

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LEONARDO TEIXEIRA BORSATO

A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA E O ÍNDICE DE
COMPLEXIDADE ECONÔMICA

São Carlos

2019

LEONARDO TEIXEIRA BORSATO

A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR E EÓLICA E O ÍNDICE DE
COMPLEXIDADE ECONÔMICA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica – Ênfase Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Profa. Dra. Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto.

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B738 Borsato, Leonardo Teixeira
A Geração de Energia Solar e Eólica e o Índice de Complexidade Econômica / Leonardo Teixeira Borsato; orientadora Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto; coorientador Diogo Ferraz. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Complexidade econômica. 2. Energia solar. 3. Energia eólica. 4. Dados em painel. 5. Econometria.
I.
Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Leonardo Teixeira Borsato

Título: "A geração de energia solar e eólica e o índice de complexidade econômica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/11/2019,
com NOTA 9,0 (9,0), pela Comissão Julgadora:

Profa. Associada Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto - Orientadora - SEP/EESC/USP

Dr. Diogo Ferraz - SEP/EESC/USP

Prof. Assistente Carlos Goldenberg - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

DEDICATÓRIA

Aos meus pais José e Rosilda.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José e Rosilda, e à minha irmã, Thaís, agradeço por todo o amor e suporte em qualquer decisão tomada. Aos meus tios, Mário e Rosilene, pelos conselhos e apoio. A minha avó Aparecida e tia Rozely, por todo o acolhimento e carinho. À minha namorada, Beatriz, pela paciência, dedicação e pela inspiração a ser o meu melhor. Aos meus irmãos da República Poltergeist, pela amizade e ensinamentos. Aos meus amigos Caynã, Pascon, Merli, G.B., Alexandre, Barban, Richard e Bahia pela parceria, companheirismo e por tantas madrugadas de estudo.

À Escola de Engenharia de São Carlos e aos seus colaboradores, agradeço pela oportunidade de estudo em todos esses anos. Agradeço minha orientadora Daisy e ao meu co-orientador Diogo por me oferecerem o tema e estarem sempre auxiliando nas dúvidas e na construção do trabalho.

RESUMO

BORSATO, L. T. A Geração de Energias Renováveis e o Índice de Complexidade Econômica. 2019. 37 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O desenvolvimento de fontes alternativas de energia tem ganhado espaço dentre os principais projetos de diferentes países ao redor do mundo, em resposta à necessidade de diversificação da matriz energética elétrica principalmente devido a iniciativas de redução da emissão de gases do efeito estufa. O presente trabalho tem por objetivo estabelecer de forma empírica a relação existente entre a variação na geração de energias elétrica solar e eólica com o Índice de Complexidade Econômica (ICE), Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), consumo de energia e força de trabalho. O método utilizado foi a econometria, por meio de dados em painel para um conjunto de 70 países entre os anos de 2010 e 2016, estabelecendo testes estatísticos padronizados com a correção de heterocedasticidade e autocorrelação. O principal resultado deste trabalho foi comprovar o impacto positivo e significativo da complexidade econômica sobre a geração das fontes energéticas solar e eólica. Além disso, este estudo também mostrou que o IDH, o consumo de eletricidade e a população economicamente ativa foram determinantes para o aumento da produção de energia por meio de fontes alternativas.

Palavras-chave: Complexidade Econômica. Energia Solar. Energia Eólica. Dados em painel. Econometria.

ABSTRACT

BORSATO, L. T. **Renewable Energy Generation and the Economic Complexity Index.** 2019. 37 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The development of alternative energy sources has been gaining ground among the major projects of different countries around the world, in response to the need for diversification of the electric energy matrix mainly due to initiatives to reduce greenhouse gas emissions. This paper aims to establish in an empirical way the relationship between the variation in solar and wind power generation with the Economic Complexity Index (ICE), Human Development Index (HDI), energy consumption and workforce. The method used was econometrics, using panel data for a set of 70 countries between 2010 and 2016, establishing standardized statistical tests with correction of heteroscedasticity and autocorrelation. The main result of this work was to prove the positive and significant impact of economic complexity on the generation of solar and wind energy sources. Moreover, this study also showed that the HDI, electricity consumption and the economically active population were determinant for the increase of the production of energy by alternative sources.

Key words: Economic Complexity. Solar energy. Wind energy. Panel data. Econometrics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo de algumas épocas majoritárias de energia.	17
Figura 2 - Histórico do consumo de energia no mundo	21
Figura 3 - Oferta Interna de Energia no Brasil em 2017 (%)	22
Figura 4 - Evolução da geração de energia solar e eólica em GWh na China.....	32
Figura 5 - Evolução da geração de energia eólica em GWh na Dinamarca	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil (OIEE)	23
Tabela 2 - Variáveis utilizadas para as análises econométricas	26
Tabela 3 - Resultados encontrados para a variável dependente geração de energia solar	29
Tabela 4 - Resultados encontrados para a variável dependente geração de energia eólica.....	30
Tabela 5 - Países analisados	37

SUMÁRIO

1.	Introdução	15
2.	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1.	Energia.....	17
2.1.1.	O mundo e o desenvolvimento das discussões acerca de energia.....	17
2.1.2.	A matriz energética mundial	20
2.1.3.	A matriz energética no Brasil.....	21
2.2.	Complexidade Econômica	24
3.	Método	26
4.	Resultados e Discussão	29
5.	Conclusão.....	34
6.	Referências Bibliográficas	35
	Apêndice - Países analisados:.....	37

1. Introdução

A economia mundial apresenta inúmeras particularidades e índices os quais buscam mensurar as características sociais e o desenvolvimento das nações. Nesse âmbito, expressam-se indicadores como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), Produto Interno Bruto (PIB), bem como o Índice de Complexidade Econômica (ICE).

O anseio dos países desenvolvidos, como o de países em desenvolvimento que realizam investimentos na área de energia renovável, deve-se ao fato de entenderem as mudanças na conjuntura mundial (em termos de capacidade produtiva de energia, com o fim dos estoques de matéria prima como petróleo e também no intuito de reduzir futuros custos para manutenção dos seus meios de produção e gastos com causas sociais, ocasionados pelo uso de energias poluentes) (SMIL, 2004).

O conceito de complexidade econômica e a sua relação com o desenvolvimento energético está diretamente ligado a capacidade de inovação e diversificação da economia, visto os gargalos ocasionados pela produção de uma pequena cesta de produtos e a dependência deste em relação ao mercado. Partindo desse princípio, um país, ao permitir a inovação e a diversificação (inclusive no modo produtivo de energia), estará menos propenso a sofrer entraves produtivos e poderá gerir seu desenvolvimento econômico e social por meio de um crescimento sustentável.

Do ponto de vista energético, o Brasil apresenta peculiaridades que possibilitam a introdução de novos meios de energias renováveis, como a eólica no Nordeste, a energia advinda da biomassa da cana de açúcar (principalmente na região Sudeste) e a energia baseada no funcionamento das hidrelétricas (BRASIL, 2014).

Porém, tratando-se de complexidade econômica, o Brasil ainda busca essa base. Não há caminho possível para o desenvolvimento econômico sem que, para isso, haja sofisticação do tecido produtivo. Todos os países ricos são complexos e sofisticados e todos os países pobres não são complexos nem sofisticados (GALA et al., 2017).

Diante desse contexto, o presente trabalho visa mensurar o impacto da complexidade econômica, medida neste trabalho pelo Índice de Complexidade Econômica, sobre a produção das energias renováveis solar e eólica para 70 países entre

2010 e 2016. Os países e o período foram escolhidos com base na disponibilidade dos dados encontrados. Além disso, a escolha do intervalo de tempo levou em consideração o aumento da preocupação sobre a questão ambiental ao redor do mundo o que ocasionou em um crescimento da produção de energia solar e eólica.

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, sendo este capítulo introdutório o primeiro deles. O segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre os conceitos utilizados neste trabalho. O terceiro capítulo discorre sobre o método utilizado para encontrar a relação existente entre a variação nas energias solar e eólica e os parâmetros analisados. O quarto capítulo disserta sobre os resultados encontrados. O quinto capítulo expõe a conclusão sobre o trabalho. Finalmente, o sexto capítulo expõe as referências bibliográficas utilizadas.

2. Revisão Bibliográfica

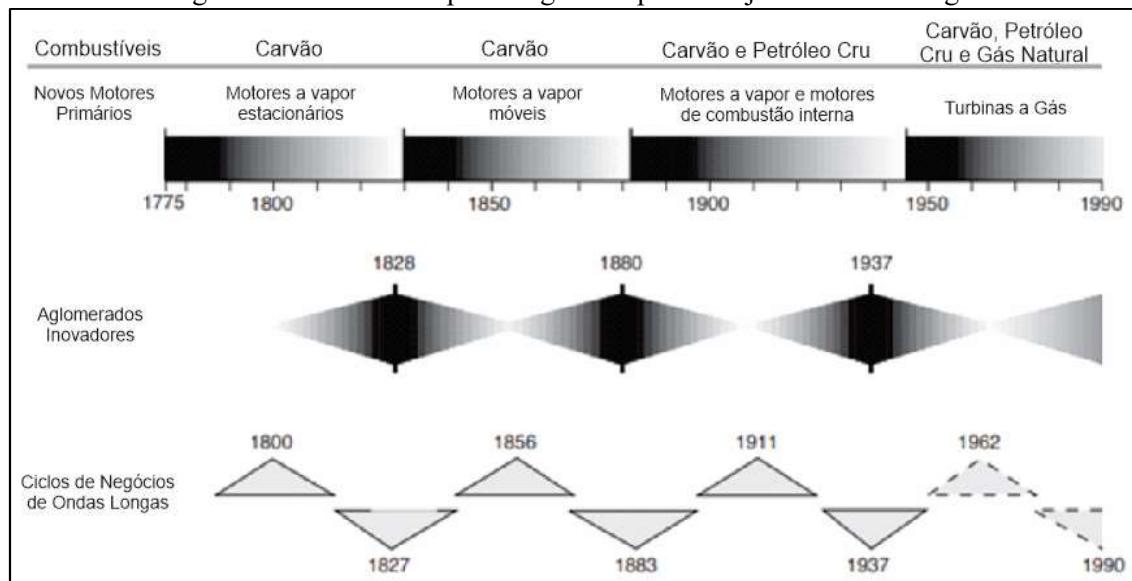
2.1. Energia

2.1.1. O mundo e o desenvolvimento das discussões acerca de energia

Conforme Smil (2014), o entendimento sobre a energia na história da humanidade deve seguir o princípio da termodinâmica. Pode-se analisar a sua periodização pelas formas dominantes de fonte de calor, além da complexidade em adquirir maiores níveis de energia. Esse princípio divide a evolução da espécie humana em eras distintas e traz a importância de progredir em busca de formas mais poderosas, mais flexíveis e de maneira mais eficiente na conversão de energia.

Durante a modernidade, a transição da dependência de animais e de biomassa para formas inanimadas e máquinas consumidoras de combustível tem sua duração diferente para cada tipo de país. Durante 150 anos, entre os séculos 18 e 20, 4 tipos diferentes de motores primários foram utilizados na Europa: animais para arrasto, rodas ou turbinas de água, moinhos de vento e máquinas a vapor. Nos Estados Unidos, o carvão exerceu grande importância (SMIL, 2014). A figura 1 explicita a divisão em algumas épocas majoritárias até 1990.

Figura 1 - Linha do tempo de algumas épocas majoritárias de energia



Fonte: Adaptado de Encyclopedia of Energy Volume 6, 2004.

Com o passar dos anos, as discussões acerca de desenvolvimento econômico e degradação ambiental começaram a tomar lugar na sociedade, sendo tratada pela primeira vez em 1972 na Conferência sobre Desenvolvimento Humano das Nações Unidas em Estocolmo. Depois da Conferência, os governos criaram o Programa de Meio-ambiente das Nações Unidas (UNEP – United Nations Environment Program). Porém, pouco foi feito nos anos seguintes, com uma série de agressões ao meio-ambiente em crescimento contínuo e uma destruição dos recursos naturais a uma taxa alarmante (IEA, 2018).

Em 1973/74, o embargo do petróleo por alguns produtores membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEC) elevaram os preços dos barris a níveis extremamente altos, o que tornou necessária a criação de um órgão que trouxesse aos países uma maneira de responder de forma coletiva. Isso levou o secretário de estado dos Estados Unidos, Henry Kissinger, a propor um grupo de ação sobre energia para enfrentar a crise energética mundial e coordenar um programa internacional de pesquisa para desenvolver novos tipos de tecnologias energéticas. Essa iniciativa foi exposta durante a realização da Conferência de Energia de Washington em fevereiro de 1974 (IEA, 2018).

Com a intenção de organizar as diretrizes do projeto, o Energy Coordinating Group (ECG) convocou os participantes da conferência a se encontrarem em Bruxelas. O encontro culminou em duas propostas: o rascunho da decisão do conselho da OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e um rascunho de um tratado sobre um “Acordo sobre um Programa Internacional de Energia”. Com isso, a criação da International Energy Agency (IEA) no mesmo ano foi assinada com 17 países membros fundadores, os quais permitiam excessivo e ineficiente uso de energia – e de petróleo em particular (IEA, 2018).

Nos anos seguintes, o órgão cresceu com a adesão de maiores países membros. Em 1983, a Comissão Internacional sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento organizada pelas Nações Unidas pôs adiante e desenvolveu a ideia de desenvolvimento sustentável. Em 1991, a IEA lança pela primeira vez uma contingência de estoques de petróleo pela primeira vez por uma preocupação sobre a Primeira Guerra do Golfo. Com isso, os países membros concordaram em limitar-se a um total de 2,5 milhões de barris por dia. Após a Guerra do Golfo, o órgão sentiu a oportunidade de iniciar diálogos construtivos acerca da produção e consumo de petróleo (IEA, 2018).

Durante a Cúpula da Terra do Rio de Janeiro ou ECO92 em 1992 pela Organização das Nações Unidas (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change), a cúpula adota a Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas com signatários comprometendo-se a reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Os três maiores acordos adotados foram: Agenda 21 – um programa de ação global em todas as áreas de desenvolvimento sustentável, A Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – uma série de princípios definindo responsabilidades e direitos dos Estados, e a Declaração de Princípios Florestais – conjunto de princípios para fundamentar a gestão sustentável das florestas em todo o mundo. Os acordos entraram em vigor no ano de 1994 e foi ratificada por 196 Estados (ONU, 2018).

Em 1997, o Protocolo de Quioto reafirmou o tratado de 1992. Reconhecendo que os países desenvolvidos são os principais responsáveis pelos altos níveis atuais de emissões de GEE na atmosfera devido a mais de 150 anos de atividade industrial, o Protocolo impôs uma carga maior sobre os países desenvolvidos sob o responsabilidades comuns mas diferenciadas, entrar em vigor em fevereiro de 2005 (ONU, 2018). Vale ressaltar, ainda, a presença da IEA na conferência dos G8 em Gleneagle no ano de 2005, sendo um dos focos na mudança climática global, o qual planejou em como incluir países em desenvolvimento como Brasil, China, Índia, México e África do Sul que não estavam incluídos no Protocolo de Quioto (IEA, 2018).

Em 2015, a 21^a Conferência das Partes (COP-21) organizada pela UNFCCC buscou direcionar um novo acordo sobre o clima dentre os 195 países membros: o Acordo de Paris. O acordo teve como diretrizes combater os efeitos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (ONU, 2018).

Pode-se observar, então, a necessidade da criação de órgãos fiscalizadores e mediadores das diferentes formas de produção energética com o passar dos anos, visto a agressão do meio ambiente na forma de obtenção da matriz energética. A busca por formas alternativas e mais sustentáveis de energia partiu de uma necessidade e evoluiu para a conscientização de inúmeras nações.

2.1.2. A matriz energética mundial

As preocupações acerca da segurança na geração de energia, efeitos da emissão combustíveis fósseis, e os altos valores dos barris de petróleo no mundo aumentaram as iniciativas em busca de fontes-renováveis não poluentes e sustentáveis. Analisando as emissões de gás carbônico, pode-se encontrar um índice de 2,35 t CO₂ por tep de energia em 2014, inferior ao encontrado 10 anos atrás (2,37 t CO₂ - toneladas de CO₂) sendo o Brasil um forte responsável em sua diminuição devido as fontes renováveis (BRASIL, 2014).

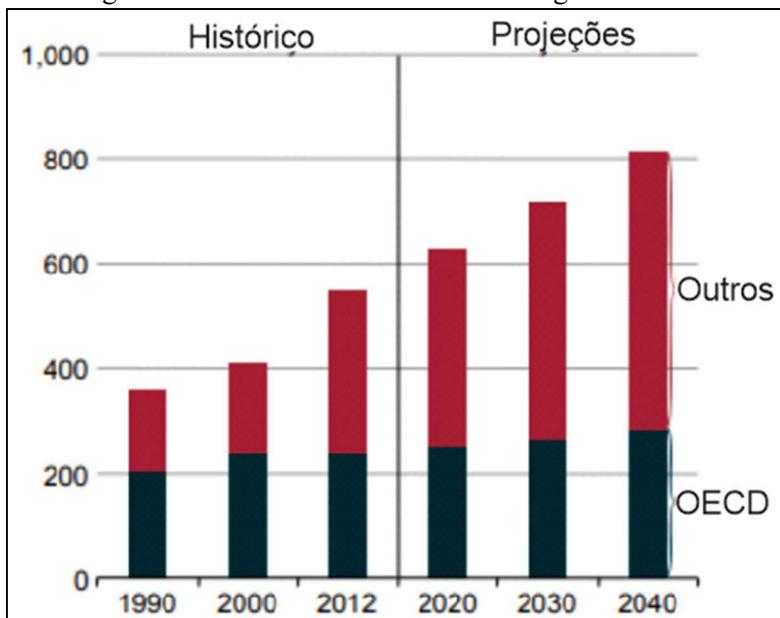
Porém, quando a análise é feita sobre os países do Golfo Pérsico, por exemplo, dois extremos podem ser encontrados. Sendo um grande utilizador de combustíveis fósseis, a Arábia Saudita possui 100% de sua matriz energética baseada em petróleo e gás natural. Do outro lado, Moçambique possui sua matriz composta por 81% de fontes renováveis (BRASIL, 2014).

Ainda, há países quase que totalmente dependentes de apenas uma fonte de energia. A África do Sul possui no Carvão Mineral 93% de sua matriz elétrica. No Uzbequistão, o gás natural corresponde a 88%. Já no Paraguai, 100% de sua matriz é voltada à energia hidráulica (BRASIL, 2014).

Segundo o relatório de Minas e Energia sobre a Energia no Mundo, em 2016, a matriz mundial de geração de energia elétrica contou com 38,5% de carvão mineral, 22,8% de gás, 4,0% de óleo, 10,6% de urânio, 16,2% de hidráulica e 7,9% de outras não especificadas. Dos 13.729 Mtep (milhares de equivalentes toneladas de barris de petróleo) consumidos, 32% foram de petróleo, 27,5% de carvão mineral, 21,8% de gás natural, 5% de energia nuclear, 2,5% de energia hidráulica, e 11,2% de outras fontes (BRASIL, 2014).

O Panorama de Energia Internacional de 2016 (International Energy Outlook 2016 - IEO2016) expõe um caso de referência para análise, o qual mostra um aumento da demanda, assumindo o avanço de tecnologias e tendências demográficas, quando comparado ao ano de 2012 de 48% para o ano de 2040 (549 quadrilhões de unidades térmicas britânicas – Btu para 815 Btu) (BRASIL, 2014).

Figura 2 - Histórico do consumo de energia no mundo



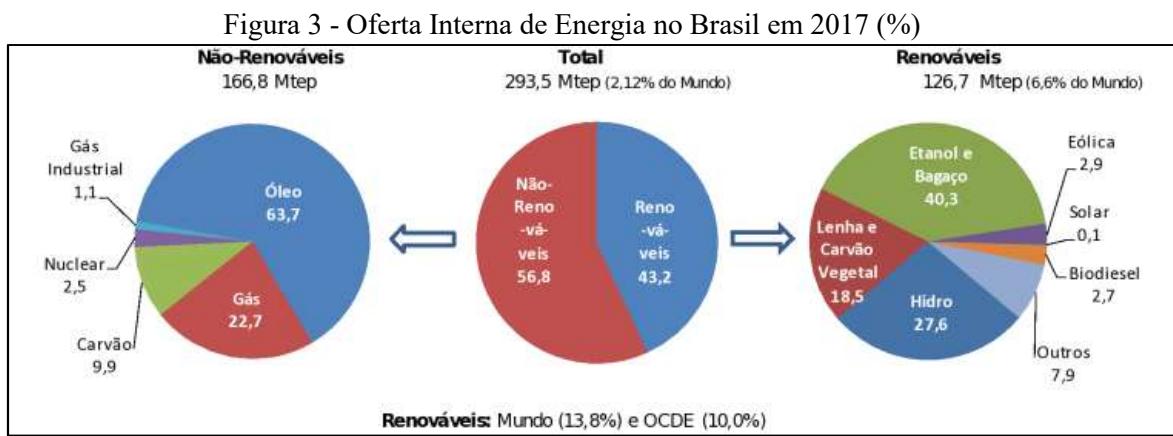
Fonte: Adaptado de U.S. Energy Information Administration
International Energy Outlook , 2016.

Segundo o IEO2016, a geração de eletricidade no mundo irá aumentar 69% até 2040. Deve-se ressaltar a importância de analisar o crescimento econômico quando observa-se o crescimento na demanda de energia mundial e embora o crescimento do PIB mundial tenha diminuído quando em comparação as duas décadas passadas, a demanda de eletricidade tem seu valor sempre em crescimento (BRASIL, 2014).

2.1.3. A matriz energética no Brasil

A Oferta Interna de Energia (OIE), em 2017, ficou em 293,5 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), crescimento de 1,8% em relação a 2016 e 2,12% da energia mundial. Em comparação ao PIB brasileiro, a demanda de energia cresce quase o dobro. Já o consumo final de energia (CFE) aumentou 1,8% no ano de 2017 (BRASIL, 2017)

Além disso, quando se trata do uso de energias renováveis, o país desempenha um papel importante quando se compara a proporção energética relacionada a esse tipo de produção energética com o resto do mundo, como evidencia a figura 2.



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2018.

Em relação ao gráfico de renováveis se comparado ao ano de 2016, apenas a Hidráulica perde participação em 2017. Os indicadores em 2016 foram: Hidráulica (28,9%), Etanol e Bagaço (40,1%), Lenha e Carvão Vegetal (18,4%), Eólica (2,3%), Biodiesel (2,4%), Solar (0,0%) e outras (7,8%) (BRASIL, 2014).

Sobre a emissão de gás carbônico, o país é reconhecido pelo uso de energia limpa com baixa emissão de CO₂. Em 2017, no índice de tCO₂/tep (toneladas de CO₂ por toneladas equivalentes de petróleo), o Brasil alcançou um índice de 1,47, contra 2,21 alcançado pela OCDE e 2,34 em relação ao resto do mundo. O setor de energia elétrica teve um aumento de 0,5% quando comparado ao ano anterior; número atenuado pelo alto nível de participação de geração hidráulica e bioenergia na matriz energética brasileira (BRASIL, 2014).

No ano de 2017, o país também continuou a redução de dependência externa de energia (apenas 0,5% do total de sua necessidade). O número foi atingido devido aos aumentos nas produções de gás natural e petróleo, com um menor aumento na demanda de derivados (BRASIL, 2014).

Ao tratar sobre matriz elétrica, a oferta alcançou o número de 624,3 TWh, com forte destaque aos aumentos na oferta eólica (26,5%) com liderança do Rio Grande do Norte e gás natural (16,2%), e uma diminuição imponência da energia hidráulica. A geração solar teve um crescimento de 876%, porém ainda baixa em relação à produção total (BRASIL, 2014). A tabela 1 explicita a oferta interna de energia elétrica no Brasil:

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil (OIEE)

Especificação	GWh		17/16 %	Estrutura (%)	
	2016	2017		2016	2017
Hidráulica	380.911	370.906	-2,6	61,5	59,4
Bagaço de Cana	35.236	35.655	1,2	5,7	5,7
Eólica	33.489	42.373	26,5	5,4	6,8
Solar	85	832	875,6	0,01	0,13
Outras Renováveis (a)	15.805	15.617	-1,2	2,6	2,5
Óleo	12.103	12.733	5,2	2,0	2
Gás Natural	56.485	65.593	16,1	9,1	10,5
Carvão	17.001	16.257	-4,4	2,7	2,6
Nuclear	15.864	15.739	-0,8	2,6	2,5
Outras Não Renováveis (b)	11.920	12.257	2,8	1,9	2
Importação	40.795	36.355	-10,9	6,6	5,8
TOTAL (c)	619.693	624.317	0,7	100,0	100,0
<i>Dos quais renováveis</i>	<i>506.320</i>	<i>501.739</i>	<i>-0,9</i>	<i>81,7</i>	<i>80,4</i>

(a) Lixívia, biogás, casca de arroz, capim elefante, resíduos de madeira e gás de c. vegetal; (b) Gás de alto forno, de aciaria, de coqueria, de refinaria e de enxofre; e alcatrão; (c) Inclui autoprodutor cativo (que não usa a rede básica).

Fonte: Ministério de Minas e Energia

Até a segunda metade da década de 90, a autoprodução de energia elétrica era quase totalmente destinada ao consumo próprio. Porém, com a legislação, os autoprodutores puderam vender os excedentes ao mercado, assim como adquirir total ou parcialmente usinas hidrelétricas distantes através do uso do Sistema Interligado Brasileiro (SIN). Com isso, empresas como a Vale do Rio Doce, Companhia Siderúrgica Nacional e Companhia Brasileira de Alumínio, por exemplo, entraram em participação como autoprodutores. A geração de autoprodutores no ano de 2017 correspondeu a 18,4% do consumo final brasileiro (BRASIL, 2014).

Em um documento elaborado pelo próprio Ministério de Minas e Energia com projeções para 2030, há uma previsão de crescimento de consumo de 3,3% ao ano em um dos cenários desde 2005, atingindo o patamar de 402,821 milhões de tep (a marca encontrada em 2017 foi de 260Mtep). Esse cenário aponta um uso mais racional da energia, além de incentivos políticos e programas autônomos, que estão cada vez mais em incorporação no Brasil. (BRASIL, 2014).

2.2. Complexidade Econômica

A complexidade econômica de um país parte da análise de seus bens produzidos, o que se reflete sobre sua estrutura positiva. A sofisticação de um país pode ser medida com base em uma análise dos produtos que ele exporta. São considerados mais complexos aqueles países que geram bens de alta tecnologia do que aqueles que produzem matéria-prima. Ainda, os países mais ricos são aqueles com as economias mais complexas e que produzem uma maior diversidade de bens (HAUSMANN et al., 2014).

Segundo Gala et al. (2017), os dois conceitos básicos para a análise da complexidade econômica de um país são a ubiquidade e a diversificação de produtos que ele exporta. Aquele que produz bens não ubíquos, também traz consigo produtos mais sofisticados. Assim, também entra em conflito o fato da escassez de alguns produtos naturais, como diamantes e urânio. Assim, pode-se dividir esse tipo de cesta de produtos em aqueles que requerem alta tecnologia para produção, altamente escassos na natureza e os que são natural não ubíquos.

O método desenvolvido para construir um Índice de Complexidade Econômica resultou em um Atlas que reúne materiais e dados sobre a exportações de países desde o ano de 1963. Ao calcular a possibilidade de bens sendo conjuntamente exportados por alguns países, o Atlas cria uma interessante medida de know-how de produção contida nesses bens, e na habilidade requerida para produzi-los: “o espaço do produto” (HIDALGO et al., 2007). Ainda, o Atlas adiciona uma importante discussão acerca da importância da industrialização no desenvolvimento econômico: do ângulo da análise empírica, bens manufaturados são claramente caracterizados como mais complexos e commodities como menos complexos.

Além disso, estudos mostram que a complexidade da estrutura produtiva de um país tem relação com crescimento econômico e desenvolvimento humano. A diversificação econômica é um fator mais importante para o desenvolvimento humano do que crescimento econômico, visto o desenvolvimento da capacidade das pessoas em qualificações mais específicas e técnicas (HARTMANN et al., 2014).

“Suponha que países difiram na variedade de habilidades que eles possuem, enquanto que produtos difiram na variedade das habilidades que

a sua produção requira. Então, você espera que países com maiores capacidades de produção não só serem capazes de produzir mais produtos como também de fazerem produtos que poucos países podem criar.” (HAUSMANN, 2010).

Ainda, a complexidade econômica sobre um país pode ser analisada com base na exportação e crescimento do PIB. Quanto maior o nível de diversificação, menos volátil o ganho com as exportações será e isso é associado com uma menor variação do crescimento do PIB. Além disso, países com uma cesta de produtos para exportação menor tendem a ter taxas cambiais mais voláteis, o que desencoraja o investimento em bens negociáveis (AGOSIN et al., 2009; FERRAZ et al., 2018a).

Um país pode possuir o seu Índice de Complexidade Econômica maior quando passa a produzir bens que requeram mais tecnologia. A produção desses bens também melhora o número de mão de obra capacitada, além da probabilidade de melhoria em outros setores, como também capital humano empregado no novo setor pode trazer novas ideias de produtos (AGOSIN et al., 2009; FERRAZ et al., 2018a).

3. Método

O trabalho utilizou como referência índices de 70 países escolhidos devido a disponibilidade de dados, dentre os 5 continentes (Europa, Ásia, África, América – Sul e Norte, Oceania). Os dados referentes à complexidade econômica, IDH, força de trabalho, geração de energia solar e eólica foram coletados para os anos de 2010 e 2016. Vale destacar que havia 64 países com dados disponíveis para a análise de energia eólica, e 68 países para a análise de energia solar.

As variáveis utilizadas como base no modelo econométrico estão evidenciadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis utilizadas para as análises econôméticas

Variáveis	Descrição/Fonte
Solar	Geração de energia solar de um país (EIA, 2019).
Eólica	Geração de energia eólica de um país (EIA, 2019)
Índice de Complexidade Econômica	Índice que mostra a chamada Complexidade Econômica atribuída aos países de acordo com a cesta de produtos que ele produz (THE ATLAS OF ECONOMIC COMPLEXITY, 2019).
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano, que baseia sua análise no desenvolvimento humano dos países classificando-os em 3 categorias: desenvolvidos, subdesenvolvidos e em desenvolvimento (BANCO MUNDIAL, 2019).
Consumo de Eletricidade	Mensura o consumo médio de eletricidade de um país (EIA, 2019).
Força de Trabalho	Número de pessoas com capacidade para participar do processo de divisão social do trabalho (BANCO MUNDIAL, 2019).

Fonte: Elaborado pelo autor

Após coletadas, as variáveis foram analisadas a partir de uma matriz de correlação e regressão linear. Com o intuito de buscar estimativas que mensurem a influência da complexidade sobre a produção de energia, este estudo propõe um modelo econômético

que analise esta relação. Para isso, procedeu-se com funções Cobb-Douglas adaptadas para o problema de pesquisa (Expressão 1).

$$\begin{aligned} \log y_{it}^{\text{produção de energia}} &= \beta_0 + \beta_1 \log ICE + \beta_2 \log IDH + \beta_3 \log ConsumoEnergia \\ &\quad + \beta_4 \log ForçaTrabalho + \varepsilon \quad (1) \end{aligned}$$

Em que: $\log y_{it}^{\text{produção de energia}}$ é uma das variáveis que mensura a produção de energia solar ou eólica; β_0 é o intercepto; $\beta_1 \log ICE$ é o logaritmo do índice de complexidade econômica, $\beta_2 \log IDH$ é o logaritmo do índice de desenvolvimento humano, utilizado como proxy do capital humano e bem-estar nos países analisados, $\beta_3 \log ConsumoEnergia$ é o logaritmo do consumo energético em cada país analisado e, $\beta_4 \log ForçaTrabalho$ é a força de trabalho nos países analisados.

Propõe-se a utilização de uma regressão log-log, pois é possível interpretar os parâmetros como elasticidades. Optou-se pela análise de regressão linear múltipla, pois esta técnica é mais receptiva à análise ceteris paribus. Isto permite controlar explicitamente outros fatores que, de maneira, simultânea afetam a variável dependente (GREENE, 2011).

A inferência estatística do modelo econométrico ocorrerá, pelo Teste t que avaliará a significância de um único parâmetro, partindo da hipótese de nulidade em relação à uma hipótese alternativa. A H0 defenderá que o parâmetro analisado é igual a zero e a Ha indica que o parâmetro é diferente de zero (GREENE, 2011).

O teste de restrições lineares múltiplas, isto é, o teste F, verifica a significância do modelo de regressão linear. Parte-se de uma hipótese nula que afirma que nenhuma das variáveis explicativas tem efeito sobre a variável dependente (GREENE, 2011).

Nos dados do painel, a mesma unidade transversal é monitorada ao longo do tempo e possui uma dimensão espacial e uma temporal (GREENE, 2011). A análise do painel pode ser realizada através de dois modelos básicos: Modelos de Efeitos Fixos e Aleatórios. O modelo de efeito fixo remove características invariantes no tempo das variáveis explicativas para que o efeito líquido possa ser analisado, enquanto o modelo de efeitos aleatórios possui as mesmas premissas do modelo de efeitos fixos, ou seja, a interceptação varia de um indivíduo para outro, mas não horas extras, e os parâmetros de

resposta são constantes para todos os indivíduos e por todos os períodos de tempo (GREENE, 2011).

Desta forma, utilizou-se a seguinte estratégia para mensurar o modelo econométrico. Primeiramente, os dados foram estimados por meio do método Ordinary Least Square (OLS). Entretanto, como os dados são analisados em painel, utilizando uma análise de painel balanceado, o teste de Hausman foi usado para verificar se nossa amostra deve ser tratada como Efeitos Fixos (FE) ou Modelo de Efeitos Aleatórios (RE) (HAUSMANN, 1978). No modelo de efeitos fixos, o estimador de mínimos quadrados ordinários (OLS) será um estimador consistente e eficiente do modelo, chamado de variável dummy de mínimos quadrados (LSDV) (HOLLAND E XAVIER, 2005). Cada Estado da amostra possui características próprias que podem ou não influenciar as variáveis explicativas. Assim, supõe-se que algumas informações possam fornecer viés ou prejudicar a explicabilidade das variáveis (GREENE, 2011). Por outro lado, o modelo RE pressupõe que não há correlação entre os efeitos individuais e as outras variáveis aleatórias. Sua estimativa é realizada utilizando os Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) (HOLLAND E XAVIER, 2005).

Outro problema com modelos econôméticos é a multicolinearidade. Esse problema é definido como a presença de um alto grau de correlação entre as variáveis independentes (FREUND et al., 2006). Para verificar a presença de multicolinearidade, foi calculado o teste VIF (Variance Inflation Factors), que deve apresentar valor inferior a 10, a fim de indicar que o modelo está livre da multicolinearidade.

De acordo com as premissas dos modelos econôméticos, o termo de erro (ϵ_{it}) deve ter uma variação igual a σ^2 e os termos erráticos não devem ser correlacionados entre si. A violação dessas hipóteses torna o estimador inconsistente, gerando autocorrelação e heterocedasticidade (GREENE, 2011). Assim, este trabalho utilizou técnicas econôméticas para corrigir esses problemas nos dados do painel. Por fim, o modelo escolhido foi o Feasible Generalized Least Square (FGLS) para corrigir a heterocedasticidade (GREENE, 2011). Foi utilizado o software estatístico Stata versão 12.0 para a resolução dos modelos.

4. Resultados e Discussão

Utilizando o método econométrico Feasible Generalized Least Square (FGLS), este trabalho avaliou o efeito da complexidade econômica sobre a geração de energia solar e energia eólica no mundo. O teste de Hausman indicou que o modelo deveria ser tratado como efeito fixo (FE). O teste VIF demonstrou não haver presença de multicolinearidade nas estimativas, tendo em vista que o valor encontrado (8,62) foi menor do que 10. Entretanto, observou-se presença de heterocedasticidade, o que requereu a utilização do modelo FGLS.

A Tabela 3 traz o resumo das estimativas encontradas por meio da econometria.

Tabela 3 – Estimativas econométricas para a geração de energia solar

Variáveis	(1) OLS	(2) FE	(3) RE	(4) FGLS
Complexidade Econômica	0,723 (0,767)	2,654*** (1,013)	5,426*** (0,961)	1,917*** (0,455)
IDH	0,1242*** (3,487)	0,1069*** (8,880)	0,5677*** (5,553)	0,2762*** (2,793)
Consumo Eletricidade	-0,00663 (0,358)	1,48 (0,939)	3,121*** (0,620)	1,109*** (0,274)
Força de Trabalho	1,187*** (0,389)	5,769** (2,465)	4,841*** (0,660)	2,607*** (0,282)
Constante	-32,06*** (7,372)	-174,1*** (35,89)	-110,0*** (12,18)	-60,95*** (5,528)
Observações	417	417	417	417
Países		69	69	69
VIF			8,62	
País FE		YES	NO	
Ano FE		YES	NO	YES

Valor do desvio-padrão entre parênteses.

*** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,1

Fonte: Elaborado pelo autor

A complexidade econômica, IDH, consumo de eletricidade e força de trabalho apresentaram impacto positivo e estatisticamente significativo sobre a geração de energia

solar. De acordo com o resultado, a complexidade econômica é a segunda variável com maior impacto (1,917%) sobre a produção de energia solar. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica aumenta em 1,917% a produção de energia solar. Da mesma forma, a produção de energia solar é impactada pelo IDH (0,2762%), consumo de eletricidade (1,109%), e pela força de trabalho (2,607%).

A Tabela 4 traz as estimativas para o modelo econométrico que explica a geração de energia eólica.

Tabela 4 – Estimativas econométricas para a geração de energia eólica

Variáveis	(1) OLS	(2) FE	(3) RE	(4) FGLS
Complexidade Econômica	0,918 (0,884)	0,106* (0,630)	1,040* (0,575)	0,365* (0,192)
IDH	0,4494 (3,388)	0,3819*** (4,843)	0,3405*** (3,565)	0,0379** (3,130)
Consumo Eletricidade	1,212*** (0,360)	0,62 (0,555)	1,068** (0,437)	0,109** (0,303)
Força de Trabalho	-0,304 (0,372)	5,069*** (1,478)	2,446*** (0,476)	1,104*** (0,891)
Constante	-4.958 (7,002)	-110,6*** (21,80)	-62,39*** (8,336)	-471,3*** (46,97)
Observações	426	426	426	426
Países		64	64	64
VIF			8,62	
País FE		YES	NO	
Ano FE		YES	NO	YES

Valor do desvio-padrão entre parênteses.

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma, a complexidade econômica, IDH, consumo de eletricidade e força de trabalho apresentaram impacto positivo e estatisticamente significativo sobre a geração de energia eólica. De acordo com o resultado, a complexidade econômica é a segunda variável com maior impacto (0,365%) sobre a produção de energia solar. Em outros termos, o aumento de 1% na complexidade econômica aumenta em 0,365% a produção de energia solar. Da mesma forma, a produção de energia solar é impactada

pelo IDH (0,0379%), consumo de eletricidade (0,109%), e pela força de trabalho (1,104%).

De acordo com os resultados econométricos apresentados na Tabela 3 e 4, a complexidade econômica é um fator determinante para a geração de energia solar e eólica. Este é um resultado importante, pois demonstra que os países devem levar em consideração o grau de diversificação produtiva, a fim de engendrar a produção de fontes energéticas alternativas. O resultado corrobora com o conceito exposto por Agosin et. al. (2009), no qual se discute a importância da complexidade econômica para a produção de bens tecnológicos e a necessidade de mão de obra capacitada. Neste sentido, vale destacar que a complexidade econômica pode viabilizar a tecnologia necessária para produzir placas solares fotovoltaicas e turbinas eólicas. Além disso, tendo em vista a necessidade de profissionais com treinamento técnico nas economias com maior complexidade, a manutenção destes equipamentos pode ser feita com maior facilidade (FERRAZ et al., 2018b).

Segundo Agosin et. al. (2009), o emprego de tecnologia na produção de seus bens incentiva uma melhora no Índice de Complexidade Econômica. Os resultados encontrados neste trabalho encontraram uma relação ainda mais forte com a variação na geração das energias limpas e a força de trabalho.

De fato, o aumento da produção de energia elétrica por meio solar e eólico apresentou relação com os índices analisados (aumento no nível do Índice de Complexidade Econômica, IDH, força de trabalho e consumo de energia). O aumento no uso de fontes renováveis de energia requer emprego de equipamentos sofisticados e com alto nível tecnológico. Estes, por sua vez, requerem mão de obra qualificada para as construções e operações de suas usinas, o que é consequência de uma educação de qualidade. Todos esses aspectos causam uma melhoria no padrão de vida, o qual varia de forma positiva o IDH, aumenta o consumo de energia e gera novos empregos.

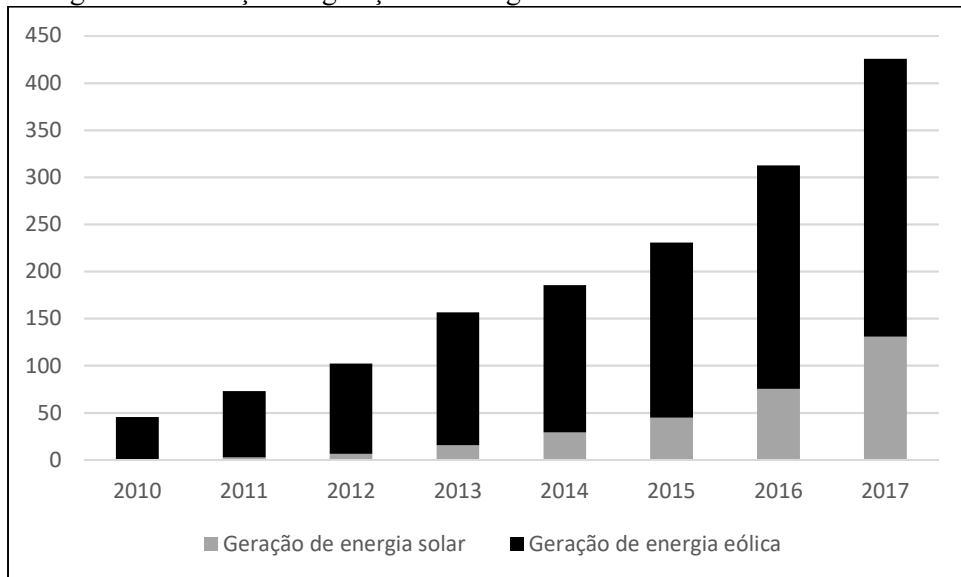
A China, por exemplo, é referência em fontes de energia limpa e atualmente lidera os investimentos em energias renováveis (BLOOMBERG, 2018). Em 2010, o país era responsável pela geração de 44,62GWh de energia eólica e 0,7GWh de energia solar. Em 2017 esse número saltou para 295,023GWh e 130,658 GWh, respectivamente (IEA, 2019). Parizotto (2014) descreve que, além de possuir grandes parques eólicos, a China

possui micro parques especialmente em áreas rurais que não possuem acesso a rede elétrica, com capacidade de abastecer todo o vilarejo.

A partir de uma série de políticas de incentivo, ocorreu uma remodelação da indústria local e produtores nacionais da cadeia de energia fotovoltaica ganharam vantagem sobre os competidores internacionais. Em 2017, dentre os 10 maiores produtores de painéis fotovoltaicos, 7 eram chineses (BLOOMBERG, 2019).

A figura 4 mostra a evolução da geração de energia solar e eólica na China em 2010 e 2017.

Figura 4 - Evolução da geração de energia solar e eólica em GWh na China

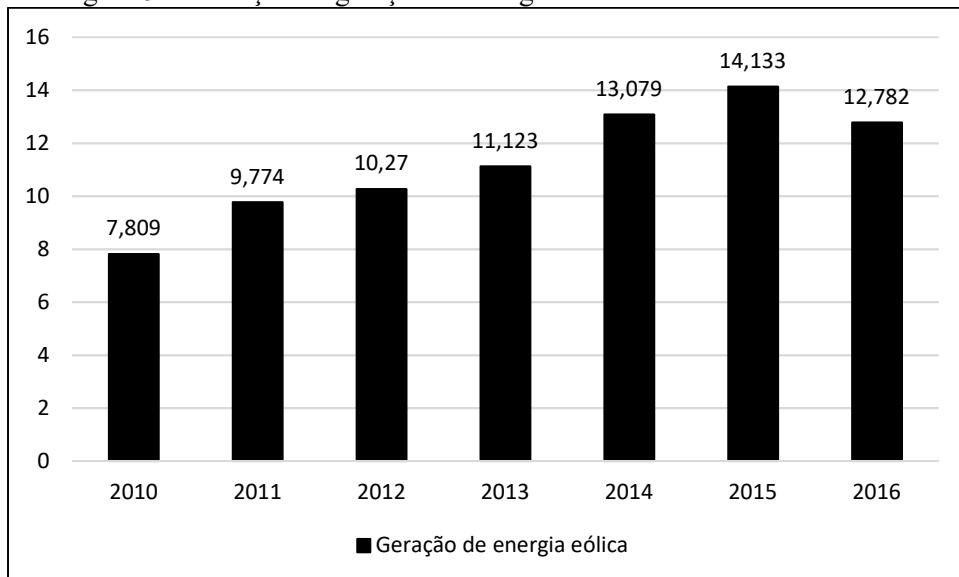


Fonte: Elaborado pelo autor

A Dinamarca, por exemplo, referência em geração de energia eólica, aproximadamente dobrou sua geração de eletricidade por turbinas eólicas desde 2011. Enquanto em 2011 o país produzia 9.774 GWh, em 2018 o país gerou 13.899 GWh. Até 2030, o país espera ter pelo menos 50% de sua necessidade energética provinda de recursos renováveis (SANTOS, 2018).

A figura 5 mostra a evolução na geração de energia eólica na Dinamarca entre 2010 e 2016.

Figura 5 - Evolução da geração de energia eólica em GWh na Dinamarca



Fonte: Elaborado pelo autor

Em suma, pode-se constatar os aspectos positivos envolvendo o aumento da produção de energias alternativas, caracterizadas neste estudo pela solar e eólica. A diversificação produtiva exposto pelo conceito de complexidade econômica posiciona-se como um aspecto importante também para a produção desse tipo de energia e traz consigo aumento positivo também no IDH, consumo de eletricidade e força de trabalho.

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar o impacto causado pela variação do Índice de Complexidade Econômica na geração de energia solar e eólica, IDH, consumo de eletricidade e força de trabalho. A partir de uma análise econométrica dos dados apresentados de 70 países entre os anos de 2010 e 2016 pelo teste Feasible Generalized Least Square (FGLS), pode-se encontrar o efeito das variáveis dependentes corrigindo-se a autocorrelação e a heterocedestidade.

Inicialmente, foram expostos pontos teóricos para que se pudesse entender os conceitos de complexidade econômica e traçar os efeitos da evolução da cadeia energética no mundo e no Brasil. Assim, entender as motivações existentes para o aumento da busca de países pelas energias limpas a partir de acordos mundiais como por exemplo o Protocolo de Quioto.

Pela análise, verificou-se que existe relação positiva entre as variáveis. O estudo observou que o aumento na produção de energia elétrica solar e eólica varia de forma positiva e significativa os índices analisados (Índice de Complexidade Econômica, IDH, consumo de eletricidade e força de trabalho) e de fato, analisando os conceitos expostos por alguns pesquisadores, a variação do Índice de Complexidade Econômica ocasiona uma melhoria da mão de obra qualificada que, por sua vez, também é necessária para a produção de bens que requerem um alto nível de tecnologia empregado, como em usinas solares e eólicas e que, como consequência, também exercem papel no aumento do IDH e no consumo de eletricidade.

6. Referências Bibliográficas

ACORDO DE PARIS. Disponível em: ><http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>< Acesso em: 20-nov-2018.

AGOSIN, M. R. **Export diversification and growth in emerging economies.** Department of Economics, School of Economics and Business, University of Chile. Cepal Review, p. 115-131, april 2010.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia no Mundo - Matrizes e Indicadores 2017 - anos ref. 2015.** Disponível em: ><http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial>< Acesso em: 22-nov-2018.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matriz Energética Brasileira 2030.** Disponível em: ><http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial>< Acesso em: 23-nov-2018.

BLOOMBERG, 2018. **China's Solar Boom Boosts Clean Energy Funding Near Record.** Disponível: ><https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-16/china-s-hunger-for-solar-boots-clean-energy-funding-near-record>< Acesso em 22-out-2019.

FERRAZ, Diogo et al. Economic complexity and human development: DEA performance measurement in Asia and Latin America. Gestão & Produção, v. 25, n. 4, p. 839-853, 2018a.

FERRAZ, Diogo et al. Analysis of absorptive capacity and foreign direct investment in the productivity of Brazilian municipalities. Production, v. 28, 2018b.

GALA, P. CAMARGO, J. MAGACHO, G. ROCHA, I. **Sophisticated jobs matter for economic complexity: An empirical analysis based on input-output matrices and employment data.** Structural Change and Economic Dynamics, 2017.

HAUSSMANN, R. **Complexity and the Wealth of Nations.** Right Now The Expanding Universe, 2014.

HIDALGO, C.A., Klinger, B., Barabasi, A.L., Hausmann, R., 2007. **The product space conditions the development of nations.** Science 27 (July (5837)), 482–487, Disponível em: ><http://dx.doi.org/10.1126/science.1144581>< Acesso em: 22-nov-2018 .

IEA HISTORY Disponível em: ><https://www.iea.org/about/history/>< Acesso em: 19-nov-2018.

PARIZOTTO, R.R. Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d’água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais na cidade de Cascavel-PR. 69p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

SANTOS, D. A energia eólica dinamarquesa aumenta 43% da eletricidade. Disponível em: ><https://folhadegoias.info/jornal-folha-de-goias-a-energia-eolica-dinamarquesa-aumenta-43-da-eletricidade.html>< Acesso em: 21-out-2019.

SMIL, V. World History and Energy. Encyclopedia of Energy, Volume 6. r 2004 Elsevier Inc. University of Manitoba, Canada.

THE ATLAS OF ECONOMIC COMPLEXITY. Disponível em : ><http://atlas.cid.harvard.edu/what-is-the-atlas>< Acesso em 01-nov-2019

THE PARIS AGREEMENT. Disponível em : ><https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>< Acesso em: 20-nov-2018

UN FOLLOW-UP Disponível em: ><http://www.un.org/geninfo/bp/envirp2.html>< Acesso em: 19-nov-2018

WHAT IS THE KYOTO PROTOCOL? Disponível em: ><https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol>< Acesso em: 19-nov-2018

World energy demand and economic outlook. Disponível em > [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)< Acesso em: 24-nov-2018

Apêndice – Países analisados:

Tabela 5 – Países analisados

Camarões	Hungria
Argélia	Irlanda
Egito, Rep. Árabe	Itália
Gana	Países Baixos
Marrocos	Noruega
Nigéria	Polônia
Tunísia	Portugal
China	Romênia
Região Administrativa Especial de Hong Kong, China	Suécia
Indonésia	Canadá
Índia	Costa Rica
Israel	Guatemala
Jordânia	Honduras
Japão	Jamaica
Camboja	México
Coreia, Rep.	Estados Unidos
Paquistão	Austrália
Filipinas	Nova Zelândia
Catar	Argentina
Arábia Saudita	Brasil
Cingapura	Chile
Tailândia	Colômbia
Peru	Uruguai
Vietnã	Venezuela, R. B.
Áustria	Emirados Árabes Unidos
Bulgária	Azerbaijão
Suíça	Estônia
Alemanha	Croácia
Dinamarca	Lituânia
Espanha	Letônia
Finlândia	Moldova
França	Federação Russa
Reino Unido	Eslovênia
Grécia	Ucrânia
República Eslovaca	República Checa

Fonte: Elaborado pelo autor