontes renováveis não convencionais no Brasil proporciona preços mais acessíveis aos consumidores. Verificou-se que a geração via usinas eólicas e PCH's tiveram relevância estatística e apresentaram sinal negativo, indicando que um aumento na geração de energia por meio dessas fontes tende a reduzir o PLD. A variável representando a geração via usinas a biomassa também se mostrou estatisticamente relevante, porém apresentou sinal positivo, o que pode ser justificado pelo fato de que a maior parte da energia a biomassa gerada no Brasil advém da cana-de-açúcar, e desta forma, quebras na safra da mesma podem ter impactos sobre os preços da energia comercializada.

Ademais, destaca-se que o preço do gás natural teve representatividade estatística e apresentou sinal positivo, indicando que um aumento no preço desse insumo tende a elevar os custos operacionais das usinas e isso pode ser transferido para o preço cobrado do consumidor final. As variáveis representando a geração de hidrelétricas de grande porte e o preço do óleo diesel não tiveram representatividade estatística, assim como as variáveis representando a renda e o consumo via fontes renováveis no ACL.

Os resultados demonstram a importância em cada vez mais se investir em fontes limpas de energia. As usinas eólicas e PCH's são boas alternativas para substituir a geração via usinas hidrelétricas de grande porte. Apesar de serem consideradas renováveis, as hidrelétricas de grande porte apresentam impactos ambientais e sociais expressivos, devido aos grandes desmatamentos para construção das usinas, bem como pelo fato de desapropriar áreas onde vivem inúmeras famílias.

Cabe ressaltar que os resultados encontrados nas estimações devem ser tomados com muita cautela, tendo em vista as limitações com relação ao número de observações analisadas e ao restrito horizonte temporal, principalmente para o segundo e terceiro ensaios desta tese. Os resultados obtidos devem ser entendidos como indicações e não como medidas exatas do

impacto dos aspectos analisados na consolidação das fontes de energia renováveis não convencionais na matriz energética.

Como agenda para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar a análise feita neste trabalho, incluindo outros aspectos que possam ser considerados entraves na alavancagem do setor. Com relação ao estudo que analisou o papel institucional, é possível fazer uma análise conjunta para países em desenvolvimento e desenvolvidos a fim de comparar a relevância do arcabouço institucional em contextos econômicos e sociais distintos. Quanto ao estudo que analisa os determinantes da eficiência dos parques eólicos é conveniente estender a análise para outras fontes renováveis, além disso analisar o desempenho das usinas de fontes renováveis entre países também parece ser uma atividade interessante. Por fim, quanto ao trabalho relacionado aos impactos das fontes renováveis sobre os preços sugere-se ampliar o tamanho da amostra. À medida que mais dados se tornem disponíveis, testes mais robustos poderão ser realizados.

O benefício do uso de fontes alternativas não convencionais está bastante relacionado a preservação dos recursos naturais. No entanto, o mercado de fontes de energia renováveis traz benefícios para além da questão ambiental, promove a criação de empregos, gera incentivos à inovação, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias avançadas. Todos esses fatores são essenciais à promoção do desenvolvimento econômico e social, ao acesso da população à energia, à garantia da segurança energética, à mitigação das alterações climáticas e à redução de problemas ambientais e também de saúde dos indivíduos causados devido aos elevados níveis de poluição.

Finalmente, verifica-se a importância de os governos estimularem cada vez mais a participação de fontes renováveis na matriz energética. Apesar de todas as dificuldades que o processo de inserção das fontes renováveis ainda enfrenta, o uso dessas fontes é a alternativa mais adequada e absolutamente necessária para que seja possível atender as necessidades das presentes gerações sem, contudo, causar prejuízos à capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades.

REFERÊNCIAS

- ABEL, Lecir. **Avaliação cruzada da produtividade dos departamentos acadêmicos da UFSC utilizando DEA (Data Envelopment Analysis)**. 2000.106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**.2012. Disponível em:<
<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>>. Acesso em: 20 de nov.2018.
- _____. **Consulta processual**. 2018a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/consulta-processual>>. Acesso em: 01 set. 2018.
- _____. **Leilões de geração**.2018b. Disponível em:< <http://www.aneel.gov.br/geracao4>>. Acesso em: 10 out. 2018.
- AIGNER, Dennis; LOVELL, C.A Knox; SCHMIDT, Peter. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. **Journal of econometrics**, v. 6, n. 1, p. 21-37, 1977.
- ALMEIDA, Paulo. N.A. Análise de fronteira estocástica de produção. In: MALBOUISSON, Cláudia; TIRYAKI, Gisele Ferreira (Org.). **Econometria na prática**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. p. 379-417.
- ALVES, Jose Jakson Amâncio. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 6, n. 1, 2010.
- ALMEIDA, Mariana. R.; MARIANO, Enzo. B.; REBELATTO, Nascimento. Análise por envoltória de dados: evolução e possibilidades de aplicação. SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS. Bauru, 2015.
- AMBIENTE ENERGIA. **Primeira usina geotérmica da América do Sul é conectada à rede**.2017. Disponível em:
<<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2017/04/primeira-usina-geotermica-da-america-sul-e-conectada-rede/31384#.XBkx8UpFzIU>>. Acesso em: 02 jun.2018.
- ANDRADE, Cláudia.S. M; TIRYAKI, Gisele.F. **Econometria na prática**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017. 480p.
- ANP. **Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis**. 2019. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-do-levantamento-de-precos-e-de-margens-de-comercializacao-de-combustiveis>>. Acesso em: 02 jan. 2019.
- AQUILA, Giancarlo; PAMPLONA, Edson. O.; DE QUEIROZ, Anderson. R.; JÚNIO, Paulo. R.; FONSECA, Marcelo. N. **Análise de políticas de incentivos para o aproveitamento de energias renováveis e as experiências no Brasil**. 2016. Disponível em:<

http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_234_364_28810.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA - ABEEÓLICA. **Boletim anual da geração eólica**. 2018. Disponível em:<http://www.abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2017/05/424_Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2018_Alta.pdf>. Acesso em: 01 nov.2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA - ABRACEEL. **O novo setor elétrico**.2018. Disponível em:<<https://view.joomag.com/revista-abraceel-2018-revista-abraceel-2018/0971609001522262187?short>>. Acesso em: 01 nov.2018.

AZAMBUJA, Ana Maria V. **Análise de eficiência na gestão do transporte urbano por ônibus em municípios brasileiros**. 2002. 410f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção)- Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2002.

BALLESTER, Cristina; FURIÓ, Dolores. Effects of renewables on the stylized facts of electricity prices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1596-1609, 2015.

BANCO CENTRAL DO BRASIL - BACEN. **Sistema gerenciador de séries temporais (SGS)**. 2019. Disponível em:<<https://www3.bcb.gov.br/sgspub/localizarseries/localizarSeries.do?method=prepararTelaLocalizarSeries>>. Acesso em: 02 jan. 2019.

BANCO MUNDIAL. **Private participation in infrastructure (PPI) project database**. Washington, 2018a. Disponível em: <<http://ppi.worldbank.org>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

_____. **Worldwide Governance Indicators (WGI)**. 2018b. Disponível em: <<http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.asp>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

_____. **World Development Indicators (WDI)**. Washington, 2018c. Disponível em: <<http://databank.worldbank.org/ddp/home.do?Step=12&id=4&CNO=2>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

BATTESE, George E. Frontier production functions and technical efficiency: a survey of empirical applications in agricultural economics. **Agricultural economics**, v. 7, n. 3-4, p. 185-208, 1992.

BAUM, Christopher F.; SCHAFFER, Mark E.; STILLMAN, Steven. Instrumental variables and GMM: Estimation and testing. **The Stata Journal**, v. 3, n. 1, p. 1-31, 2003.

_____. Enhanced routines for instrumental variables/generalized method of moments estimation and testing. **The Stata Journal**, v. 7, n. 4, p. 465-506, 2007.

BELSLEY, David A.; KUH, Edwin; WELSCH, Roy.E. **Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity**. New York: Wiley, 1980.292p.

BENHMAD, François; PERCEBOIS, Jacques. Wind power feed-in impact on electricity prices in Germany 2009-2013 1. **The European Journal of Comparative Economics**, v. 13, n. 1, p. 81, 2016.

BERNARD, Michelle; CRAIG, Michael; SENED, Itai. The role of institutions in the implementation of wind energy. In: ALFRED, Marcus; Shrivastava, Paul; SHARMA, Sanjay; POGUTZ, Stefano Eds. **Cross-sector leadership for the green economy**. New York: Palgrave Macmillan, 2011. p. 3-18.

BRASIL. **Decreto-lei Nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Projeto de Lei do Senado nº 232, de 2016**. 2016a. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/126049>>. Acesso em: 20 out. 2018.

_____. **Leilões de energia**. 2016b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html>. Acesso em: 19 set. 2016.

_____. **Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica- PROINFA: caminho limpo para o desenvolvimento**. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

BORENSTEIN, Severin; BUSHNELL, James B.; WOLAK, Frank A. Measuring market inefficiencies in California's restructured wholesale electricity market. **American Economic Review**, v. 92, n. 5, p. 1376-1405, 2002.

CADORET, Isabelle; PADOVANO, Flávio. The political economy of renewable energies. **Condorcet center for political economy working paper**, 2015.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE.

Comercialização. 2016. Disponível em:

<https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onDEAtuamos/comercializacao?_afLoop=1127316661269603>. Acesso em: 08 jan. 2019.

_____. **Leilões: resultados consolidados**. 2018a. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado?_adf.ctrl-state=7lagr2npq_4&_afLoop=1063037216747532#%40%3F_afLoop%3D1063037216747532%26_adf.ctrl-state%3D33kmra2ia_4>. Acesso em: 08 jun. 2018.

_____. **Ambiente livre e ambiente regulado**. 2018b. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_adf.ctrl-state=ifx890x49_1&_afLoop=651681346496536#!%40%40%3F_afLoop%3D651681346496536%26_adf.ctrl-state%3Difx890x49_5>. Acesso em: 08 jun.2018.

_____. **Informações ao mercado**. 2019. Disponível em: <
https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado?_adf.ctrl-state=ifx890x49_76&_afLoop=652529415625385#!>. Acesso em: 08 jan.2019.

CANTO, Miguel. A. da C. **Mensuração e análise da eficiência técnica de produção do setor metal-mecânico da indústria de Caxias do Sul**. 2002. 91f. Dissertação (Mestrado profissionalizante em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

CARVALHO, André C; VIEGAS, Socorro de F. S. S.; CARVALHO, David. F. **INSTITUIÇÕES, GOVERNANÇA E MECANISMOS DE GOVERNANÇA AMBIENTAL**. Colóquio Organizações, Desenvolvimento e Sustentabilidade-CODS, v. 5, n. 1, p. 281-303, 2016.

CASA NOVA, Silvia Pereira de Castro. **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis**. 2002. 350f. Tese (Doutorado em Contabilidade e Controladoria) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP, São Paulo, 2002.

CASTIGLIONE, C.; INFANTE, D.; SMIRNOVA, J. **Institutional enforcement, environmental quality and economic development: a panel VAR approach**. Disponível em: <
<https://core.ac.uk/download/pdf/81839036.pdf>>. Acesso em: 15 de jun. 2018.

CHARNES, Abraham. W. *et al.* Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. **Journal of econometrics**, v. 30, n. 1-2, p. 91-107, 1985.

CLARIDA, Richard; GALI, Jordi; GERTLER, Mark. Monetary Policy Rules in Practice: Some International Evidence. **European Economic Review**. v.42, n. 6, 1998. p.1033 - 1067.

_____. Monetary policy rules and macroeconomic stability: evidence and some theory. **The Quarterly journal of economics**, v. 115, n. 1, p. 147-180, 2000.

COASE, Ronald H. The nature of the firm. **Economica**. v. 4, n. 16, p. 386-405, 1937.

_____. The new institutional economics. **The American Economic Review**, v. 88, n. 2, p. 72-74, 1998.

COLE, Matthew A. Corruption, income and the environment: an empirical analysis. **Ecological Economics**, v. 62, n. 3-4, p. 637-647, 2007.

CORNWELL, Christopher; SCHMIDT, Peter; SICKLES, Robin C. Production frontiers with cross-sectional and time-series variation in efficiency levels. **Journal of econometrics**, v. 46, n. 1-2, p. 185-200, 1990.

COUTURE, Toby; GAGNON, Yves. An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 955-965, 2010.

CRACOLICI, Maria Francesca; CUFFARO, Miranda; NIJKAMP, Peter. The measurement of economic, social and environmental performance of countries: a novel approach. **Social indicators research**, v. 95, n. 2, p. 339, 2010.

CRAGG, John G.; DONALD, Stephen G. Testing identifiability and specification in instrumental variable models. **Econometric Theory**, v. 9, n. 2, p. 222-240, 1993.

CUBEROS, Fábio Luiz. **Novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro**: análise dos mecanismos de mitigação de riscos de mercado das distribuidoras. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2008.

CULAS, Richard J. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective. **Ecological Economics**, v. 61, n. 2-3, p. 429-437, 2007.

CUNHA, Ulisses Silva; MACHADO, Sebastião do A; FIGUEIREDO FILHO, Afonso. Uso de análise exploratória de dados e de regressão robusta na avaliação do crescimento de espécies comerciais de terra firme da Amazônia. **Rev. Árvore**. Viçosa, v. 26, n. 4, p. 391-402, ago./ 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622002000400001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 nov. 2018.

DARAIIO, Cinzia; SIMAR, Léopold. Advanced robust and nonparametric methods in efficiency analysis: methodology and applications. **Springer Science & Business Media**, 2007.

DEBREU, G. The coefficient of resource utilization. **Econometrica**. v. 19, p. 273-292, (1951).

DE MIERA, Gonzalo Sáenz; DEL RÍO GONZÁLEZ, Pablo; VIZCAÍNO, Ignacio. Analysing the impact of renewable electricity support schemes on power prices: The case of wind electricity in Spain. **Energy Policy**, v. 36, n. 9, p. 3345-3359, 2008.

DI VITA, Giuseppe. Legal families and environmental protection: Is there a causal relationship?. **Journal of Policy Modeling**, v. 31, n. 5, p. 694-707, 2009.

DOMAH, Preetum. **Technical efficiency in electricity generation**: the impact of smallness and isolation of island economies. Cambridge: University of Cambridge, 2004. (Cambridge Working Papers in Economics).

EICHENBAUM, Martin S.; HANSEN, Lars Peter; SINGLETON, Kenneth J. A time series analysis of representative agent models of consumption and leisure choice under uncertainty. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 103, n. 1, p. 51-78, 1988.

EMROUZNEJAD, Ali; PARKER, Barnett R.; TAVARES, Gabriel. Evaluation of research in efficiency and productivity: a survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA. **Socio-economic planning sciences**, v. 42, n. 3, p. 151-157, 2008.

ESTY, Daniel C.; PORTER, Michael E. National environmental performance: an empirical analysis of policy results and determinants. **Environment and development economics**, v. 10, n. 4, p. 391-434, 2005.

FARRELL, Michael James. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)**, v. 120, n. 3, p. 253-281, 1957.

FÁVERO, Luiz. P.; Belfiore, P. P.; Silva, F. L., & Chan, B. L.. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Editora Campus.

FREDRIKSSON, Per G.; SVENSSON, Jakob. Political instability, corruption and policy formation: the case of environmental policy. **Journal of public economics**, v. 87, n. 7-8, p. 1383-1405, 2003.

GALLEGO-ALVAREZ, Isabel *et al.* Environmental performance in countries worldwide: Determinant factors and multivariate analysis. **Sustainability**, v. 6, n. 11, p. 7807-7832, 2014.

GELABERT, Liliana; LABANDEIRA, Xavier; LINARES, Pedro. An ex-post analysis of the effect of renewables and cogeneration on Spanish electricity prices. **Energy economics**, v. 33, p. S59-S65, 2011.

GIL, Hugo A.; GOMEZ-QUILES, Catalina; RIQUELME, Jesus. Large-scale wind power integration and wholesale electricity trading benefits: estimation via an ex post approach. **Energy Policy**, v. 41, p. 849-859, 2012.

GILSA, Charles Von. **Avaliação longitudinal da eficiência e fator total de produtividade em uma empresa petroquímica a partir da análise envoltória de dados (DEA) e o índice de malmquist**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012.

GOLANY, Boaz; ROLL, Yaakov; RYBAK, David. Measuring efficiency of power plants in Israel by data envelopment analysis. **IEEE transactions on engineering management**, v. 41, n. 3, p. 291-301, 1994.

GONÇALVES JÚNIOR, Carlos Alberto *et al.* Um estudo das deliberações da câmara setorial do açúcar e do álcool, usando análise de correspondência. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, n. 1, p. 183-210, 2009.

GREENE, William H. **Econometric analysis**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000. p. 201-215.

_____. The econometric approach to efficiency analysis. **The measurement of productive efficiency and productivity growth**, v. 1, n. 1, p. 92-250, 2008.

HAIR, J. F.; BLACK, W.C; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2009.

HANSEN, Lars Peter. Large sample properties of generalized method of moments estimators. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 1029-1054, 1982.

HAUSMAN, Jerry A. Specification tests in econometrics. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 1251-1271, 1978.

HUISMAN, Ronald; STRADNIC, Victoria; WESTGAARD, Sjur. **Renewable energy and electricity prices: indirect empirical evidence from hydro power**. 2013. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=2340569>>. Acesso em 20 de abr. 2018.

HU, Li-tze; BENTLER, Peter M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural equation modeling: a multidisciplinary journal**, v. 6, n. 1, p. 1-55, 1999.

HUBER, Peter J. *et al.* Robust regression: asymptotics, conjectures and Monte Carlo. **The Annals of Statistics**, v. 1, n. 5, p. 799-821, 1973.

HWANGI, Insang; VOII, Trang Lam Thuy; FINANCE, Ho Chi Minh City. Production efficiency measurement of ten Japanese electric power companies: An application of the stochastic frontier model. **Journal of economic research**, v. 21, n. 1, p. 35-65, 2016.

IGLESIAS, Guillermo; CASTELLANOS, Pablo; SEIJAS, Amparo. Measurement of productive efficiency with frontier methods: A case study for wind farms. **Energy Economics**, v. 32, n. 5, p. 1199-1208, 2010.

JACQMIN, Julien. The role of market-oriented institutions in the deployment of renewable energies: evidences from Europe. **Applied Economics**, v. 50, n. 2, p. 202-215, 2015.

JOHNSON, Paul. **The hat matrix and regression diagnostics**. 2006. Disponível em: <<http://pj.freefaculty.org/guides/stat/Regression/RegressionDiagnostics/OlsHatMatrix.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

JONDROW, James *et al.* On the estimation of technical inefficiency in the stochastic frontier production function model. **Journal of econometrics**, v. 19, n. 2-3, p. 233-238, 1982.

KAUFMANN, Daniel; KRAAY, Aart; MASTRUZZI, Massimo. The worldwide governance indicators: methodology and analytical issues. **Hague Journal on the Rule of Law**, v. 3, n. 2, p. 220-246, 2011.

KENNEDY, Peter. **A guide to econometrics**. 5. ed.. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2003.

KETTERER, Janina C. The impact of wind power generation on the electricity price in Germany. **Energy Economics**, v. 44, p. 270-280, 2014.

KOOPMANS, Tjalling C. **An analysis of production as an efficient combination of activities**. 1951. Disponível em: <<http://www.sciepub.com/reference/39504>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

KUMBHAKAR, Subal C. Production frontiers, panel data, and time-varying technical inefficiency. **Journal of econometrics**, v. 46, n. 1-2, p. 201-211, 1990.

KUMBHAKAR, Subal C.; WANG, Hung-Jen; HORNCastle, Alan P. **A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using stata**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 290 p.

LADEIRA, David Martins. **O impacto das diferentes fontes de energia renovável na evolução do preço final de eletricidade para o consumidor doméstico da UE-28**. 2014. 38 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Economia, FEUC, 2014.

LEE, L.-F. The stochastic frontier production function and average efficiency. **Journal of Econometrics**, v. 22, p. 245-267, 1978.

LEITE, André Luis da Silva; CASTRO, Nivalde José de; TIMPONI, Raul Ramos. Causas da volatilidade do preço "spot" de eletricidade no Brasil. **Ensaio FEE**, v. 34, n. 2, 2013.

LEME, Alessandro André. Reform of the electrical sector in Brazil, Argentina and Mexico: contrasts and perspectives in debate. **Revista de Sociologia e Política**, v. 17, n. 33, p. 97-121, 2009.

LINARES, Pedro; SANTOS, F. Javier; PÉREZ-ARRIAGA, I. J. Scenarios for the evolution of the Spanish electricity sector: Is it on the right path towards sustainability?. **Energy Policy**, v. 36, n. 11, p. 4057-4068, 2008.

LOPES, L. **Políticas de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica no Brasil**. 2011. 80 f. Monografia (Graduação) – UNICAMP, Campinas, São Paulo.

LOVELL, CA Knox *et al.* Production frontiers and productive efficiency. **The measurement of productive efficiency: Techniques and applications**, v. 3, p. 67, 1993.

LOVELL, CA Knox. Applying efficiency measurement techniques to the measurement of productivity change. **Journal of Productivity Analysis**, v. 7, n. 2-3, p. 329-340, 1996.

MACHADO, Mauricio Marins. **Economias de escala e eficiência na geração de energia elétrica no Brasil**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade de Brasília, UNB, Brasília, 2014.

MAIA, Vinicius Mothé *et al.* Água: único fator a influenciar o preço da energia no mercado spot?. **SOCIEDADE, CONTABILIDADE E GESTÃO**, v. 11, n. 1, 2016.

MARMOLEJO-SAUCEDO, José Antonio *et al.* Technical efficiency of thermal power units through a stochastic frontier. **Dyna**, v. 82, n. 191, p. 63-68, 2015.

MARTINS, Juliana. M. C. **Estudo dos principais mecanismos de incentivo às fontes renováveis alternativas de energia no setor elétrico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2010.

MATHSOFT, INC. **Plus**: Guide to statistics. 1997. 395 p. Disponível em: <<http://www.mathsoft.com>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MEHRARA, Mohsen; REZAEI, Sadeq; RAZI, Davoud Hamidi. Determinants of renewable energy consumption among ECO countries: based on bayesian model averaging and weighted-average least square. **International Letters of Social and Humanistic Sciences**, v. 54, p. 96-109, 2015.

MEEUSEN, Wim; VAN DEN BROECK, Julien. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. **International economic review**, p. 435-444, 1977.

MILLER, Terry; KIM, Anthony B.; ROBERTS, James M. **Index of Economic Freedom – IEF**. 2018. Disponível em: <<http://www.heritage.org/index/>>. Acesso em: 20 maio 2018.

MULDER, Machiel; SCHOLTENS, Bert. The impact of renewable energy on electricity prices in the Netherlands. **Renewable energy**, v. 57, p. 94-100, 2013.

NEWBERY, David M. Competition, contracts, and entry in the electricity spot market. **The RAND Journal of Economics**, p. 726-749, 1998.

NORTH, Douglass C. Institutions. **Journal of economic perspectives**, v. 5, n. 1, p. 97-112, 1991.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Boletim mensal de geração eólica**. 2017. Disponível em:< <http://ons.org.br/pt/paginas/resultados-da-operacao/boletins-da-operacao>>. Acesso em: 01 set. 2018.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO - OCDE. **OECD green growth studies: energy**.2011. Disponível em:< <http://www.oecd.org/greengrowth/greening-energy/49157219.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

_____. **Policy Guidance for investment in clean energy infrastructure: expanding access to clean energy for green growth and development**. 2015. Disponível em: < <http://www.oecd.org/environment/policy-guidance-for-investment-in-clean-energy-infrastructure-9789264212664-en.htm>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

ÖZGEN, Canan. **Measuring the efficiency of the Turkish electric distribution sector using stochastic frontier analysis**. 2011. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Pós Graduação de Ciências Naturais e Aplicadas, Universidade Técnica do Médio Oriente, 2011.

PERCOCO, Marco. Quality of institutions and private participation in transport infrastructure investment: Evidence from developing countries. **Transportation research part A: policy and practice**, v. 70, p. 50-58, 2014.

PETROBRÁS. **Preços e custos**. 2019. Disponível em:<<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/precos-e-custos>>. Acesso em: 02 de jan. 2019.

PITT, Mark M.; LEE, Lung-Fei. The measurement and sources of technical inefficiency in the Indonesian weaving industry. **Journal of development economics**, v. 9, n. 1, p. 43-64, 1981.

RADULOVIC, Verena. **Institutions matter, but are they sufficient for enhancing all markets?: examining the role of the state in promoting off-grid PV technology for productive uses in Punjab, India**. 2003. Disponível em: < http://www.martinot.info/Radulovic_Punjab_LSE.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.

RINTAMÄKI, T.; SIDDIQUI, A.; SALO, A. **Does renewable energy generation decrease the volatility of electricity prices? a comparative analysis of Denmark and Germany**. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988317300063>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ROUSSEEUW, Peter J.; LEROY, Annick M. **Robust regression and outlier detection**. New York: Wiley, 2005.

SADORSKY, Perry. Do urbanization and industrialization affect energy intensity in developing countries?. **Energy Economics**, v. 37, p. 52-59, 2013.

SARGAN, John D. The estimation of economic relationships using instrumental variables. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, p. 393-415, 1958.

SALEEM, Muhammad. Technical efficiency in electricity generation sector of Pakistan: the impact of private and public ownership. **Australian National University (ANU) Canberra**. Australia, 2007.

SANTOS, Felipe Marques. **Sistema elétrico brasileiro: histórico, estrutura e análise de investimentos no setor**. 2015. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Araranguá, 2015.

SARAFIDIS, Vasilis. An assessment of comparative efficiency measurement techniques. **Europe Economics**, n. 16, 2002.

SCHMIDT, Peter; LOVELL, CA Knox. Estimating technical and allocative inefficiency relative to stochastic production and cost frontiers. **Journal of econometrics**, v. 9, n. 3, p. 343-366, 1979.

_____. Estimating stochastic production and cost frontiers when technical and allocative inefficiency are correlated. **Journal of Econometrics**, v. 13, n. 1, p. 83-100, 1980.

SCHMIDT, Peter; SICKLES, Robin C. Production frontiers and panel data. **Journal of Business & Economic Statistics**, v. 2, n. 4, p. 367-374, 1984.

SCRUGGS, Lyle A. Institutions and environmental performance in seventeen western democracies. **British Journal of Political Science**, v. 29, n. 1, p. 1-31, 1999.

_____. Is there really a link between neo-corporatism and environmental performance? Updated evidence and new data for the 1980s and 1990s. **British Journal of Political Science**, v. 31, n. 4, p. 686-692, 2001.

SEE, Kok Fong; COELLI, Tim. An analysis of factors that influence the technical efficiency of Malaysian thermal power plants. **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 677-685, 2012.

SENSFUß, Frank; RAGWITZ, Mario; GENOESE, Massimo. The merit-order effect: a detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. **Energy policy**, v. 36, n. 8, p. 3086-3094, 2008.

SENSFUß, Frank. Analysen zum merit-order effekt erneuerbarer energien. **Update für das Jahr**. 2011.

SHALIZI, Cosma. **Factor Analysis**. 2009. Disponível em: <<http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/12/lecture-12.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SILVA, Bruno Gonçalves da. **Evolução do setor elétrico brasileiro no contexto econômico nacional**: uma análise histórica e econométrica de longo prazo. 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Administração, Economia e Contabilidade, USP, São Paulo, 2011.

SILVA, Patrícia Pereira da; CERQUEIRA, Pedro A. Assessing the determinants of household electricity prices in the EU: a system-GMM panel data approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1131-1137, 2017.

STAIGER, Douglas O.; STOCK, James H. Instrumental variables regression with weak instruments. **Econometrica**, v.65, 1997, p.557-86.

ST. LOUIS FED. **FED economic data**. St. Louis: Federal Reserve Bank of St. Louis, 2017. Disponível em: <<https://research.stlouisfed.org/fred2/>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

STOCK, James H.; YOGO, Motohiro. Testing for weak instruments in linear IV regression. In: ANDREWS, D.W.K; STOCK, J.H. (Ed.) **Identification and inference for econometric models, essays in honor of Thomas Rothenberg**. New York: Cambridge University Press, 2005.

TIRYAKI, Gisele Ferreira. Aspectos de governança, ambiente para negócios e o investimento privado no setor de energia de países em desenvolvimento. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 27-45, 2008.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. Rio do Janeiro: Synergia; EPE: Brasília, 2011.320p.

TUPY, Oscar; YAMAGUCHI, Luis Carlos Takao. Eficiência e produtividade: conceitos e medição. **Agricultura em São Paulo**, v.45, n.2, p.39-51,1998.

UEASIN, Nattarin; LIAO, Shu-Yi; WONGCHAI, Anupong. The technical efficiency of rice husk power generation in Thailand: comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis. **Energy Procedia**, v. 75, p. 2757-2763, 2015.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇUCAR. **Boletim/Unica**: a bioeletricidade em números. Disponível em< <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=6695153>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

VIEIRA, J. M. *et al.* Uma análise de competitividade para geração de energia elétrica. In: ERIAC-DÉCIMO TERCER ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 13, 2009. **Anais...** Argentina, Puerto Iguazú, 2009.

WILLIAMS, Brett; ONSMAN, Andrys; BROWN, Ted. Exploratory factor analysis: a five-step guide for novices. **Australasian Journal of Paramedicine**, v. 8, n. 3, 2010.

WILLIAMSON, Oliver E. Transaction cost economics. **Handbook of industrial organization**, v. 1, p. 135-182, 1985.

WOO, Chi-Keung *et al.* The impact of wind generation on the electricity spot-market price level and variance: the Texas experience. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 3939-3944, 2011.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE – WWF BRASIL. **Desafios e oportunidades para a energia eólica no Brasil: recomendações para políticas públicas.** 2015. Disponível em:< <https://www.wwf.org.br/informacoes/biblioteca/?46523/desafios-e-oportunidades-para-a-energia-eolica-no-brasil-recomendacoes-para-politicas-publicas>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

WU, X. D. *et al.* Embodied energy analysis for coal-based power generation system- highlighting the role of indirect energy cost. **Applied energy**, v. 184, p. 936-950, 2016.

WÜRZBURG, Klaas; LABANDEIRA, Xavier; LINARES, Pedro. Renewable generation and electricity prices: taking stock and new evidence for Germany and Austria. **Energy Economics**, v. 40, p. S159-S171, 2013.

ZHANG, Miao. **The comparison of *Stochastic Frontier Analysis* with panel data models.** 2012. 186 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculdade de Negócios e Economia da Universidade de Lowborough, Loughborough, 2012.

ZHENG, Wanyu. **Efficiency measurement: a methodological comparison of parametric and non-parametric approaches.** 2015. 271 f. Tese (Doutorado em Filosofia). Escola de Administração da Universidade de Bradford, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Medida de Adequação de Amostra de Kaiser (MSA) e teste de esfericidade de Bartlett (*Bartlett test of sphericity* – BTS).

H0: variables are not intercorrelated				
Ano	Kaiser's Measure of Sampling Adequacy	Chi-square	degrees of freedom	p-value
2002	0,899	1674,34	21	0,000
2003	0,870	1685,69	21	0,000
2004	0,893	1745,25	21	0,000
2005	0,901	1782,64	21	0,000
2006	0,879	1712,90	21	0,000
2007	0,870	1673,24	21	0,000
2008	0,873	1656,36	21	0,000
2009	0,879	1787,37	21	0,000
2010	0,880	1823,72	21	0,000
2011	0,889	1855,44	21	0,000
2012	0,889	1833,25	21	0,000
2013	0,892	1848,84	21	0,000
2014	0,893	1787,06	21	0,000
2015	0,884	1824,00	21	0,000
2016	0,879	1738,88	21	0,000
2017	0,881	1747,25	21	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

APÊNDICE B - Análise de Fatores: Indicadores de Governança Institucional – 2002.

Método: Fator Principal

Número de fatores: Análise Paralela (nreps=100, rng=kn, seed=388400715)

Número de observações: 190

	Fator 1	Comunalidade	Unicidade
CORRUP	0,939	0,882	0,118
EFICIGOV	0,973	0,946	0,054
ESTPOL	0,800	0,640	0,360
QUALREG	0,949	0,902	0,098
DEFPROP	0,983	0,967	0,033
VOZRESP	0,841	0,707	0,293
Fator	Variância	Cumulativa	
F1	5,043	5,043	
Total	5,043	5,043	
Indicadores de Adequação do Modelo			
	Modelo Estimado	Modelo de Independência	Saturado
Parametros	12	6	21
Graus de Liberdade	9	15	---
Razão de Parcimônia	0,600	1	---

Análise de Fatores: Indicadores de Governança Institucional – 2002 (continuação).

Índices de Ajuste Absoluto			
Discrepância	0,005	1,053	0
RMSR	0,019	0,838	0
Índices de Ajuste Incremental			
Bollen Relative (RFI)	0,999		
Bentler-Bonnet Normed (NFI)	1,000		

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE C - Análise de Fatores: Indicadores de Governança Institucional – 2017.

Método: Fator Principal

Número de fatores: Análise Paralela (nreps=100, rng=kn, seed=1148827179)

Número de observações: 202

	Fator 1	Comunalidade	Unicidade
CORRUP	0,951	0,904	0,096
EFICIGOV	0,948	0,900	0,100
ESTPOL	0,781	0,609	0,391
QUALREG	0,934	0,873	0,127
DEFPROP	0,980	0,961	0,039
VOZRESP	0,803	0,644	0,356
Fator	Variância	Cumulativa	
F1	4,892	4,892	
Total	4,892	4,892	

Indicadores de Adequação do Modelo

	Modelo Estimado	Modelo de Independência	Saturado
Parametros	12	6	21
Graus de Liberdade	9	15	---
Razão de Parcimônia	0,6	1	---

Índices de Ajuste Absoluto

Discrepância	0,017	9,866	0
RMSR	0,033	0,811	0

Índices de Ajuste Incremental

Bollen Relative (RFI)	0,997		
Bentler-Bonnet Normed (NFI)	0,998		

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE D - Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Ordinários – MQO.

Variável Dependente: LCUSTOMW

Método: Mínimos Quadrados

Nº obs.: 1631

White heteroskedasticity-consistent standard errors & covariance

Variável	Coefficiente	Erro Pad.	Estat. T	p-valor
C	1,128	1112254,000	1,014	0,311
GOVERN	0,022	0,169	0,130	0,897
ILE	-0,017	0,010	-1,775	0,076
LNPIBPC	0,044	0,102	0,437	0,662
INDUSTRIA	0,044	0,007	6,354	0,000
INFLACAO	-0,009	0,005	-1,876	0,061
VOLCAMBIO	0,000	0,000	0,463	0,644
D_WIND	-0,730	0,078	-9,366	0,000
D_SOLAR	-0,505	0,080	-6,294	0,000
D_BIOMASS	-1,008	0,088	-1,151	0,000
D_PCH	-0,760	0,090	-8,469	0,000
D_GEOTHERMAL	-0,420	0,191	-2,198	0,028
D_ALBANIA	-0,549	0,522	-1,052	0,293
D_ALGERIA	-0,876	0,496	-1,768	0,077
D_ARGENTINA	-0,233	0,532	-0,438	0,661
D_BANGLADESH	0,365	0,472	0,772	0,440
D_BELIZE	-0,010	0,576	-0,017	0,987
D_BRAZIL	-0,323	0,539	-0,599	0,549
D_BULGARIA	0,076	0,541	0,141	0,888
D_BURKINAFASO	-0,117	0,507	-0,231	0,818
D_CAMBODIA	-0,121	0,791	-0,153	0,879
D_CAPEVERDE	0,602	0,564	1,068	0,286
D_CHILE	-0,173	0,703	-0,246	0,805
D_CHINA	-1,287	0,506	-2,543	0,011
D_COLOMBIA	-0,435	0,558	-0,780	0,435
D_COSTARICA	0,105	0,618	0,170	0,865
D_DOMINICANREPUBLIC	0,049	0,521	0,095	0,924
D_ECUADOR	-0,874	0,517	-1,692	0,091
D_EGYPT	-0,956	0,475	-2,014	0,044
D_ELSALVADOR	-0,412	0,515	-0,800	0,424
D_ETHIOPIA	0,362	0,517	0,699	0,484
D_GABON	-1,045	0,619	-1,690	0,091
D_GEORGIA	-0,404	0,479	-0,845	0,398
D_GUATEMALA	-0,497	0,502	-0,991	0,322
D_HONDURAS	-0,193	0,474	-0,407	0,684
D_INDIA	-0,769	0,499	-1,540	0,124
D_INDONESIA	-0,772	0,535	-1,444	0,149
D_IRAN	-0,869	0,734	-1,184	0,237
D_JAMAICA	0,232	0,543	0,428	0,669
D_JORDAN	-0,064	0,546	-0,116	0,907

Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Ordinários – MQO (continuação).

D_KENYA	0,609	0,582	1,046	0,296
D_LAOPDR	-0,216	0,461	-0,468	0,640
D_LIBERIA	2,029	0,554	3,663	0,000
D_LITHUANIA	0,083	0,624	0,132	0,895
D_MADAGASCAR	-0,484	0,501	-0,964	0,335
D_MALAYSIA	-0,621	0,608	-1,021	0,307
D_MAURITIUS	0,427	0,645	0,662	0,508
D_MEXICO	-0,465	0,535	-0,870	0,384
D_MONGOLIA	-0,287	0,508	-0,564	0,573
D_MONTENEGRO	0,374	0,547	0,685	0,494
D_MOROCCO	0,311	0,580	0,536	0,592
D_MOZAMBIQUE	0,089	0,495	0,180	0,857
D_NAMIBIA	-0,299	0,566	-0,527	0,598
D_NEPAL	0,117	0,515	0,228	0,820
D_NICARAGUA	0,355	0,475	0,747	0,455
D_NIGERIA	-0,089	0,515	-0,173	0,863
D_PAKISTAN	0,216	0,481	0,449	0,654
D_PANAMA	-0,226	0,554	-0,408	0,684
D_PERU	-0,321	0,527	-0,609	0,543
D_PHILIPPINES	-0,428	0,506	-0,845	0,398
D_ROMANIA	-0,499	0,555	-0,899	0,369
D_RUSSIA	-0,653	0,503	-1,300	0,194
D_RWANDA	1,094	0,599	1,827	0,068
D_SANTALUCIA	1,486	0,593	2,507	0,012
D_SERBIA	-0,146	0,526	-0,278	0,781
D_SENEGAL	-0,451	0,516	-0,876	0,381
D_SOUTHAFRICA	0,103	0,556	0,185	0,854
D_SRILANKA	-0,485	0,508	-0,954	0,340
D_THAILAND	-0,540	0,524	-1,030	0,303
D_TONGA	0,755	0,506	1,494	0,135
D_TURKEY	-0,331	0,559	-0,592	0,554
D_UGANDA	0,428	0,520	0,822	0,411
D_UKRAINE	-0,321	0,479	-0,670	0,503
D_URUGUAY	0,045	0,649	0,070	0,944
D_VANUATU	0,593	0,545	1,088	0,277
D_VIETNAM	-1,096	0,498	-2,201	0,028
D_ZAMBIA	-1,272	0,477	-2,663	0,008
R-squared	0,295	Mean dependent var	0,634	
Adjusted R-squared	0,260	S,D, dependent var	0,568	
S,E, of regression	0,488	Akaike info criterion	1,451	
Sum squared resid	370,795	Schwarz criterion	1,706	
Log likelihood	-1106,290	Hannan-Quinn criter.	1,546	
F-statistic	8,539	Durbin-Watson stat	1,775	
Prob(F-statistic)	0,000			

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE E - Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Robustos – MQROB.

Variável Dependente: LCUSTOMW

Método: Mínimos Quadrados Robustos. Nº obs.: 1631

Método: Estimação do tipo M - M settings: weight=Bisquare, tuning=4,685, scale=MAD (median centered) - Huber Type I Standard Errors & Covariance

Variável	Coefficiente	Erro Pad.	Estat. T	p-valor
C	-0,592	0,625	-0,946	0,344
GOVERN	-0,190	0,114	-1,664	0,096
ILE	-0,013	0,006	-2,142	0,032
LNPIBPC	0,076	0,062	1,227	0,220
INDUSTRIA	0,055	0,004	1,403	0,000
INFLACAO	-0,004	0,004	-0,984	0,325
VOLCAMBIO	0,000	0,000	1,869	0,062
D_WIND	-0,804	0,073	-1,101	0,000
D_SOLAR	-0,565	0,073	-7,737	0,000
D_BIOMASS	-0,977	0,076	-1,287	0,000
D_PCH	-0,746	0,076	-9,751	0,000
D_GEOTHERMAL	-0,090	0,115	-0,782	0,434
D_ALBANIA	0,226	0,279	0,811	0,418
D_ALGERIA	-0,330	0,435	-0,760	0,448
D_ARGENTINA	0,635	0,278	2,287	0,022
D_BANGLADESH	1,095	0,413	2,650	0,008
D_BELIZE	0,850	0,325	2,611	0,009
D_BRAZIL	0,727	0,271	2,686	0,007
D_BULGARIA	1,004	0,277	3,620	0,000
D_BURKINAFASO	0,878	0,426	2,059	0,039
D_CAMBODIA	1,438	0,330	4,363	0,000
D_CAPEVERDE	1,739	0,451	3,854	0,000
D_CHILE	0,894	0,380	2,353	0,019
D_CHINA	-0,606	0,254	-2,385	0,017
D_COLOMBIA	0,255	0,312	0,817	0,414
D_COSTARICA	1,279	0,330	3,880	0,000
D_DOMINICANREPUBLIC	0,908	0,278	3,268	0,001
D_ECUADOR	-0,017	0,278	-0,061	0,951
D_EGYPT	-0,288	0,236	-1,220	0,222
D_ELSALVADOR	0,464	0,284	1,632	0,103
D_ETHIOPIA	1,414	0,424	3,337	0,001
D_GABON	-0,717	0,395	-1,817	0,069
D_GEORGIA	0,370	0,419	0,883	0,377
D_GUATEMALA	0,311	0,249	1,248	0,212
D_HONDURAS	0,610	0,234	2,610	0,009
D_INDIA	0,112	0,237	0,474	0,636
D_INDONESIA	0,077	0,270	0,285	0,775
D_IRAN	-0,466	0,564	-0,826	0,409
D_JAMAICA	1,195	0,318	3,756	0,000
D_JORDAN	0,912	0,283	3,223	0,001

Análise Econométrica: Mínimos Quadrados Robustos – MQROB (continuação).

D_KENYA	1,028	0,265	3,883	0,000
D_LAOPDR	0,411	0,297	1,382	0,167
D_LIBERIA	3,016	0,352	8,576	0,000
D_LITHUANIA	1,114	0,482	2,31	0,021
D_MADAGASCAR	0,232	0,426	0,545	0,586
D_MALAYSIA	0,182	0,33	0,552	0,581
D_MAURITIUS	1,532	0,49	3,124	0,002
D_MEXICO	0,319	0,277	1,153	0,249
D_MONGOLIA	0,525	0,319	1,642	0,101
D_MONTENEGRO	1,429	0,448	3,193	0,001
D_MOROCCO	1,667	0,281	5,924	0,000
D_MOZAMBIQUE	0,989	0,417	2,369	0,018
D_NAMIBIA	0,643	0,342	1,879	0,06
D_NEPAL	1,124	0,236	4,755	0,000
D_NICARAGUA	1,100	0,252	4,36	0,000
D_NIGERIA	0,787	0,424	1,859	0,063
D_PAKISTAN	1,185	0,228	5,207	0,000
D_PANAMA	0,665	0,302	2,206	0,027
D_PERU	0,453	0,271	1,674	0,094
D_PHILIPPINES	0,425	0,245	1,736	0,083
D_ROMANIA	0,302	0,292	1,035	0,301
D_RUSSIA	0,072	0,288	0,249	0,804
D_RWANDA	2,133	0,32	6,665	0,000
D_SANTALUCIA	2,700	0,465	5,802	0,000
D_SERBIA	0,754	0,288	2,615	0,009
D_SENEGAL	0,602	0,316	1,905	0,057
D_SOUTHAFRICA	0,989	0,28	3,527	0,000
D_SRILANKA	0,259	0,245	1,057	0,290
D_THAILAND	0,282	0,268	1,053	0,292
D_TONGA	1,738	0,429	4,056	0,000
D_TURKEY	0,484	0,287	1,689	0,091
D_UGANDA	1,28	0,251	5,105	0,000
D_UKRAINE	0,592	0,242	2,448	0,014
D_URUGUAY	0,973	0,336	2,898	0,004
D_VANUATU	1,756	0,44	3,987	0,000
D_VIETNAM	-0,557	0,247	-2,251	0,024
D_ZAMBIA	-0,472	0,421	-1,122	0,262
R-squared	0,32	Adjusted R-squared	0,287	
Rw-squared	0,558	Adjust Rw-squared	0,558	
Akaike info criterion	2356,67	Schwarz criterion	2791,56	
Deviance	190,99	Scale	0,293	
Rn-squared statistic	1454,78	Prob(Rn-squared stat.)	0,000	

Fonte: Dados da Pesquisa.

APÊNDICE F - Projetos de geração eólica que entraram em operação comercial até 2017 – Brasil.

Código	Projeto	Estado
1	Alegria Wind Park	Rio Grande do Norte
2	Alegria Wind Park 2	Rio Grande do Norte
3	Alubar Mangue Seco 1 Wind Farm	Rio Grande do Norte
4	Atlantic Energias Renovaveis Wind Park	Rio Grande do Norte
5	Barra dos Coqueiros Wind Power Plant	Sergipe
6	Beberibe Wind Park	Ceará
7	Bioenergy Aratua & Miassaba Wind Farms	Rio Grande do Norte
8	Caetite Wind Farm	Bahia
9	Centrais Eolicas Caetite Wind Park	Bahia
10	Chapada do Piauí I Wind Park	Piauí
11	Chapada do Piauí III Wind Park	Piauí
12	Chesf-Brennand Sento Se Wind Farms Phase I	Bahia
13	Chesf-Brennand Sento Se Wind Farms Phase II	Bahia
14	Chui Wind Farm	Rio Grande do Sul
15	ContourGlobal Asa Branca Wind Farm	Rio Grande do Norte
16	Corredor do Senandes Wind Park	Rio Grande do Sul
17	CPFL Renovaveis Atlantica Wind Park	Rio Grande do Sul
18	CPFL Renovaveis Campo dos Ventos II	Rio Grande do Norte
19	CPFL Renovaveis Rio Grande do Norte Wind Park	Rio Grande do Norte
20	Curva dos Ventos Wind Park	Bahia
21	Delta 1 Wind Park	Piauí
22	DESA Rio Grande do Norte Wind Farms	Rio Grande do Norte
23	Desenvix Bahia Wind Farms	Bahia
24	Dunas do Paracuru Wind Power Plant	Ceará
25	EDP Renovaveis Brasil S.A.	Santa Catarina
26	Enerfin-Elecnor Rio Grande do Sul Wind Farms	Rio Grande do Sul
27	Energimp Ceara II Acarau Wind Farm	Ceará
28	Energisa Renascenca Wind Farm	Rio Grande do Norte
29	Eolica Faisa Wind Farms	Ceará
30	Fontes dos Ventos Wind Farm	Pernambuco
31	Forca Eolica Rio Grande do Norte Wind Parks	Rio Grande do Norte
32	Galvao Rio Grande do Norte Wind Farms	Rio Grande do Norte
33	Gargau Wind Power Plant	Rio de Janeiro
34	Geribatu Wind Park	Rio Grande do Sul
35	Gestamp Pedra do Reino Wind Farms	Rio Grande do Norte
36	Gestamp Cabeco Preto	Rio Grande do Norte
37	Impsa Wind Farm Portfolio	Santa Catarina
38	Modelo Wind Farm	Rio Grande do Norte
39	Morrinhos Wind Farm	Bahia
40	Pacific Hydro Wind Farm Project	Paraíba
41	Pedra do Sal Wind Power Plant	Piauí
42	Piraua and Gravata Windfarms	Pernambuco

Projetos de geração eólica que entraram em operação comercial até 2017 – Brasil (continuação)

43	Pontal 2B Wind Power Plant	Rio Grande do Sul
44	Queiroz Galvao Amontada Wind Park	Ceará
45	Queiroz Galvao Taiba & Icarai Wind Farms	Ceará
46	REB Cassino Wind Farm	Rio Grande do Sul
47	Renova Energia Alto do Sertao I Wind Farms	Bahia
48	Renova Energia Alto Sertao II Wind Farm	Bahia
49	Riachao Wind Farm	Rio Grande do Norte
50	Rio do Fogo Wind Farm	Rio Grande do Norte
51	Rosa dos Ventos Wind Park	Ceará
52	Santa Brigida Wind Park	Pernambuco
53	Santa Clara Wind Farm Complex	Rio Grande do Norte
54	Santana do Livramento Wind Farm	Rio Grande do Sul
55	Santander Rio Grande do Norte Wind Farms	Rio Grande do Norte
56	Santander Ceara	Ceará
57	Santos Energia Wind Farm	Ceará
58	Serra Azul Wind Park	Bahia
59	Serra das Vacas Wind Farm	Pernambuco
60	Serveng Civilsan Rio Grande do Norte Wind Farms	Rio Grande do Norte
61	SIIF Enegies do Brasil	Ceará
62	Tractebel's Trairi Wind Park	Ceará
63	Vamcruz Wind Park	Rio Grande do Norte
64	Ventos do Sul	Rio Grande do Sul
65	Ventos dos Indios Wind Park	Rio Grande do Sul
66	Wobben Mangue Seco III & V Wind Farms	Rio Grande do Norte

Fonte: BANCO MUNDIAL (2018).

APÊNDICE G - Índices e classificação de eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica.

Projeto	Eficiência	Posição	Projeto	Eficiência	Posição
1	0,8170	40	34	0,9538	3
2	0,8813	18	35	0,7998	49
3	0,7651	57	36	0,7881	53
4	0,8300	38	37	0,7645	58
5	0,7953	52	38	0,8164	41
6	0,7615	59	39	0,8931	16
7	0,7532	61	40	0,8143	44
8	0,8530	31	41	0,7352	63
9	0,8103	47	42	0,7519	62
10	0,9205	6	43	0,7055	64
11	0,9022	13	44	0,8363	35
12	0,8584	27	45	0,8627	26
13	0,8780	20	46	0,8357	36
14	0,9037	11	47	1,0000	1
15	0,9044	9	48	0,9617	2

Índices e classificação de eficiência técnica dos projetos de geração de energia eólica
(continuação)

16	0,8753	22	49	0,8978	14
17	0,8833	18	50	0,8134	46
18	0,7755	55	51	0,6451	66
19	0,8388	34	52	0,9191	7
20	0,8158	43	53	0,9329	5
21	0,8471	32	54	0,7573	60
22	0,9432	4	55	0,8158	42
23	0,8549	29	56	0,7845	54
24	0,8008	48	57	0,8342	37
25	0,6716	65	58	0,7979	50
26	0,8735	23	59	0,8690	24
27	0,9049	8	60	0,9037	12
28	0,8946	15	61	0,8563	28
29	0,8914	17	62	0,8768	21
30	0,8394	33	63	0,8537	30
31	0,7967	51	64	0,9038	10
32	0,8655	25	65	0,8140	45
33	0,7749	56	66	0,8175	39

Fonte: dados da pesquisa.